

ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DE LA COMPOSICION QUIMICA DE LOS PRINCIPALES GASES NATURALES COLOMBIANOS SOBRE EL RENDIMIENTO DE LA CONVERSION Y EL DESEMPEÑO MECANICO DE LOS MOTORES A GAS EN COLOMBIA.

CARLOS ALBERTO ACEVEDO ALVAREZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en
Combustibles Gaseosos

Director JOHN RAMIRO AGUDELO SANTAMARIA Doctor en Ingeniería Energética

Investigador Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas Asesor ANDRES AMELL

ARRIETA Magíster en Economía Energética Director Grupo de Ciencia y
Tecnología del Gas

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

Medellín, 23 de julio de 2003

Tabla de contenidos

..	1
AGRADECIMIENTOS .	3
GLOSARIO .	5
NOMENCLATURA . .	7
RESUMEN .	9
CAPITULO 1 .	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .	11
1.2 OBJETIVOS .	15
1.2.1 Objetivo general .	15
1.2.2 Objetivos específicos . .	16
1.3 Impacto esperado .	16
CAPITULO 2 .	17
2.1 ESTADO DEL ARTE .	17
2.1.1 PRELIMINARES . .	17
2.1.2 ESTANDARES DE CALIDAD DEL GAS NATURAL PARA PROPOSITOS GENERALES .	19
2.1.3 CALIDAD DEL GAS RECOMENDADA POR LOS FABRICANTES DE MOTORES . .	22
2.1.4 EFECTOS DE LA CALIDAD DEL GAS NATURAL EN MOTORES Y VEHICULOS .	23
Estudios de los efectos de las variaciones de composición del gas natural . .	25
2.2.1 Estudio estadounidense para vehículos de servicio pesado (1991) .	25
Estudio estadounidense de los efectos en las características de operación del motor (King, 1991) . .	27
2.2.3 Estudio Europeo para vehículos ligeros (2001) . .	28
2.3 ESTANDARES DE CALIDAD DEL GAS NATURAL PARA COLOMBIA . .	29
CAPITULO 3 .	33
3.1 CONSIDERACIÓN TEÓRICA .	33

3.2 EFECTOS DE LA COMPOSICIÓN DEL GAS NATURAL (GN) .	39
3.3 VARIABLES DE OPERACIÓN QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO, LA EFICIENCIA Y LAS EMISIONES DEL MOTOR ENCENDIDO POR CHISPA .	42
3.4 EL INDICE DE WOBBE COMO CRITERIO DE CALIDAD DE UN COMBUSTIBLE .	46
3.5 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL GAS NATURAL EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL . .	55
CAPITULO 4 .	59
4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL . .	59
4.1.1 PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS . .	59
4.1.2 CONSIDERACIONES TÉCNICAS DEL EXPERIMENTO .	59
4.2 Consideraciones Estadísticas Del Experimento .	67
4.3 Esquema experimental y aleatoriedad asignada . .	69
4.4 Descripción del procedimiento experimental .	69
CAPITULO 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .	73
6. CONCLUSIONES . .	79
7. BIBLIOGRAFÍA .	81
ANEXOS .	85
ANEXO A. Cálculo de la presión de suministro del gas de Guajira para .	85
garantizar igual entrada de energía térmica al motor CFR . .	85

A mi familia A mis Profesores.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

John Ramiro Agudelo Santamaría, PhD. En ingeniería Térmica y director de la tesis por sus valiosos aportes.

Andrés Amell Arrieta, Msc. En Economía de la energía y coordinador del Grupo de Ciencia y Tecnología del gas de la Universidad de Antioquia por su constante dedicación y asesoría para la ejecución del proyecto.

La empresa colombiana de petróleo, ECOPETROL, por el apoyo económico y logístico para la realización del proyecto.

Lilliana Vélez, Msc. En Gestión ambiental por su contribución al diseño de los experimentos.

Los Ingenieros Mecánicos Ricardo Moreno y Diego Henao, por su apoyo y colaboración en la ejecución experimental.

GLOSARIO

CONDENSACIÓN RETROGRADA: Fenómeno de mezclas gaseosas con hidrocarburos y en el cual un componente se condensa cuando se reduce su presión.

DENSIDAD RELATIVA: Además, es denominada gravedad específica, es la relación entre la densidad del gas y la densidad del aire a las mismas condiciones de referencia

GAS INERTE: Un gas a condiciones estándar y que no contribuye a liberar energía cuando se inflama una mezcla

ÍNDICE DE WOOLFE INFERIOR: Es la relación entre el poder calorífico inferior de un combustible dividido la raíz cuadrada de la gravedad específica del combustible. Es el parámetro utilizado en motores de combustión interna para establecer la intercambiabilidad de gases combustibles usados en ellos

KNOCK: Es la combustión detonante no controlada que se autoinicia en la zona de gases aguas arriba del frente de llama

MOTOR DUAL: Es un motor térmico que puede operar indistintamente ya sea con gas natural o con gasolina. Muchos de ellos se diseñan para cambiar automáticamente a gasolina cuando el cilindro de gas natural agota su contenido

MOTOR BICOMBUSTIBLE: Es un motor térmico que puede operar ya sea solamente con diesel o bien con diesel y gas natural simultáneamente. En un motor bicombustible, el combustible diesel se utiliza para inflamar el gas natural

MOTOR DEDICADO: Es un motor térmico que sólo puede operar usando gas natural

NÚMERO DE METANO: Es el índice de resistencia al knock de los combustibles gaseosos basados en dos gases de referencia: metano e hidrógeno. La escala del número de metano esta fundamentada en el porcentaje molar de metano e hidrógeno. Metano, con alta resistencia al knock, se le asigna un número de metano (MN) de 100. Hidrógeno, con la más baja resistencia al knock, se le asigna cero. El MN de una mezcla gaseosa es el valor que corresponde a una mezcla gaseosa metano/hidrógeno del mismo valor de resistencia al knock

NÚMERO DE OCTANO: Es el índice de resistencia al knock de combustibles líquidos, basado en dos combustibles líquidos de referencia: iso-octano (número de octano de 100) y n-heptano (número de octano de cero). Las mezclas de estos combustibles son usadas para determinar otros números de octano, los cuales pueden ser comparados con el combustible de prueba

PODER CALORÍFICO SUPERIOR: Es la cantidad de energía liberada en forma de calor (MJ / m^3) cuando un metro cúbico de un gas a condiciones estándar (15 °C y 1013 mbar) es completamente inflamada en aire cuando los productos de la combustión salen a condiciones estándar

PODER CALORÍFICO INFERIOR: Es el poder calorífico superior menos el calor latente de condensación de los productos de la combustión

TASA DE EXCESO DE AIRE (#): Es la tasa aire/combustible actual dividido entre la tasa aire/combustible estequiométrico

TASA AIRE/COMBUSTIBLE ESTEQUIOMÉTRICO: Es la tasa de masa de aire

dividido entre la masa de combustible para realizar una combustión completa.

NOMENCLATURA

ND: No registrado por el equipo

hh : Humos húmedos

d : Densidad relativa

Va: Volumen de aire teórico, $[m^3_{n \text{ aire}}/m^3_{n \text{ gas}}]$

TLL: Temperatura adiabática de llama, (°C)

PCS: Poder calorífico superior, $[MJ/m^3_{st}]$

PCI: Poder calorífico inferior, $[MJ/m^3_{st}]$

W: Índice de Woobe, $[MJ/m^3_{st}]$

LSI: Limite superior de inflamabilidad, [%]

LII: Limite inferior de inflamabilidad, [%]

$V^i_{f_o}$: Volumen de humos húmedos, $[m^3_{n \text{ humos húmedos}}/m^3_{n \text{ gas}}]$

V_{f_o} : Volumen de humos secos, $[m^3_{n \text{ humos secos}}/m^3_{n \text{ gas}}]$

V_{CO_2} : Volumen de CO_2 , $[m^3_{n \text{ de } CO_2}/m^3_{n \text{ gas}}]$

V_{H_2O} : Volumen de H_2O , $[m^3_{n \text{ de } H_2O}/m^3_{n \text{ gas}}]$

V_{N_2} : Volumen de N_2 producido, $[m^3_{n \text{ de } N_2}/m^3_{n \text{ gas}}]$

CO_2 : Porcentaje máximo de CO_2 en los humos secos

m_a : Masa de aire teórico, $[Kg \text{ aire}/Kg \text{ gas}]$

m^i_f : Masa de humos húmedos, $[Kg \text{ humos húmedos}/Kg \text{ gas}]$

mf : Masa de humos secos. $[Kg \text{ Humos secos}/Kg \text{ gas}]$

: Densidad del gas, $[Kg/m^3]$

C: Coeficiente de descarga del inyector

A: Área transversal del inyector, $[mm^2]$

P: Presión absoluta en la descarga del inyector, [bar]

T_* : Temperatura absoluta de la condición de referencia [K]

P_* : Presión absoluta de la condición de referencia, [bar]

T_o : Temperatura absoluta del gas antes de la descarga, [K]

Q_{MR} : Masa reducida del gas (cantidad adimensional)

#: Exceso de aire, [%]

n_1 : Número de replicas del experimento

a: Niveles del factor no principal

$\#^2$: Varianza estimada

Da: Desviación experimental (% Vol).

#₁: Grados de libertad del factor no principal
#: Error de tipo I
1-# Intervalo de confianza [%]
#: Error tipo II [%]
#²: Tamaño muestral del experimento
n: Tasa de aireación, [%]
cc: Cámara de combustión
Ps: Presión de suministro,[mbar]
Thumos: Temperatura de humos de escape, [°C]
Qg: Caudal de gas en la admisión del motor,[LSM]
#: Factor de peso de los cilindros y relación de eficiencias del motor
%CH₄ : Porcentaje en volumen de metano
%O₂ :Porcentaje en volumen de oxígeno
%CO₂ :Porcentaje en volumen de dióxido de carbono
%CO : Porcentaje en volumen de monóxido de carbono
Acogas: Asociación colombiana de gas
ABC : Después del punto muerto inferior del motor, [°]
ATC: Después del punto muerto superior del motor [°]
BBC: Antes del punto muerto inferior [°]
BTC: Antes del punto muerto superior del motor [°]
CA: ángulo del cigüeñal [°]
CREG: Comisión reguladora de energía y gas de Colombia
GLP: Gas licuado de petróleo
GNC: Gas natural comprimido
LSM: Litros estándar por minuto
MBT: Tiempo de máximo torque al freno, [°]
MEC: Motor de encendido por compresión
MEP: Motor de encendido provocado
MMC: Millón de metros cúbicos
MMCD: Millón de metros cúbicos por día
MN: Número de metano
MON: Motor octane number: número de octano del motor
RON: Research octane number: número de octano de investigación
RPM: evoluciones por minuto del motor
UPME: Unidad de planeación minero energética de Colombia

RESUMEN

Uno de los problemas de mayor impacto en el futuro del sector energético en Colombia es el de la movilidad limpia. La lenta evolución tecnológica y las presiones ambientales señalan la insostenibilidad del esquema actual del transporte en Colombia, sector que consume cerca del 99 % (UPME, 1999) de los recursos derivados del petróleo y trae como consecuencia que las emisiones tóxicas de la combustión eleven el nivel de deterioro del medio ambiente y de la salud de los colombianos.

Una de las estrategias del gobierno nacional para reducir el problema anterior ha sido impulsar el programa de masificación de gas natural y la reconversión del parque automotriz a GNC. Este puede ser usado para disminuir las emisiones nocivas pero a costa de desmejorar el desempeño mecánico causado por la existencia de diferentes pisos térmicos en Colombia que influyen notablemente en la cantidad de oxígeno necesaria para que el motor desarrolle su potencia habitual (igual a la desarrollada antes de la reconversión)

Actualmente el programa de reconversión vehicular utiliza como combustible gas natural de la Guajira, con el cual se han hecho algunos estudios de pérdida de rendimiento del motor (realizados en la ciudad de Bogotá), pero no se han establecido evaluaciones de la incidencia de la variación de la composición química del gas natural a fin de facilitar la intercambiabilidad y disminuir la dependencia de un solo tipo de gas natural, situación de alto riesgo dado que pueden presentarse limitaciones en la explotación ó ataques armados al gasoducto debido a la inestabilidad política del país.

El proyecto "Estudio sobre la influencia de la variación de la composición química de los principales gases naturales colombianos sobre el rendimiento de la conversión y el desempeño mecánico de los motores a gas en Colombia" muestra de manera teórica y experimental, la influencia de la composición química de los gases naturales de Guajira y Cusiana sobre el desempeño mecánico y el nivel de emisiones

El proyecto esta centrado en el logro de los siguientes objetivos: Realizar un estudio sobre la influencia de la variación de la composición química de los principales gases naturales colombianos sobre el rendimiento de la conversión y el desempeño mecánico de los motores a gas en Colombia, comparar experimentalmente el desempeño de un motor convertido usando gases naturales de Guajira y Cusiana y determinar los factores que afectan la intercambiabilidad de los principales gases naturales colombianos para uso automotriz.

Luego de realizar el estado del arte sobre la literatura técnica internacional que estudia la influencia de la variación de la composición química en el desempeño mecánico y ambiental de motores de encendido provocado que operan con gas natural, se efectúan una serie de pruebas con gas natural de Guajira y luego con Cusiana en un motor monocilíndrico CFR de relación de compresión variable para obtener entre los resultados más importantes: 3,8% de disminución en la tasa aire / combustible, un aumento del 44% en las emisiones de CO, la disminución en 5,5% CO₂ y 9% CO₂ y un aumento de 14,37% en el rendimiento.

Las estrategias de comunicación serán: La publicación de los resultados en las revistas que en nuestro medio tratan del tema del gas vehicular, realizar

ponencias en los diversos congresos nacionales sobre energía, organizar seminarios con importadores, técnicos, distribuidores e investigadores del país y colocar la información pertinente en INTERNET para su divulgación a nivel internacional.

CAPITULO 1

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el marco de la política energética colombiana y con el fin de fortalecer el programa de masificación del gas natural, el gobierno nacional lanzó el programa de gas natural vehicular al interior del país a finales de 1999, buscando dos objetivos fundamentales: fortalecer la estrategia nacional de autosuficiencia energética y disminuir la contaminación ambiental del sector transporte en los grandes centros urbanos.

- Estos objetivos están enmarcados dentro del programa de movilidad limpia que tiene como estrategias el reordenamiento del tráfico vehicular, el mejoramiento de la calidad de los combustibles y las mejoras tecnológicas en los motores (UPME, 1999).
- Sin embargo, a pesar de la bondad ecológica y económica del gas natural vehicular existen muchas variables que inciden en su falta de dinamismo e impacto en el sector automotriz colombiano:
- La no existencia de un esquema tarifario de combustible de mayor estímulo hacia el uso de gas natural vehicular
- Ausencia de facilidades de financiación para la reconversión de vehículos
- Carencia de incentivos y exención de impuestos por la utilización de tecnologías

limpias

- Inexistencia de estudios más detallados sobre las pérdidas globales de potencia debidas a la reconversión teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas existentes en Colombia (alturas sobre el nivel del mar, temperatura y humedad relativa)
- La falta de evaluaciones de la incidencia de la composición química de los principales gases naturales colombianos(Guajira, Cusiana y Apiay) en el desempeño mecánico de los motores reconvertidos a gas natural, con miras a facilitar la intercambiabilidad y disminuir el riesgo de existencia limitada de producción ó por un ataque de grupos armados al gaseoducto
- La lentitud al inicio del desarrollo del programa de masificación de gas, lo que provocó que muchos vehículos pesados de transporte público se cambiaran a motor diesel en lugar de GNC.

De las variables anteriores la influencia de las condiciones atmosféricas en los diferentes pisos térmicos colombianos y la intercambiabilidad son las que menos han sido estudiadas, a pesar de las ventajas económicas y tecnológicas que tendrían para el país.

¿Como afecta la variación en la composición química del gas natural el desempeño energético y ambiental de los motores de combustión interna operando con gas natural?

La respuesta a este interrogante esta basada en tres factores a detallar:

- La diversidad de composición de los gases naturales colombianos (UPME, 1999).

En la tabla 1 aparecen las características típicas del gas natural. Adicionalmente, existen otros campos de producción de gas asociado, diferentes a los mencionados en la tabla 1, tales como: Morichal, Gloria Norte, entre otros., los cuales se sitúan en el departamento de Casanare, con características típicas muy similares al gas natural proveniente de los campos de Apiay. Igualmente, en el sur del país se encuentran los campos de producción de Orito, con gas natural asociado, de un contenido de CO₂ superior al 60%. Dependiendo de su composición química, el gas estará sometido no sólo a la deshidratación sino también a separación en plantas especiales que pueden utilizar diversos procesos como: compresión, enfriamiento, absorción, turboexpansión, destilación y fraccionamiento.

CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DEL GAS NATURAL									
COMPONENTE	SUMINRA	GUEPAJE	FWCA	MONTARUELO	OPON	ARMAY	CUBANA	HEINAM	HEINAM
Metano	97.78	98.94	98.88	98.17	91.05	76.43	76.55	81.78	
Etilano	0.88	0.66	0.20	0.70	5.88	14.55	10.98	2.77	
Propano	0.20	0.15	0.12	0.24	1.32	1.96	5.36	2.34	
Butano	0	0.07	0	0.05	3.12	0.43	0.88	0.51	
n-Butano	0	0.09	0	0	0.85	0.15	0.70	0.00	

Tabla 1 Características típicas del Gas natural en Colombia (UPME, 1999)

La incidencia de la composición química de los principales gases naturales colombianos (Guajira y Cusiana) en la duración de la fase inicial de desarrollo de llama laminar en la combustión de los motores de combustión interna operando con gas natural.

Los motores de gas natural (encendidos por chispa MEP y encendidos por compresión MEC) presentan ventajas económicas y ambientales sobre sus similares a gasolina y diesel. Sin embargo, los motores convertidos a gas tienen factores limitantes para su desempeño mecánico (potencia, torque, Presión media efectiva, Consumo Especifico de combustible, entre otros) igual a los mencionados, porque algunos de los constituyentes del combustible usado (metano y dióxido de carbono) afectan de manera considerable las etapas del desarrollo de la combustión en la cámara de combustión y por ende, inciden sobre los parámetros de operación de los motores. Aunque, el gas natural mejora en los motores la resistencia al autoencendido y al *Knock* se identifican por:

- La baja velocidad de propagación de la llama de su combustible
- Una mayor duración de la fase inicial de desarrollo de llama laminar.
- El factor de equivalencia en la sustitución de gasolina por gas natural comprimido para uso vehicular (Agudelo, et al, 2002)

En Colombia el combustible usado para estos motores reconvertidos es Gas natural de la Guajira, que teniendo la más alta pureza (97,76 % CH₄, en volumen) tiene una relación de equivalencia energética (m³ GNC /GAL de gasolina) frente a la gasolina de 14,5 % menos favorable que el gas natural de Cusiana (76,55% CH₄, en volumen) y 5,6 % menos favorable que el gas natural de Apiay (78,46% CH₄, en volumen).

Además , este modelo de equivalencia energética establece que se obtendría un rendimiento 14,37 % mayor (más kilómetros recorridos con el mismo volumen de combustible) con el gas natural de Cusiana que con el gas natural de la Guajira y un 9,2 % más rendimiento que con el gas natural de Apiay; ; lo que lleva a un gran número de conductores que tienen vehículos convertidos a gas natural en la ciudad de Bogotá, abastecerse preferiblemente en las estaciones del sur, porque allí se suministra gas natural del sur del país. Significa entonces que de manera empírica, el usuario esta mostrando las posibilidades de ahorro de combustible con el beneficio adicional en menor nivel de emisiones.

- Proyecciones de producción 1999-2010

La tercera variable en el problema de los factores que afectan el desempeño mecánico de los motores reconvertidos a gas son las proyecciones de producción para los gases mencionados en un comienzo, que muestran un mayor afianzamiento de producción en Cusiana, pero dada su composición (alto contenido de inertes, 5,07%CO₂ en volumen), se hace necesario una alta inversión inicial en el proceso de tratamiento a fin de disminuir los efectos negativos de los inertes.

La tabla 2 muestra una proyección de producción de gas natural en Colombia (1999-2010) que evidencia a partir del año 2009 una mayor y estable participación del gas natural de Cusiana en el plan de masificación del gas.

Tabla 2. PROYECCIONES DE PRODUCCIÓN (UPME, 1999) Escenario bajo –Casanare 7,1 MMCD

CAMPO	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Guajira	20,5	20,2	20,9	20,7	20,7	21,8	22,0	20,5	20,9	12,2	4,6	3,2
Piedem.			1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Cusiana	0,6	1,8	3,1	4,4	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Guepajé	1,1	1,0	0,7	0,6	0,4	0,1						
Santand.	2,6	2,4	2,4	1,9	1,5	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Huila	0,6	0,7	0,6	0,5	0,3	0,8	0,08	0,05	0,0	0,0	0,0	0,0
Apiay	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,09	0,083	0,06	0,06	0,06	0,06	0,02
Otros	0,02	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Total	25,72	26,46	29,36	29,66	30,16	31,14	30,4	28,7	28,92	20,12	12,42	10,88

1

Las proyecciones del escenario alto (Ver tabla 3) muestran similar comportamiento pero con la diferencia de mayor producción en Cusiana (13,32 MMCD).

Tabla 3 Proyecciones De Producción (UPME, 1999) Escenario Alto –Casanare 13,32 MMCD

CAMPO	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Guajira	20,5	20,2	20,9	20,7	20,7	21,8	22,1	20,5	20,9	12,2	4,6	3,2
Piedem.			1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Cusiana	0,5	1,8	3,1	4,4	5,7	5,7	6,2	8,1	8,1	10	11,9	11,9
Guepajé	1,1	1,0	0,7	0,6	0,4	0,1						
Santand.	2,6	2,4	2,3	1,9	1,5	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Huila	0,6	0,7	0,6	0,5	0,3	0,1	0,1	0,1				
Apiay	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Otros	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Total	25,6	26,4	29,4	29,7	30,2	30,5	31,0	31,1	31,3	24,5	31,1	17,1

2

El escenario alto requeriría inversiones adicionales en Cusiana-Cupiagua, tratamiento a partir del año 2005, para incrementar la capacidad en 5,7 MMCD para llegar a 11,9 MMCD. Las implicaciones económicas no se pueden evaluar al momento, dado que no se ha determinado el impacto en la producción de crudo (sólo se tiene un estimativo para los primeros 5,7 MMCD).

En los dos escenarios, la infraestructura de producción de la Guajira es suficiente en la actualidad para lograr las capacidades de producción planteadas (en promedio durante el año). De hecho, se pueden alcanzar producciones eventuales ("Picos") hasta de 22,7 MMCD.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Estudiar la influencia de la variación en la composición química del gas natural sobre el desempeño de un motor operando con gas.

¹ Fuente= ECOPETROL /1998

² Fuente= ECOPETROL /1998

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar los elementos que se usan en la literatura técnica para cuantificar el efecto de la intercambiabilidad
- Realizar un inventario de posibles soluciones tecnológicas para resolver el problema de la intercambiabilidad en el área automotriz.
- Establecer experimentalmente el efecto del uso de gas natural de guajira y gas de referencia (mezcla preparada en el laboratorio que simule la composición de gas natural de Cusiana) sobre el desempeño del motor y que permita resolver los interrogantes: como afecta la potencia y el nivel de emisiones? Como se afecta el proceso de la combustión (fase inicial de desarrollo de llama laminar)?

1.3 Impacto esperado

El estudio de la intercambiabilidad de los gases naturales colombianos (Guajira y Cusiana) en el desempeño energético y ambiental de los motores operando con gas natural incidirá en el aumento del dinamismo del programa nacional de reconversión vehicular. Además, hará posible diversificar la oferta de gases naturales para la reconversión (incluyendo sus ventajas económicas y tecnológicas).

Otro impacto es de orden investigativo porque no es claro aún, la influencia sobre el rendimiento de conversión del combustible y sobre el desempeño mecánico y ambiental del motor cuando se usa un gas de pozo libre o de pozo asociado. Si bien es cierto que el gas natural de Cusiana tiene mayor poder calorífico por unidad de volumen que los demás gases naturales, debe considerarse también que tiene mayor contenido de inertes, lo cual encarece el proceso de purificación del gas (UPME, 1999).

CAPITULO 2

2.1 ESTADO DEL ARTE

2.1.1 PRELIMINARES

El desempeño y emisiones de un motor encendido por chispa (MEP) es función del encendido, la velocidad de combustión, la resistencia al *Knock* y el suficiente contenido energético de la mezcla de combustible (Hien, 2002).

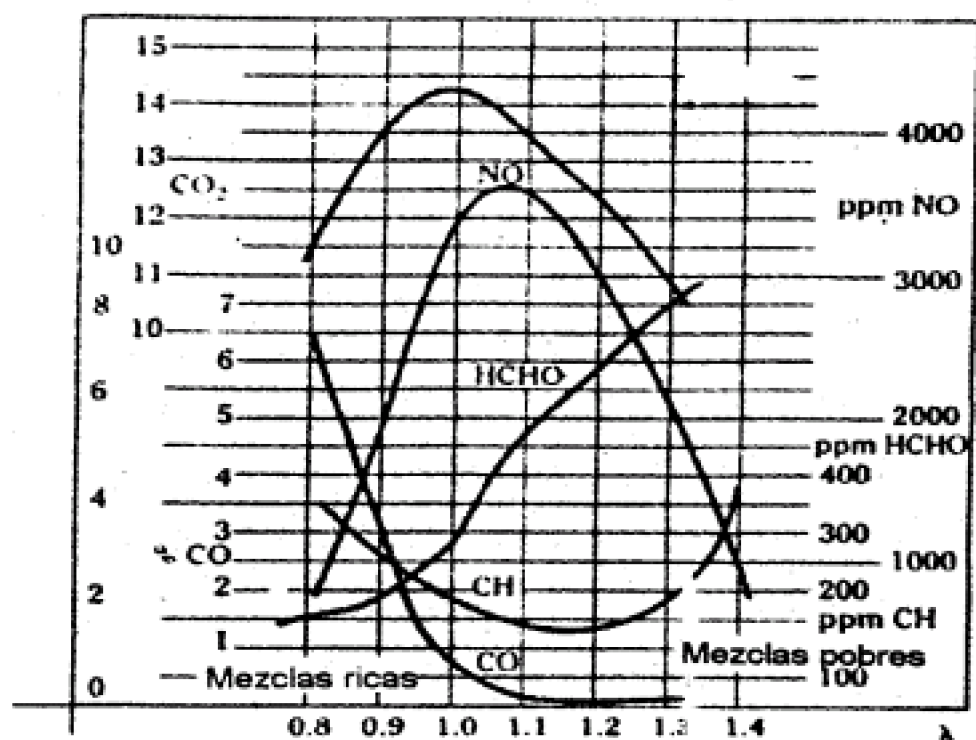
Las propiedades del gas natural influyen sobre el desempeño del motor.

Estas propiedades son:

- La densidad
- El índice de Wobbe
- La velocidad de combustión
- La tasa aire/combustible (ϕ)
- La resistencia al *Knock*

Estas propiedades están estrechamente ligadas a la composición del combustible. Al variar la composición del mismo, se tiene un efecto significativo en la operación, el desempeño y las emisiones de los vehículos reconvertidos a gas natural. Amplias variaciones en la composición pueden tener efectos significativos en el desempeño del motor y las emisiones, si la máquina es diseñada para máximo desempeño y eficiencia con un gas determinado y no esta equipado con medios de ajuste para otras composiciones. Esto es debido a que las emisiones de escape de un MEP dependen del exceso de aire (λ) (Ver Figura 1).

También, La composición del combustible puede afectar la cantidad y la composición de las emisiones de inquemados. En este aspecto se hacen importantes la eficiencia del catalizador y la reactividad atmosférica.



(λ = factor de exceso de aire)

Figura 1. Variaciones de las emisiones con el cambio en el exceso de aire para gas natural (Degobert, 1995)

En general, los motores a gas son diseñados para trabajar en condición

dequemado mezcla pobre o estequiométrica. En el caso de mezcla pobre, las emisiones son controladas mediante la operación en condiciones pobres para bajar emisiones de NO_x y si se hace necesario usando un catalizador de oxidación para reducción de emisiones de hidrocarburos. Para bajas emisiones, el motor estequiométrico

requiere usar un catalizador de tres vías.

En ambos tipos de motores, el control de la relación aire /combustible es crítico para máximo desempeño y el control del sistema de emisiones. Ya que la composición del gas afecta su densidad y la relación estequiometrica aire/ combustible, tiene una notable influencia en el desempeño del sistema de emisiones de escape.

Las variaciones en la composición química del gas a través de los países, o dentro de cada uno de ellos han sido documentadas.

Existen muchos trabajos sustanciales de los efectos de las variaciones de composición del gas natural en el desempeño y emisiones de motores y vehículos a gas natural. Algunos de los trabajos más importantes son:

- Liss and Trasher (1991) produjeron el primer estudio comprensivo de la variación de la composición química del gas natural en Estados Unidos y hallaron que las modificaciones en la composición química del gas natural podrían producir variaciones del 14% en el poder calorífico, 14 % en densidad ,20% en el índice de Wobbe y 25 % en la relación aire/ combustible
- Dubel et al, (1983) examinaron los efectos de la variación en la composición química del gas en el número de metano (MN) y en la optimización del desempeño del motor y encontraron que el número de metano da un indicio de la capacidad del combustible para lograr eficiencia aceptable dentro del avance de chispa limite al *Knock*
- Klimstra (1986) examinó las relaciones entre la composición química del gas y las propiedades de la mezcla sobre el efecto de la tasa de exceso de aire (ϕ), el poder calorífico, el índice de Wobbe y la sensibilidad al *Knock* Halló que una tasa de exceso de aire inmodificable es un prerrequisito cuando se intercambian dos combustibles gaseosos
- Boschan et al (1989) realizaron un estudio de los efectos de las variaciones en el número de metano del gas natural sobre el nivel de emisiones de NOx. El total de emisiones disminuyeron con el incremento del índice de Wobbe, quizás debido a las mayores reactividades de los hidrocarburos mas pesados, los cuales están presentes en combustibles de índice de Wobbe más altos.

2.1.2 ESTANDARES DE CALIDAD DEL GAS NATURAL PARA PROPOSITOS GENERALES

Para asegurar que el motor opere exitosamente con respecto al desempeño, las emisiones y la durabilidad, debe existir correspondencia entre la especificación del combustible de certificación, la especificación del combustible comercial y las especificaciones de los fabricantes de motores. Esto requiere que los tres conjuntos de especificaciones estén armonizados. Un ejemplo de correlación y armonización es el establecimiento de un límite mínimo para el azufre en el combustible de certificación y un límite máximo para el mismo valor en el combustible comercial y en la especificación del

fabricante para uso final.

Los estándares de calidad del gas natural para propósitos generales están basados en el criterio de utilización segura del gas natural en una amplia variedad de aplicaciones mientras se mantiene seguro su transporte a través del gasoducto. Las especificaciones definen el rango para el índice de Wobbe e identifican los rangos de composición de los constituyentes para entregar la utilización segura dentro de estándares de alto desempeño y eficiencia.

Estos estándares no reemplazan necesariamente los requeridos en motores y vehículos, los cuales operan dentro de rangos mucho más amplios de presión y temperatura que los convencionales para dispositivos de quemado del gas. Para ajustar los requerimientos del motor de GNV y sus aplicaciones en vehículos, se han establecido un número considerable de estándares internacionales, entre los que se tienen SAE J1616 (el más usado) e ISO 15403.

- ESTANDAR SAE J1616
 - CONTENIDO DE AGUA

La temperatura de rocío local del combustible debe estar definida como 5,6 °C menor que la temperatura de bulbo seco mas baja mensual a la máxima presión de operación del cilindro .El margen de 5,6 °C tiene la intención de permitir alguna expansión de enfriamiento cuando el gas fluye a través del sistema de combustible del vehículo.

Esta expansión conducirá a que la temperatura mayor disminuya más de 5,6 °C .Por lo tanto, El congelamiento en el sistema de combustible puede ocurrir si el gas combustible no esta lo suficientemente seco

- DIÓXIDO DE CARBONO

Dado que el ambiente corrosivo es controlado por la vía de la concentración limitada de agua, no hay límites requeridos en la concentración de CO₂ para este propósito. De otro modo, un limite de 3 % CO₂ en volumen es recomendado para ayudar a mantener la estequiometria

- COMPUESTOS DE AZUFRE

El contenido total de compuestos de sulfuro, que deben ser limitados de 8-30 ppm en masa para prevenir saturación excesiva del catalizador.

- METANOL

Ninguna cantidad de metanol debe ser agregada al gas natural en la estación de llenado .Este componente puede causar corrosión de los cilindros de gas natural y deterioro de las partes del sistema de combustible

- OXÍGENO

Dado que el ambiente corrosivo es controlado por la concentración limitada de agua, no

existen límites en la concentración de oxígeno para el control de la corrosión. De otro lado, el nivel de oxígeno no tiene que producir una mezcla dentro de los límites de inflamabilidad del gas natural.

- MATERIAL PARTICULADO

La concentración de material particulado debe ser minimizada para prevenir contaminación, obstrucción y erosión de los componentes del sistema de combustible. El combustible de GNC (Gas natural comprimido) entregado al vehículo debe tener material particulado cuyo tamaño sea menor o igual a 5 μm (micrómetros).

- CONTENIDO DE ACEITE

Datos adicionales son requeridos para determinar los niveles de aceite lubricante en los procedimientos de prueba estandarizados para cuantificar su contenido. Los niveles de aceite del compresor lubricado deben ser monitoreados y se deben instalar filtros coalescentes aguas abajo de la descarga del compresor para controlar el aceite.

- PRESIÓN A LA TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCÍO DEL HIDROCARBURO

La composición del gas natural debe ser tal que el volumen de almacenamiento gaseoso original forme menos del 1% de líquido condensado a las temperaturas ambiente mas bajas y a la presión de almacenamiento del gas entre 5,5 MPa y 8,3 MPa, a la cual la condensación máxima ocurre, dependiendo de la composición del gas.

- ODORIZANTE DEL GAS NATURAL

El gas natural introducido en alguna estación de llenado de GNC o vehículo debe tener un fuerte olor distintivo para que su presencia sea detectada bajo una concentración de aire de no más de 1/5 del límite de inflamabilidad inferior. Esto es aproximadamente 1% Vol. de gas en aire. En Colombia se usa el mercaptano como odorizante para el gas natural.

- ÍNDICE DE WOBBE

La variación del índice de Wobbe afecta generalmente a aquellos motores que no están equipados con controles de lazo cerrado. Es recomendado un rango de índice de Wobbe entre 48,5 y 52,9 MJ/m^3 . Además un rango entre 44,7 y 46,6 MJ/m^3 es aceptado para usar en motores operando con gas natural a diferentes alturas sobre el nivel del mar. El rango típico recomendado para el gas natural de Estados Unidos permitiría una máxima variación de la relación aire/ combustible de 13.7%, la cual es comparable con el rango de variación de la densidad del petróleo

- KNOCK

La resistencia del combustible a la autoignición es una de sus características fundamentales de cara a su utilización en MEP. Actualmente no existe un método reconocido para la determinación del número de octano del motor (MON: Motor Octane

Number y RON: Research Octane Number) del gas natural. Se resalta que los trabajos realizados por King (1991) y Kubesh (1992) muestran una correlación estrecha entre la tasa carbono/hidrogeno reactivo y el desempeño antiknock del MON.

2.1.3 CALIDAD DEL GAS RECOMENDADA POR LOS FABRICANTES DE MOTORES

Para asegurar que sus motores trabajen satisfactoriamente en su aplicación final, normalmente los fabricantes de motores requieren información de la composición del gas natural en el sitio de uso. Además, publican especificaciones del combustible recomendadas para guiar la intención de los usuarios. Las tablas 4 y 5 muestran la composición del combustible recomendada y las propiedades de un número de fabricantes de motores.

Tabla 4. Rangos de composición de gas recomendados por algunos fabricantes de motores (SAE, 2001 and Detroit Diesel Corporation, 1998)

Componente	Tolerancia	CAT(Dual) (%)	Cummins (%)	Deere (%)	Detroit (%)	Mack (%)
Metano	Mínimo	88,0	90,0		88,0	85,0
Etano	Máximo	6,0	4,0		6,0	11,0
C ₃ +	Máximo	3,0				
Propano	Máximo		1,7	5	1,7	9
C ₄ +	Máximo		0,7		0,3	
C ₆ +	Máximo	0,2				
Butano	Máximo			1		5
C ₂ + C ₃ + C ₄						11
Inertes(N ₂ , CO ₂)	Rango Máximo	1,5-4,5	3,0 total			2 3
Oxigeno	Máximo	1,0	0,5			
Hidrogeno	Máximo	0,1	0,1		0,1	
CO	Máximo	0,1	0,1			
Sulfuro	Máximo		0,001 en masa		22 ppm en masa	
Metanol	Máximo				0	
CO ₂ + N ₂ + O ₂	Máximo				4,5	

Tabla 5. Propiedades de combustión del gas recomendadas por algunos fabricantes de motores (SAE, 2001 and Detroit Diesel Corporation, 1998)

Propiedad	Tolerancia	CAT(Dual)	Cummins	Deere	Detroit	Mack
Índice Wobbe (MJ/m ³)	Rango		48,46-51,33		47,7-51,06	
MON	Mínimo			118	115	
MN	Mínimo		80 (Para motores estándar) 65 (para motores de tecnología plus)			
Poder calorífico inferior	Mínimo		43,7 MJ/kg para motores de tecnología plus	33,74 MJ/m ³		
Poder calorífico superior			36,3 MJ/m ³ Motores estándar			

2.1.4 EFECTOS DE LA CALIDAD DEL GAS NATURAL EN MOTORES Y VEHICULOS

- Hidrocarburos mas pesados

Algunos usos del gas deben agregar mezclas de propano/aire al gas natural durante periodos de demanda de este en aplicaciones estacionarias. El propano tiene una presión de vapor baja y si se presenta en cantidades significativas formara una fase liquida a elevadas presiones y bajas temperaturas. La variabilidad del combustible debido a la revaporización de este condensado a presión reducida de almacenamiento del cilindro puede llevar a dificultades en el control de la relación aire/combustible. Además, la presencia significativa de Hidrocarburos mas pesados en la mezcla de gas disminuye su resistencia al *Knock* y puede llevar a un daño potencial del motor.

- Aceite lubricante entregado por el compresor

Los aceites lubricantes a menudo están presentes en el gas natural en pequeñas trazas debido a que son transportados desde los compresores del gaseoducto. Este contenido puede elevarse dramáticamente en las estaciones de compresión y llenado del GNC.

Altos niveles de aceite lubricante que son absorbidos en la compresión del gas natural pueden seguidamente condensarse y crear problemas de operación del vehículo (por ejemplo, Aceite liquido recogido en los reguladores de presión del gas y en los cilindros de almacenamiento del vehículo).

- Composición del combustible y Control de la relación aire/ combustible (Stephenson, 1997)

La composición del gas natural puede tener un fuerte impacto en las características de operación de un motor de combustión interna.

El desempeño del motor, la eficiencia y las emisiones son dependientes de muchas variables, por ejemplo la relación de compresión del motor, el avance de la chispa, la recirculación del gas de escape (*EGR*: exhaust gas recirculation), las cargas del motor y por supuesto las propiedades del combustible. La tasa de equivalencia (ϕ) es una variable fundamental de operación del motor y define la eficiencia base y las características de emisión de escape del motor (La tasa de equivalencia es la razón de la tasa aire/ combustible actual a la tasa de equivalencia aire / combustible estequiometrica). Una mezcla con tasa de equivalencia menor que uno es pobre. Además, define el tipo de sistema de combustión y el método aplicable de control de emisión.

Los motores con mezclas estequiometricas trabajan con una tasa de equivalencia de 1, y en algunas aplicaciones cuentan predominantemente con tratamiento catalítico de tres vías para el control de emisiones y requieren control de mezcla preciso para obtener control simultaneo de emisiones de CO, HC y NO_x.

Los motores de gas natural de mezcla pobre (tasa de equivalencia menor de 0.75) obtienen bajos niveles de NO_x aun sin tener tratamiento posterior de escape, trabajan con temperaturas de combustión promedio más bajo que los motores de mezcla estequiometrica.

Dado que la tasa aire/ combustible estequiométrica cambia con la composición del combustible, la cantidad de combustible medido por el sistema de combustible puede ser afectada, cambiando la tasa de equivalencia al motor. Así, Los cambios en la composición del motor que inciden en la tasa de equivalencia modificaran el desempeño del motor y las emisiones, ya sea que esta es combustión de mezcla pobre o estequiométrica.

- Composición del combustible y resistencia al Knock

La resistencia al *Knock* de un combustible de motor se mide comúnmente en la escala de octano .El método de medición octano compara la diferencia en intensidad de *Knock* entre el combustible de prueba y el combustible de referencia de número de octano conocido.

Normalmente, la escala es usada para medir en los combustibles líquidos como la gasolina, pero no ha sido adaptado para usarlo en la medición de combustibles gaseosos. ASTM tiene un estándar para la medición del número de octano.

Los valores publicados del número de octano del metano son 120 o mayores y la gran mayoría de números de octano de los gases naturales estarían cerca 100 (mayor valor de la escala de octano normal). Para superar esta escasez de rango de la escala de octano, se desarrollo la escala de número de metano. Se usa el metano como el

combustible de referencia de resistencia al *Knock* y el hidrógeno como la referencia sensitiva al *Knock*. La desventaja del número de metano es la ausencia de familiaridad entre la industria automotriz.

En los combustibles usados para motores, el metano tiene la más alta resistencia al *Knock*. Se establece que a mas alto contenido de carbono mas baja es la resistencia al *Knock* (Kubesh, 1992). Este autor, estableció que el número de octano para gases disponibles en Estados Unidos estaba entre 115 y 130+. Los rangos de MON de Argentina y Malasia están entre 127-137 y 124-135 respectivamente.

Para asegurar que los motores a gas operen sin *Knock* en el servicio, los fabricantes especifican propiedades mínimas de resistencia al *Knock* del combustible (Ver Tabla 5).

Estudios de los efectos de las variaciones de composición del gas natural

2.2.1 Estudio estadounidense para vehículos de servicio pesado (1991)

La investigación fue realizada por El Instituto De investigación del Gas (Gas Research Institute)(Ryan et al, 1992).

El estudio tuvo como uno de sus objetivos la determinación de los efectos de la composición del gas natural en el desempeño y las emisiones. El motor de prueba tuvo una configuración similar a los cilindros del motor Cummins L10 .Para ello se diseñaron una serie de experimentos empleando un conjunto de seis mezclas típicas de gas natural (Ver Tabla 6) que fueron usadas para estudiar el desempeño y emisiones características de un motor de servicio pesado en condiciones de mezcla pobre y estequiométrica. Se destacan dichas composiciones

Por tener un rango de constituyentes de hidrocarburos así:

- Metano: 83,3-99,7%
- Etano: 0,28-7,8%
- Propano: 0,5-11,9%
- Butano: 0,3-0,6%
- Pentano: 0-0,2%.

Tabla 6. Matriz de prueba de seis gases naturales típicos (Ryan et al, 1992).

ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DE LA COMPOSICION QUIMICA DE LOS PRINCIPALES GASES NATURALES COLOMBIANOS SOBRE EL RENDIMIENTO DE LA CONVERSION Y EL DESEMPEÑO

GAS	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4	TIPO 5	TIPO 6
AFR	17,24	16,8	16,28	16,12	15,66	16,46
Metano	99,7	95	90,1	88,3	85	83,3
Etano	0,28	3,0	6,0	7,8	6,5	3,0
Propano	-----	0,5	0,7	1,2	3,0	11,9
Butano	-----	0,3	0,5	0,3	0,6	0,6
Pentano	-----	0,1	0,2	-----	0,2	0,2
CO ₂	-----	0,2	0,7	1,8	1,0	0,3
Nitrógeno	0,02	0,8	1,7	0,6	3,5	0,7
Hexano	-----	0,1	0,1	-----	0,2	-----

*= Relación aire / combustible estequiometrico Componentes de cada mezcla en % Vol.

Para estudiar los efectos de altas concentraciones de propano que pueden encontrarse en el gas natural en algunos periodos, se uso una matriz de prueba (Ver tabla 7) con los niveles de propano desde 0 hasta 40%.

Tabla 7. Matriz de prueba para altos niveles de etano y propano en metano (Ryan et al, 1992).

Número de prueba	Metano (%)	Etano (%)	Propano (%)
1	100	0	0
2	75	10	15
3	90	10	0
4	80	0	20
5	80	20	0
6	60	0	40
7	60	20	20
8	60	10	30

En la tabla 6 puede observarse que el desempeño y las emisiones fueron obtenidos para un rango de relaciones aire /combustible desde estequimetricas hasta las de mezcla pobre. Estos resultados indican que este parámetro fue el factor dominante en el control de las emisiones y el desempeño, seguidos por el avance de la chispa y el efecto químico del combustible en la combustión.

Otras conclusiones de los experimentos con las seis mezclas fueron:

- No hubo diferencias aparentes en las emisiones de NO_x entre las mezclas de gas y metano en la condición de mezcla pobre sin turboalimentación
- Existieron diferencias estadísticas significativas en las emisiones de NO_x entre los gases de prueba y metano bajo la condición de mezcla pobre turbocargado
- Las emisiones de NO_x de las mezclas de gas de prueba no fueron significativamente diferentes de las de metano en la condición de mezcla estequiométrica
- Las emisiones totales de inquemados para las mezclas de gas de todas las

condiciones de prueba no parecieron ser diferentes de las de metano. La composición de los inquemados de escape pareció estar directamente relacionado con la composición del combustible.

Como conclusión de este estudio, los autores establecen que la composición del combustible controla la relación aire/ combustible y la velocidad de la llama, así que, la composición química del gas tiene efectos significativos en el desempeño y las emisiones.

Estudio estadounidense de los efectos en las características de operación del motor (King, 1991)

Para este estudio se usaron cinco gases de prueba: Con metano 75,8-94,2%; etano 2,6-11,2%; propano 0,5-2,2%; butano 0,1-1,1% de una gran variedad de gases en Estados Unidos ; un gas de elevado contenido energético con alta cantidad de propano (3,75 %) y butano (2,1%); 2 gases comunes de mezcla propano /aire (propano hasta 28,7%) y gas de alto contenido de etano (11%).

La tabla 8 ilustra la magnitud del efecto de los cambios de composición química en las emisiones de un motor típico de mezcla pobre usados en este estudio, si se toma como base el gas A, es notable el fuerte impacto en las emisiones cuando se cambia de composición. Por ejemplo, ya que la tasa de equivalencia se incrementa desde 4,05% (de 0,680 hasta 0,708, al cambiar de gas A por gas E), las emisiones de NO_x se incrementaron en 73 % (pasan de 3,0 a 5,2g/hp-h). Similarmente, la tasa de equivalencia de 0,596 resulta de cambiar por gas D (cerca al límite inferior de inflamabilidad para la gran mayoría de sistemas de combustión), se concluye que incrementan en 800% los inquemados.

Tabla 8. Efecto de la composición del combustible de un motor de mezcla pobre. Los cinco gases representan el rango disponible de gases disponibles en EU, (King, 1991)

	Gas A (base)	Gas B	Gas C	Gas D	Gas E
Índice de Wobbe [MJ/m^3]	49,58	48,61	50,14	44,44	52,19
Rata de Equivalencia	0,680	0,664	0,688	0,596	0,708
%de Cambio en Rata de Equivalencia	despreciable	-2,42	1,17	-12,4	4,05
NO_x (g/hp-h)	3,0	2,1	3,6	0,4	5,2
THC(g/hp-h)	1,3	1,6	1,1	11,8	0,9
CO (g/hp-h)	1,5	1,6	1,4	2,9	1,3

Este estudio concluyo que:

· El efecto de la composición química del gas en la potencia del motor, la eficiencia y

las emisiones es pequeño a una tasa aire/ combustible constante. Los principales medios por los cuales la composición afecta la potencia del motor y las emisiones es a través de un cambio en el índice de Wobbe

- De un suministro de composición de gas en Estados Unidos, la mayor desviación en la tasa de equivalencia (ϕ) de la mediana fue 12,4% y la mayor desviación fue 6,3%. Para un motor de mezcla estequiométrica ajustado con un catalizador de tres vías, este sería un problema muy serio., así como una desviación del 0,5% en la tasa de equivalencia, mezcla rica o pobre, da como resultado una significativa reducción en la eficiencia del catalizador y altas emisiones de escape
- Las mezclas ricas son más propensas a la detonación que las mezclas pobres y los motores son diseñados típicamente con un pequeño margen de *Knock* para entregar un óptimo desempeño. Desafortunadamente, las composiciones de combustible que causan condiciones de enriquecimiento de la mezcla, han incrementado las cantidades de hidrocarburos pesados que disminuyen el número de octano (A su vez incrementa la posibilidad de ocurrencia de la detonación)
- Los motores de mezcla estequiométrica no experimentan el mismo exceso de potencia y problemas de detonación que los motores de mezcla pobre. La mayoría no están turbocargados y el empobrecimiento o enriquecimiento de la mezcla respecto de la estequiométrica ocasionan una pérdida de potencia. Las mezclas aire/ combustible estequiométricas son mas propensas a la detonación que las mezclas ricas o pobres debido a las mayores velocidades de propagación de la llama y mas altas temperaturas de combustión.

2.2.3 Estudio Europeo para vehículos ligeros (2001)

Recientemente, un programa de investigación colectivo fue realizado por Volkswagen, Daimler-Chrysler, Ruhrgas y Thyssengas para compilar información sobre el comportamiento y la operación de vehículos de gas natural disponibles en el mercado cuando se cambian las propiedades del gas (Schollmeyer et al, 2001)

Los gases de prueba usados fueron seleccionados para reflejar las propiedades de los gases naturales distribuidos en Europa. Los gases de prueba fueron cinco (5) composiciones de gas existentes, un gas natural con una mezcla propano/ aire y dos (2) mezclas combinadas en concordancia con el estándar alemán DIN EN 437 (Ver tabla 9).

Los rangos de constituyentes de hidrocarburos en porcentaje por volumen fueron: metano 69,49-97,09%, etano 0,63-8,44%, propano 0,21-11,77%, Butano 0,07-11,84%. Ellos cubrieron el rango entero de propiedades permitidas por el gas germano, asegurando que las principales propiedades del gas en Alemania y Europa fueran tenidas en cuenta.

El motor de prueba fue un motor a gasolina suministrado por Volkswagen y transformado a bicomcombustible gas/ gasolina. El sistema de conversión fue un sistema estequiométrico NECAM-MEGA, ajustado para gases de grupo H (alto poder calorífico) y L (bajo poder calorífico).

Tabla 9. Composición en % Volumen de gases de prueba usados en el estudio europeo (Schollmeyer et al, 2001)

GAS No.	Metan	Etano	Propano	Butano	Nitrógeno	Dióxido de Carbono	Oxígeno
1	86,30	8,44	2,15	0,63	0,94	1,36	-----
2	84,15	5,23	1,16	0,38	7,65	1,29	-----
3	97,09	0,88	0,26	0,09	1,41	0,12	0,12
4	84,32	3,46	0,63	0,22	9,66	1,49	-----
5	81,30	0,75	0,23	0,07	17,35	0,09	0,19
6	69,49	0,63	0,27	11,84	13,94	0,12	3,68
7	88,34	0,69	0,21	0,07	10,55	0,09	-----
8	77,67	7,72	11,77	0,61	0,79	1,28	0,01

Como conclusiones, los autores consideraron que los vehículos comerciales ligeros disponibles en el mercado alemán que operan con gas natural habían sido altamente flexibles a los cambios en las propiedades suministradas del gas. Ya que se usaron mapas de ignición, la economía del combustible y el correcto desempeño pueden ser mantenidos aún con cambios en las propiedades del gas. Dos mapas de ignición (para gases de grupo L y H) son suficientes para la correcta operación con todos los gases naturales disponibles en Europa.

Además, El estudio encontró que en general el sistema de control fue capaz de mantener la tasa aire / combustible dentro del rango requerido y las emisiones permanecieron en un nivel bajo aún cuando cambiaron las propiedades del gas.

Basado en los resultados del estudio, los autores consideraron que únicamente es necesario indicar de todas maneras cuando un gas es del grupo H o del grupo L para permitir la adaptación del motor a las propiedades del gas. Por ejemplo, El conductor puede transmitir esta información al sistema de control usando un interruptor en el tablero de control.

2.3 ESTANDARES DE CALIDAD DEL GAS NATURAL PARA COLOMBIA

El reglamento único de transporte del gas natural - RUT (resolución CREG No. 071 de 1999) ha definido en el numeral 6.3, calidad del gas, las especificaciones que debe cumplir este energético al ser entregado al transportador por el agente, en el punto de entrada del sistema de transporte y por el transportador en el punto de salida y las cuales se mencionan en la tabla 10 (CREG ,2003).

Tabla 10. Especificaciones de la calidad del gas natural transportado por gasoducto en Colombia (CREG,

2003)

ESPECIFICACIONES	Sistema Internacional	Sistema Inglés
Máximo poder calorífico bruto (GHV) (Nota 1)	42,8 MJ/m ³	1.150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico bruto (GHV) (Nota 1)	35,4 MJ/m ³	950 BTU/ft ³
Contenido líquido (Nota 2)	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H ₂ S máximo	6 mg/m ³	0,25 grano/100PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg/m ³	1,0 grano/100PCS
Contenido CO ₂ , máximo en % volumen	2%	2%
Contenido de N ₂ , máximo en % volumen	3	3
Contenido de inertes máximo en % volumen (Nota 3)	5%	5%
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0,1%	0,1%
Contenido de agua máximo	97 mg/m ³	6,0 Lb/MPCS
Temperatura de entrega máximo	49 °C	120°F
Temperatura de entrega mínimo	4,5 °C	40 °F
Contenido máximo de polvos y material en suspensión (Nota 4)	1,6 mg/m ³	0,7 grano/1000 pc

Nota 1: Todos los datos referidos a metro cúbico ó pie cúbico de gas se referencian a condiciones estándar.

Nota 2: El gas natural deberá entregarse con una calidad tal que no forme líquido, a las condiciones críticas de operación del sistema de transporte. **Nota 3:** Se considera como contenido de inertes la suma de los contenidos de CO₂, nitrógeno y oxígeno.

Nota 4: El máximo tamaño de las partículas debe ser 15 μ m (micrómetros).

Comparando las exigencias de la norma colombiana para la calidad del gas natural usado en aplicaciones vehiculares con respecto a los requerimientos de la norma internacional.SAE J1616 se observa que el contenido máximo en volumen de CO₂, azufre, y oxígeno cumplen los estándares requeridos. El intervalo para el índice de Wobbe no cumple los estándares internacionales exigidos.

Teniendo en cuenta las composiciones químicas de los gases naturales Guajira, y Cusiana (Ver tabla 1) y las exigencias de composición química recomendadas por los fabricantes de motores que operan con gas natural, se realiza la tabla 11. Dicha tabla muestra los gases naturales colombianos que cumplen las exigencias.

De la tabla 11 se observa que para la gran mayoría de fabricantes mencionados, la composición química del gas natural de Guajira cumple las exigencias requeridas. En pocos casos es posible utilizar gas natural de Cusiana.

Tabla 11 Tipo de gas natural colombiano que cumple las exigencias de calidad del gas exigidas por algunos fabricantes de motores

Componente	Tolerancia	CAT(Dual) (%)	Cummins (%)	Deere (%)	Detroit (%)	Mack (%)
Metano	Mínimo	Guajira	Guajira		Guajira	Guajira
Etano	Máximo	Guajira	Guajira		Guajira	Guajira y Cusiana
C ₃ + Propano	Máximo		Guajira	Guajira	Guajira	Guajira y Cusiana
C ₄ + C ₆ + Butano	Máximo			Guajira y Cusiana		Guajira y Cusiana
C ₂ +C ₃ +C ₄ Inértres(N ₂ , CO ₂)	Rango Máximo	Guajira y Cusiana	Guajira y Cusiana			Guajira y Cusiana
Oxigeno	Máximo	Guajira y Cusiana	Guajira y Cusiana			
Hidrogeno	Máximo	Guajira y Cusiana	Guajira y Cusiana		Guajira y Cusiana	
CO	Máximo	Guajira y Cusiana	Guajira y Cusiana			
Sulfuro	Máximo		Guajira y Cusiana		Guajira y Cusiana	
CO ₂ +N ₂ +O ₂	Máximo				Guajira	

CAPITULO 3

3.1 CONSIDERACIÓN TEÓRICA

Los motores a gas natural (encendidos por chispa MEP y encendidos por compresión MEC) presentan ventajas económicas y ambientales sobre sus similares a gasolina y diesel. Sin embargo, tienen factores limitantes para su desempeño mecánico (potencia, torque, presión media efectiva, consumo específico de combustible, entre otros), dado que algunos de los constituyentes del combustible usado (gas natural) afectan de manera considerable las etapas de desarrollo de la combustión y por ende, inciden sobre los parámetros de diseño y operación del motor.

El gas natural, debido a su elevado índice de metano tiene alta resistencia al autoencendido (por analogía con el número de octano representa la resistencia a la autoignición que tendría una mezcla equivalente metano (CH_4)-Hidrógeno H_2 en condiciones estequiométricas con aire), esto es conveniente debido a que el motor puede emplear relaciones de compresión superiores al de gasolina, pero exige además de un sistema de encendido con mayor energía, modificar la curva de avance del motor convencional.

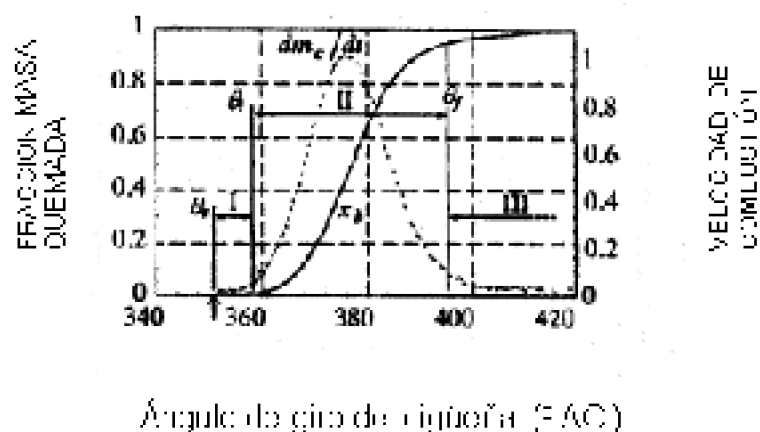
La fase inicial de la combustión del gas natural es endotérmica y tiene mayor duración (del orden del doble) que la correspondiente en los motores a gasolina, esto se

traduce en una mayor duración de la fase inicial de desarrollo de llama laminar (Yossefi, et al. 2000), por lo que si no se modifica el avance al encendido, puede producirse serios daños de fatiga térmica sobre la cámara de combustión (válvulas y sus guías, pistón y culata).

PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MEP A GAS NATURAL

El proceso de combustión usualmente se divide en tres etapas (Ver figura 2): fase inicial o período de desarrollo de la llama laminar, fase de desarrollo de llama turbulenta y período de enfriamiento en las paredes de la cámara de combustión.

El período de desarrollo de llama laminar, es la diferencia angular en grados de giro de cigüeñal que se da desde el momento en que salta la chispa hasta que inicia la combustión. Va desde α_s hasta α_i . Es tomado arbitrariamente como un porcentaje pequeño de la masa quemada que asegure que la liberación de calor sea significativa, lo que implica que se ha generado una reacción en cadena autosostenida en un medio turbulento.



I: salto de la chispa, II: desarrollo de la llama laminar, III: desarrollo de la llama turbulenta y III: Enfriamiento de la llama

Figura 2. Desarrollo de la combustión (Rousseau, et al, 1999)

Este período se ve afectado por la presión y la temperatura que exista en la cámara al momento del salto de la chispa, por la composición del combustible y por las características de la fuente de encendido. El exceso de aire tiene un efecto menor en su duración (Ver figura 3), al pasar de un 25 a un 70% de exceso de aire, sólo se incrementa en 2° el tiempo de retraso, Rosseau (Rosseau, et al 1999) manifiesta que el efecto es menor para avances de chispa bajos. Para la obtención de este resultado el autor utilizó el motor y la composición de gas natural que aparecen en las tablas 12 y 13 respectivamente.

Tabla 12. Características del motor (Rosseau, et al 1999)

Parámetro y/o componente	Característica
Tipo de motor	Seis (6) cilindros en línea, pistón tipo tazón

Parámetro y/o componente	Característica
	, encendido por chispa, cuatro (4) válvulas por cilindro y turbocargado
Volumen desplazado	17964 cm ³
Diámetro del pistón	152 mm
Longitud de la carrera	165 mm
Apertura de válvula de admisión	25 ° BTC
Cierre de válvula de admisión	45 ° ABC
Apertura de válvula de escape	60° BBC
Cierre de válvula de escape	15 ° ATC
Velocidad del motor	Estacionario 1500 RPM
Potencia nominal de salida	225 KW

Tabla 13. Características del gas natural usado en la prueba (Rosseau, et al 1999)

Componente	% Volumen
Metano	90,40
Etano	8,22
Propano	1,20
Iso – butano	0,01
n – butano	0,01
Nitrógeno	0,16
Woobe [MJ/m ³] (con 1013 mbar y 273 ° K)	52,26
Densidad [Kg/m ³]	0,784
Poder calorífico inferior [MJ/Kg]	

*
= con 1013 mbar y 273 ° K

Para el experimento el motor es turbocargado y la mezcla comprimida es enfriada por el refrigerante del bloque del motor. Esto impone una temperatura en el múltiple de admisión entre 70 y 75 ° C acorde con la carga. El exceso de aire es calculado con la concentración de O₂ (%) en el escape y el % O₂ en la tasa de flujo del gas natural.

La adquisición de datos se hace de dos formas: Se registran unos datos a una frecuencia de 1 Hz:

- La salida de potencia eléctrica
- La tasa de flujo y temperatura del refrigerante
- La temperatura y tasa de flujo del gas natural y del aire
- La temperatura y composición de los gases de escape

Adicionalmente, se registran otros datos a una frecuencia de 18 kHz correspondientes al punto medido cada 0,5 ° CA.

Estos datos son:

- El ángulo de giro del cigüeñal
- La presión en el cilindro
- La presión en el múltiple de admisión
- La presión en le múltiple de escape

La tabla 14 resume los errores de medida de la experimentación.

Tabla 14 Errores de medida en la experimentación (Rosseau, et al 1999)

Parámetro	Escala	Error relativo (%) (Escala completa)
Temperatura refrigerante (PT 100.)	0/200 ° C	1,0
Temperatura del gas (Termocúpla)	0/600 ° C	1,0
Tasa de flujo del refrigerante	0/50 m ³ /h	2,5
Tasa de flujo del aire	0/1340 kg/h	0,5
Tasa de flujo del gas natural	0/70 m ³ /h	0,5
Presión atmosférica *	600/1200 Pa	0,3
Presión en múltiples *	0/2,5 bar	0,3
Presión en el cilindro	0/200 bar	0,1
% O ₂	0/21 %	1,5
% CO ₂	0/16 %	1,5
% CO	0/2500 ppm	1,5
% NO _x , HC	0/5000 ppm	1,5

* = con 1013 mbar y 273 ° K

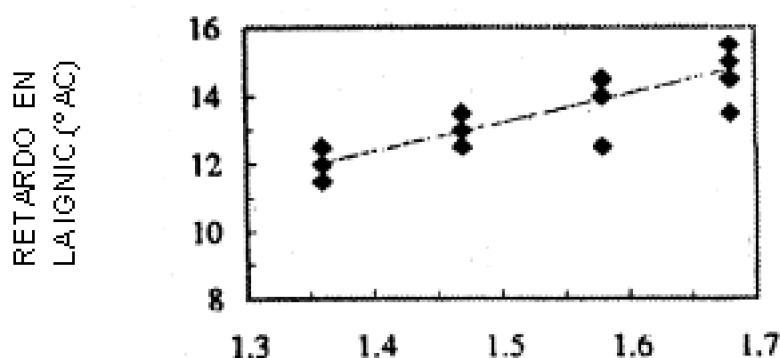
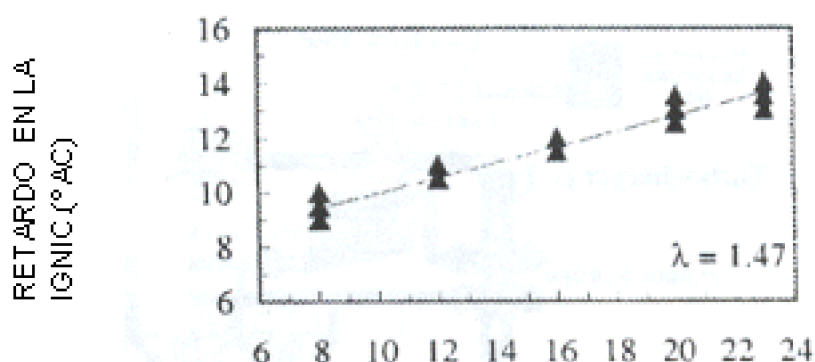


Figura 3. Efecto del exceso de aire en la duración de la fase inicial de desarrollo de llama laminar de 20° (Rosseau, et al 1999)

En la figura 4 se muestra el incremento del tiempo de duración de la fase inicial de la evolución de la llama laminar con el avance de la chispa.



Avance de la chispa (□BTC) Figura 4. Efecto del avance de la chispa en la duración de la fase inicial de desarrollo de llama laminar (Rousseau, et al, 1999)

El efecto de la composición del combustible es determinante en este período, el metano, principal componente del gas natural, debido a su estructura molecular tetraédrica con un hidrógeno en cada vértice, es mucho más estable que la gasolina, y por tanto es más difícil romperla. Las primeras etapas pos-ignición son endotérmicas, lo que hace que la cinética química de la reacción se ralentice en su inicio (Yoseffi, et al 2000). No obstante, en el período del desarrollo de la llama turbulenta su velocidad de deflagración es muy parecida a la gasolina (Heywood, 1988). Esta situación es la que hace indispensable el uso del avanzador de chispa en el sistema de conversión del motor, o una curva de avance diferente a la del motor a gasolina si el motor es dedicado o diseñado para gas natural.

Se ha observado que un sistema de avance inadecuado puede llegar a producir fatiga térmica sobre componentes de la cámara de combustión, especialmente en la válvula de escape y sus guías. Esta falla es común si se combina con el uso de un aceite lubricante no apropiado para gas natural, el cual no forma los depósitos de carbonilla típicos de la gasolina, que en gran medida amortiguan el golpe metal-metal que se produce entre la cara y el asiento de la válvula.

El período de desarrollo de la llama turbulenta, es prácticamente igual para la gasolina y el gas natural. Su valor máximo difiere en torno a 2 cm/s y se alcanza para condiciones de mezcla ligeramente rica (Heywood, 1988). En este período, a diferencia del anterior, la riqueza de la mezcla, afecta fuertemente la velocidad de propagación del frente de llama. En la figura 5 se observa cómo se frena el frente de llama cuando la mezcla se aleja de las condiciones propicias, de este modo, el mezclador juega un papel determinante. Se debe aclarar que es fundamental la selección del mezclador apropiado, pues una disminución en la velocidad del frente de llama no implica que este reduzca su temperatura. Este período depende fuertemente de la presión y la temperatura al interior de la cámara de combustión, es decir, del grado de carga al que opera el motor (Agudelo, et al 2001) y del nivel de turboalimentación que tenga el motor, caso este último más común en motores diseñados o convertidos exclusivamente para gas natural.

Obsérvese que el variador de avance, cuya influencia primordial es en el período de desarrollo de llama inicial, y el mezclador, cuya influencia primordial es en el período de desarrollo de la llama turbulenta, siendo dos elementos de bajo costo en un sistema de

conversión a gas natural, juegan un papel determinante sobre la durabilidad del motor. Una mala selección de este par de componentes puede provocar que salga un flujo de gases a temperatura muy elevada en el momento de la apertura de la válvula de escape. Esta es una posible explicación al dilema del por qué el gas natural produce fatiga térmica en motores teniendo una temperatura de llama adiabática menor que la gasolina (Huertas, 2001)

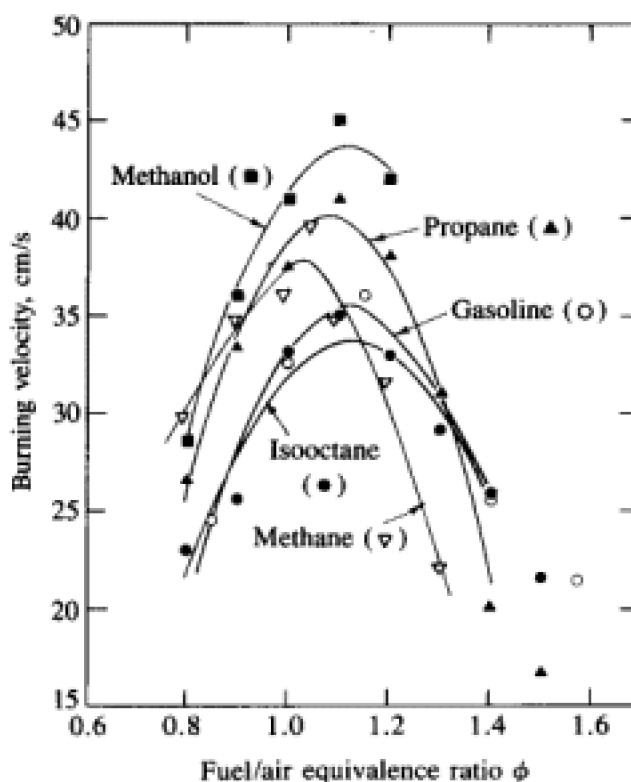


Figura 5. Velocidad de propagación de la llama en función del exceso de aire (Heywood, 1988)

La calidad de la mezcla influye adicionalmente sobre la energía de ignición como puede observarse en la figura 6. A medida que la mezcla se empobrece y la velocidad del aire en la admisión incrementa es más difícil encender la mezcla.

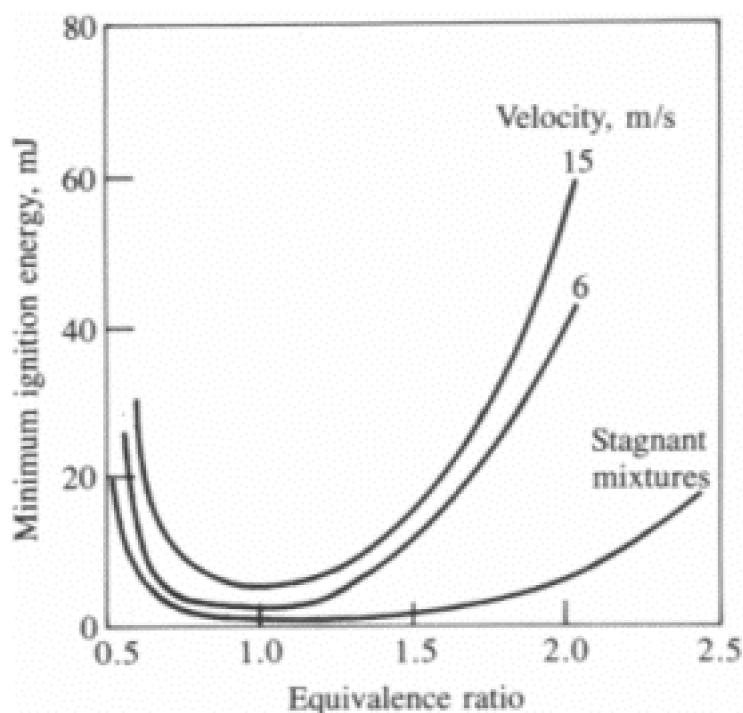


Figura 6. Energía de ignición del gas natural en función del exceso de aire (Heywood, 1988)

3.2 EFECTOS DE LA COMPOSICIÓN DEL GAS NATURAL (GN)

Para obtener resultados de interés se requiere la caracterización de las etapas iniciales de la combustión del GN. A continuación se presentan algunos de los resultados más relevantes (Yoseffi, et al 2000). Yoseffi, realiza un análisis del efecto de la composición del GN mediante un modelo matemático complejo que incluye paquetes informáticos avanzados para motores (KIVA III y ChemKin). Todos los resultados son arrojados por su modelo. Cabe resaltar, que al igual que sucede con la gasolina, es posible que el efecto de la composición del GN se vea atenuado por la deficiencia de oxígeno a medida que incrementa la altura sobre el nivel del mar.

Se estudiaron por separado el efecto del contenido de C_2H_6 y CO_2 sobre las etapas iniciales de la combustión de un motor, utilizando un programa basado en mecánica de fluidos computacional. Las simulaciones de referencia se hacen con base en la combustión de CH_4 en aire (con una relación molar de $3.76 N_2 / O_2$).

Las investigaciones se realizaron variando el contenido de C_2H_6 desde 0 % hasta 6% molar bajo quemado en condiciones estequiométricas y de mezclas pobres pero variando la energía de ignición. El efecto del CO_2 como parte del comburente fue valorado mediante el examen de la combustión de metano puro bajo condiciones

estequiométricas con CO_2 reemplazando parcialmente el N_2 en la mezcla Nitrógeno/Oxígeno. Las simulaciones fueron realizadas en un motor cuya geometría y condiciones de operación aparecen en la Tabla 15. Los detalles de la cámara de combustión se pueden observar en la figura 7.

Tabla 15. Especificaciones del motor usado para simulación (Yossefi, et al ,2000)

Diámetro del pistón	43,0 mm
Longitud de la carrera	55,5 mm
Volumen barrido	$8,06 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3$
Relación de compresión	11,6
Cabeza	Plana
Tipo de pistón	Tazón en el pistón
Velocidad del motor	1600 RPM
Combustible	Gas Natural
Relación de equivalencia	1,0
Inicio de la chispa	-30°

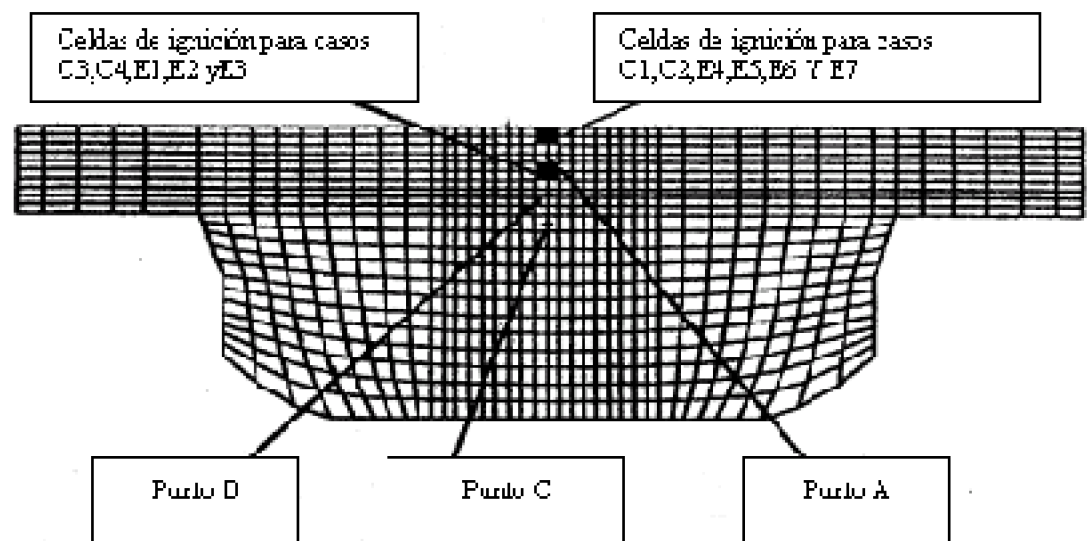


Figura 7. Cámara de combustión simétrica a través de la sección transversal vertical, mostrando la localización y geometría de las fuentes de ignición y la localización de los puntos A, B y C. (Yossefi, et al ,2000)

VARIACIONES DE COMPOSICIÓN EXAMINADAS

La composición química del combustible fue variada por dos vías, para dos grupos de pruebas bajo condiciones estequiométricas; incrementando la concentración de CO_2 en los gases de la atmósfera comburente a expensas del nitrógeno ó introduciendo C_2H_6 en el combustible. Lo anterior era de esperarse para reducir las temperaturas a causa de su capacidad calorífica molar mayor mientras que este último ha mostrado que incrementa las velocidades de quemado.

Se realizaron otras simulaciones posteriores bajo condiciones de mezcla pobre con un dosado relativo de 0,8 (25% de exceso de aire), variando la localización del punto de encendido de la mezcla. Esta fue ubicada en dos sitios: caso activo (en el sentido de flujo) y reposo, localizado cerca de la culata.

La figura 8 muestra esta situación donde las celdas C3, C4, E1, E2 y E3 son activas y las celdas C1, C2, E4, E5, E6 y E7 corresponden a la zona de reposo. En cada uno, la referencia de concentración para el C_2H_6 y el CO_2 es cero.

Todas las energías de ignición tuvieron que ser seleccionadas apropiadamente para prevenir mal encendido y en consecuencia energías mayores pueden ser usadas para fuentes dentro de la región de flujo activo más que en los casos de la región de reposo.

En la tabla 16 aparecen las características de los casos escogidos para el estudio, incluyendo las composiciones de la mezcla, tipo de bujía, localización, energía y duración en grados de giro de cigüeñal.

De la Tabla 16 se observa como tendencia, que en los casos E1, E2 y E3 (todos en la región activa) y con energías de ignición muy similares, a medida que se incrementa la cantidad de C_2H_6 añadido (0–6%) produce un aumento en la masa de combustible quemado (incrementa la velocidad de propagación) como puede observarse en la figura 8.

Tabla 16. Características de los casos examinados (Yossefi, et al ,2000)

Caso	C_2H_6 (% mol)*	CO_2 (%) +	ϕ **	E_{ig} ***	Ubicación	Duración****
E1	0	0	0,8	110	Activa	5
E2	3	0	0,8	105	Activa	5
E3	6	0	0,8	101	Activa	5
E4	0	0	1,0	18	Reposo	5
E5	28	0	1,0	18	Reposo	5
E6	0	0	1,0	9	Reposo	5
E7	28	0	1,0	9	Reposo	5
C1	0	1,0	1,0	18	Reposo	1
C2	0	15	1,0	18	Reposo	1
C3	0	1,0	1,0	215	Activa	5
C4	0	22	1,0	215	Activa	5

•El % mol, C_2H_6 , es el contenido de etano en el gas natural. ** Razón de equivalencia, ϕ = (Cantidad de combustible / Cantidad de aire). *** Energía de ignición, E_{ig} = mJ. **** Duración = Ángulo de giro del cigüeñal. + El % es cien veces la razón molar $\phi CO_2 / (CO_2 + N_2)$, en la mezcla (oxígeno/diluyente).

Ángulo de giro del cigüeñal (ϕ AC)Ç

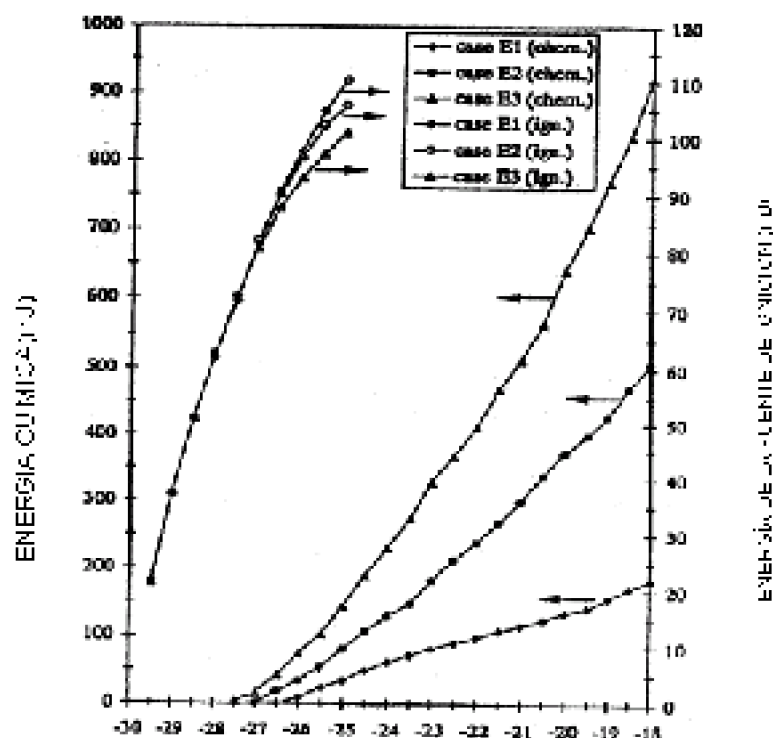


Figura 8. Energía de la fuente de ignición y liberación de calor vs ángulo del cigüeñal para diferentes concentraciones de C_2H_6 . Concentración de los casos E1, E2 y E3, todos con la fuente de ignición localizada en la región activa y $\phi = 0,8$ (25% exceso de aire)

Lo anterior muestra que las características de la fuente de ignición (energía y localización) son más importantes que grandes cambios en la composición del gas natural sobre la velocidad de quemado del combustible. Prueba de ello es que en condiciones estequiométricas una gran cantidad de C_2H_6 añadido (caso E5) produce más baja tasa de consumo de combustible.

3.3 VARIABLES DE OPERACIÓN QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO, LA EFICIENCIA Y LAS EMISIONES DEL

MOTOR ENCENDIDO POR CHISPA

Las variables de operación más destacadas que afectan el desempeño, las emisiones y la eficiencia de un motor ECH a una carga y velocidad dadas son (Heywood, 1988) :

- Tiempo de encendido
- Relación aire/combustible o combustible/aire a condiciones estequiométricas
- Fracción de gases de escape que son recirculados para el control de las emisiones de NO_x .

La carga es variada mediante el cambio de la presión del múltiple de admisión.

· TIEMPO DE ENCENDIDO

Si la combustión empieza muy rápido en el ciclo, el trabajo realizado por los gases sobre el pistón al final de la carrera de compresión es muy grande; si la combustión inicia muy tarde, la presión pico del cilindro es reducida y el trabajo en la carrera de expansión disminuye. Existe un tiempo de encendido que da el máximo Torque al motor a una velocidad, composición y rata de flujo fija. Este es denominado como MBT (tiempo de máximo torque al freno). Este tiempo entrega además, la potencia máxima al freno y el mínimo consumo específico de combustible.

En cada velocidad, cuando la chispa es avanzada desde un valor fijo inicial, el Torque se aumenta hasta un máximo y luego disminuye. El tiempo del MBT depende de la velocidad; si esta aumenta, la chispa tiene que ser adelantada para mantener óptimo el tiempo de encendido porque se incrementa la duración del proceso de combustión (ángulo del cigüeñal). Este tiempo también depende de la carga. Si la carga y la presión del múltiple de admisión disminuyen, el tiempo de encendido de la chispa debe ser adelantado para mantener óptimo el desempeño del motor. En la práctica, para permitir una definición mas precisa del tiempo de encendido de la chispa, esta es retrasada para dar 1 o 2 % de reducción del máximo valor del torque.

El tiempo de encendido de la chispa afecta la presión pico del cilindro y por lo tanto, las temperaturas pico de gases quemados y no quemados. retardando este tiempo desde el óptimo reduce estas variables. Además de permitir el control del NO_x , se puede controlar el Knock al reducir dicho lapso de tiempo.

La temperatura de escape se afecta por el tiempo de encendido de la chispa. Retardándolo desde su valor de MBT, se incrementa la temperatura de escape y se disminuyen la eficiencia del motor y las pérdidas de calor hacia las paredes de la cámara de combustión.

· COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA

La mezcla no quemada en el cilindro del motor consiste de combustible (normalmente vaporizado o en estado gaseoso), aire y gases quemados. La fracción de gas quemado es gas residual y algún escape recirculado usado para el control de NO . La composición de la mezcla es mas critica durante la combustión, ya que determina el desarrollo del

proceso de combustión que gobierna las características de operación del motor. En un cilindro dado, existen variaciones en carga promedio ciclo a ciclo. Además, dentro de cada cilindro en un motor, el combustible, el aire, el gas residual y el gas recirculado de escape (EGR) no están completamente mezclados que dan lugar a desuniformidades significativas. Esto unido a las variaciones producidas en la bujía (región crítica donde comienzan las etapas de combustión y que influyen en el desarrollo posterior de la misma).

Es necesario considerar el efecto de los cambios de composición química de la mezcla en la operación del motor y en las características de las emisiones en dos regímenes:

- Mariposa totalmente abierta (WOT) y plena carga
- Mariposa parcialmente abierta o carga parcial

En el primero de los casos, WOT, el flujo de aire es el máximo que el motor succiona. El flujo de combustible puede ser variado, pero el flujo de aire es fijado por las variables de diseño del motor y la velocidad. En el segundo caso, el flujo de aire, el flujo de combustible y el flujo de EGR pueden ser variados. La evaluación de los cambios de la mezcla a carga parcial debe ser realizada a carga y velocidad fijas.

· **KNOCK (Klimstra , 1986)**

Desde el punto de vista del bajo uso y alta disponibilidad se requiere que el proceso de liberación de calor en los cilindros del motor sea suave y progresivo. Sin embargo, bajo ciertas condiciones la mezcla no quemada puede exceder las condiciones de autoignición y liberar el calor instantáneamente que trae como resultado un alto valor de presión que puede dañar el motor.

La resistencia a la autoignición o al *Knock* de una mezcla de gas combustible y aire depende de: la composición del combustible, la relación aire/ combustible y de la temperatura de la mezcla no quemada. Toda causa que eleve la temperatura de la mezcla como: alta temperatura de entrada, alta temperatura de la chaqueta de agua, proceso avanzado de combustión y alta relación de compresión incrementan el riesgo de alcanzar el *Knock*.

Existe una clasificación de los combustibles gaseosos respecto a la resistencia al *Knock*. Tiene como base un parámetro denominado el número de metano (MN: Methane Number). Básicamente se identifica teniendo al metano como el combustible gaseoso de más alta resistencia al *Knock* y al cual se le asigna el valor de 100. El hidrógeno tiene la más baja resistencia al *Knock* y se le asigna el valor de 0. En mezclas binarias de hidrógeno y metano, el porcentaje volumétrico de metano iguala el número de metano de la Mezcla.

En otros tipos de mezclas de combustibles gaseosos, este parámetro puede ser determinado mediante la utilización de un motor de prueba y elevando su relación de compresión hasta que el *Knock* ocurra. Luego, se fijan los parámetros básicos del motor y el gas combustible de número de metano desconocido es reemplazado por una mezcla

de metano e hidrógeno, donde el porcentaje volumétrico de hidrógeno es incrementado hasta que ocurra la misma intensidad de *Knock* con el combustible probado.

El dióxido de carbono incrementa la resistencia al *Knock* de un combustible. De esta forma, el número de metano fue extendido hasta valores que exceden de 100 mediante la comparación de la resistencia al *Knock* de un combustible dado con una mezcla de metano y CO_2 . La figura 9 resume la definición del número de metano y la tabla 17 muestra el número de Metano de algunos gases combustibles.

Tabla 17. Número de metano de algunos gases combustibles (Klimstra , 1986)

GAS COMBUSTIBLE	NÚMERO DE METANO
Metano	100
Hidrogeno	0
Etano	44
Propano	32
Butano	8
Monóxido de Carbono	62
Biogás (40% CO_2)	140
GLP (40% Butano)	25
Gas Natural (Groningen)	89

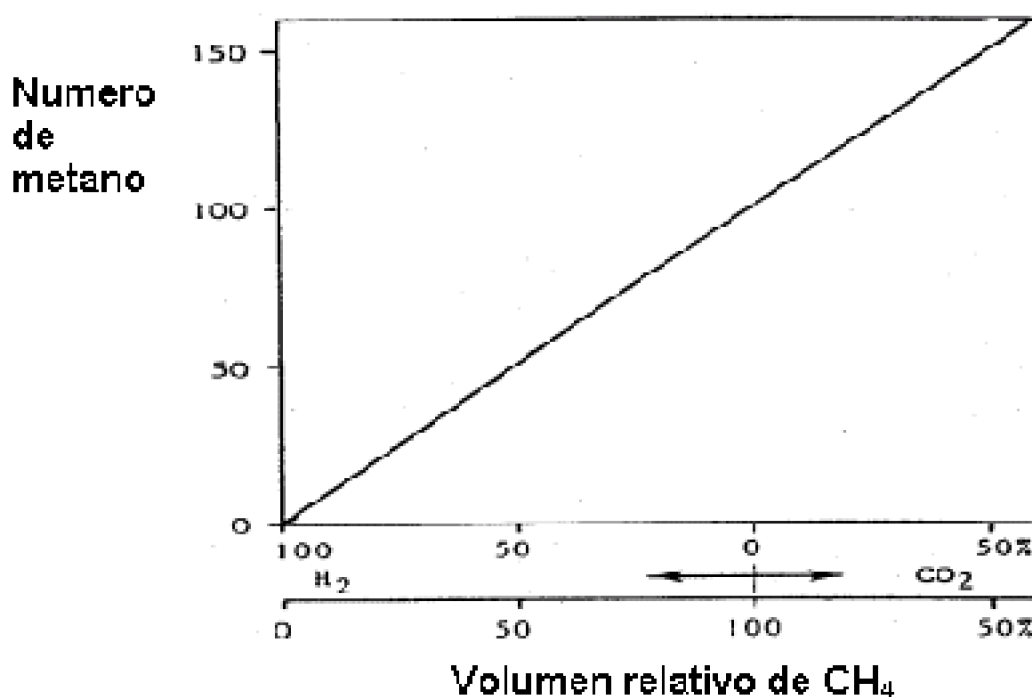


Figura 9. Definición de número de Metano (Klimstra , 1986)

La figura 9 muestra la eficacia del CO_2 y el N_2 como mecanismos para aumentar la resistencia al *Knock* del hidrógeno (Leiker, et al, 1971). Una mezcla de partes iguales de CO_2 e hidrógeno parece tener la misma resistencia al *Knock* del metano. nitrógeno es

menos efectivo que el CO_2 dado que una mezcla de 60% de N_2 y 40% H_2 tiene la misma resistencia al *Knock* del metano. Experimentalmente se ha determinado que una mezcla de 50% CO_2 y 50% CH_4 tiene un número de metano de 150 pero una mezcla de 50% N_2 y 50% CH_4 tiene un número de metano de 135. Desafortunadamente ninguna información experimental existe para determinar la cantidad requerida de CO_2 y N_2 necesarias para incrementar el número de metano de hidrocarburos mas pesados, tales como Propano y Butano.

La figura 10 permite determinar que para una mezcla de 33% de CO_2 y 67 % de propano y una mezcla de 41% de N_2 y 59% de propano tienen un número de metano de 100.

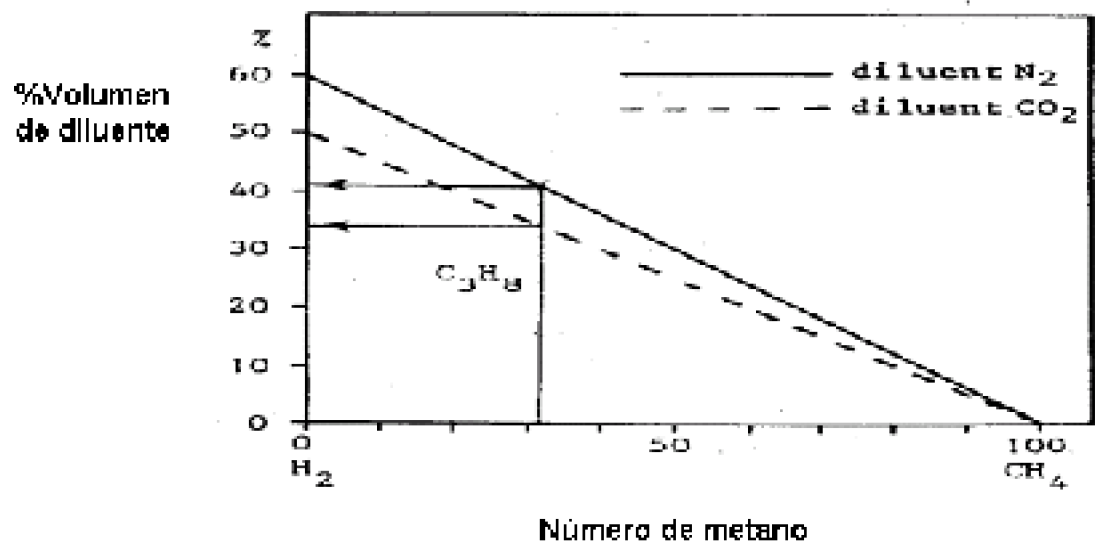


Figura 10. Cantidad requerida de CO_2 o N_2 para obtener un número de Metano de 100 (Klimstra, 1986)

3.4 EL INDICE DE WOBBE COMO CRITERIO DE CALIDAD DE UN COMBUSTIBLE

Tradicionalmente, el combustible es agregado a la corriente de entrada de aire al motor mediante el uso de un carburador (o mezclador en el caso de motores a gas) y utilizando el principio del ventury (Ver figura 11).

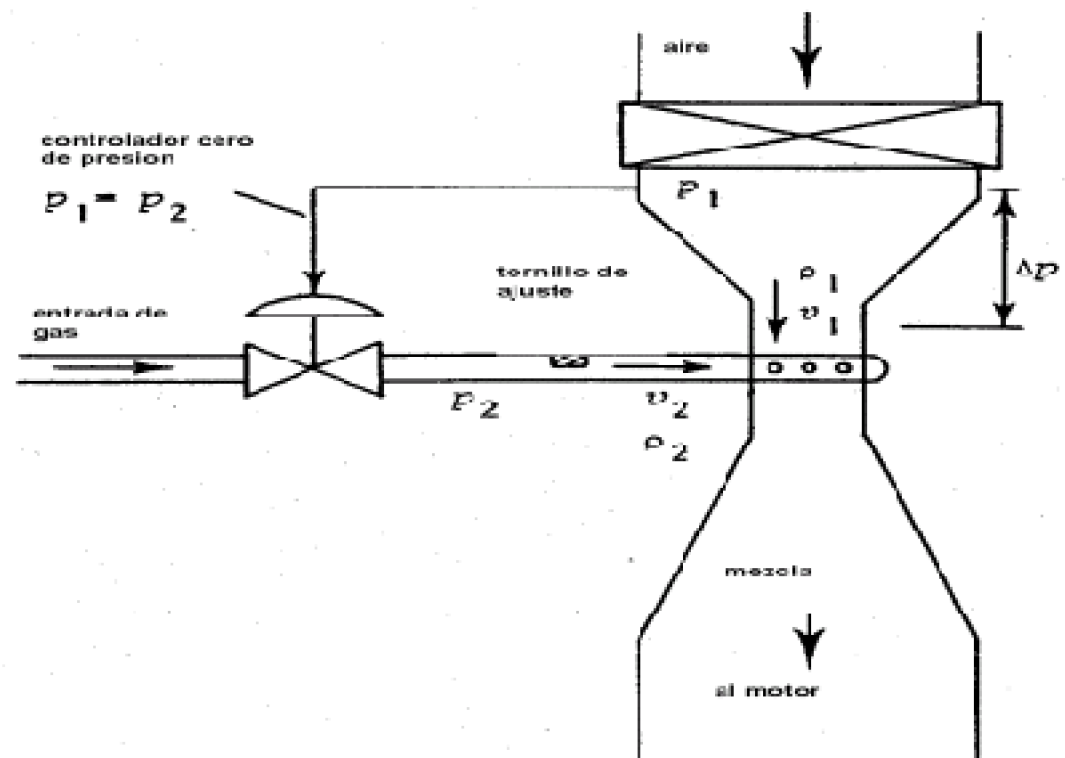


Figura 11. Principio del Ventury (Klimstra, 1986)

Se observa que la caída de presión Δp es creada debida a la vena contracta en la dirección de flujo. Este factor depende de la densidad del aire (ρ) y del cuadrado de la velocidad de flujo (v) en la garganta, así:

$$\Delta p = c_1 \rho_1 v_1^2 \quad (1)$$

Donde c_1 es una constante.

Cuando la presión estática del combustible aguas arriba del ajuste del tornillo iguala la presión aguas abajo del filtro de aire, la caída de presión Δp obliga a pasar el flujo de gas a través de la restricción con una velocidad definida (v_2) como:

$$v_2 = \sqrt{\frac{\Delta p}{c_2 \rho_2}} \quad (2)$$

Así, el flujo de energía que pasa el tornillo de ajuste a condiciones estándar (101.325 Kpa, 273.15 K) es:

$$P = c_3 H_i \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_2}} = c H_i \sqrt{\frac{\rho_{aire}}{\rho_{gas}}} v_1 \quad (3)$$

Teniendo en cuenta la definición del índice de Wobbe

$$Wo_i = H_i \sqrt{\frac{\rho_{aire}}{\rho_{gas}}} = \frac{H_i}{\sqrt{d}} \quad (4)$$

Donde d es la densidad relativa del gas y el índice de Wobbe es determinado a condiciones estándar. Teniendo en cuenta las ecuaciones 3 y 4 se llega a :

$$P = c Wo_i \quad (5)$$

Esta última ecuación permite establecer que si la velocidad de entrada de aire permanece constante, la energía suministrada al motor permanece constante.

Si el índice de Wobbe varia, la entrada de energía químicamente almacenada varía directamente proporcional al índice de Wobbe. Se requiere una cantidad mínima de aire para liberar cierta cantidad de combustible (esta cantidad de aire se le llama aire estequiométrico). Esta cantidad permanece constante independiente de la composición de combustible si las condiciones de la combustión se realizan estequiométricamente. Entonces, cuando el flujo de aire al motor es constante y el índice de Wobbe varia, la tasa aire/combustible $\propto$ cambiara inversamente proporcional al índice de Wobbe.

Se puede establecer la tasa:

$$\lambda (nuevo) = \frac{Wo(original)}{Wo(nuevo)} \lambda (original) \quad (6)$$

Los cambios en el índice de Wobbe y su incidencia en la respuesta del motor

El mayor cambio en las propiedades de la mezcla debido a las variaciones del índice de Wobbe se refiere a la tasa aire/ combustible. Esta relación afecta la velocidad de combustión, la resistencia al *Knock*, el consumo específico de combustible y la capacidad de potencia³. Cuando un motor a gas ha sido trabajado a una tasa aire /combustible de 1,0 con GLP (gas licuado de petróleo) con 60% Propano y 40% Butano y al motor se le suministra GLP (con 90% Propano y 10% Butano), el índice de Wobbe cambia de 79,2 a 75,8 MJ/m³. Como consecuencia la nueva relación aire/ combustible será 1,04. Esto no es realmente dramático, dado que el consumo específico de combustible del motor es 2% mas bajo debido a la mejor eficiencia con mezcla pobre.

No obstante, el flujo volumétrico de combustible es 7% más alto con la nueva mezcla debido a su más bajo poder calorífico volumétrico. La capacidad de potencia será severamente 2% mas baja pero tendrá una mayor producción de NO_x. Si el cambio es en sentido contrario con el motor ajustado originalmente con GLP con 10% de butano, el mas alto índice de Wobbe de la nueva mezcla hace que la tasa aire /combustible disminuya a 0,96, incrementando el consumo de combustible en 3% y aumentando la

³ la capacidad de potencia de un motor esta referido al volumen barrido en el cilindro, la velocidad de trabajo y la eficiencia volumétrica. Así como las propiedades de la mezcla combustible y la eficiencia de conversión de energía.

producción de CO. La figura 12 ilustra esta situación.

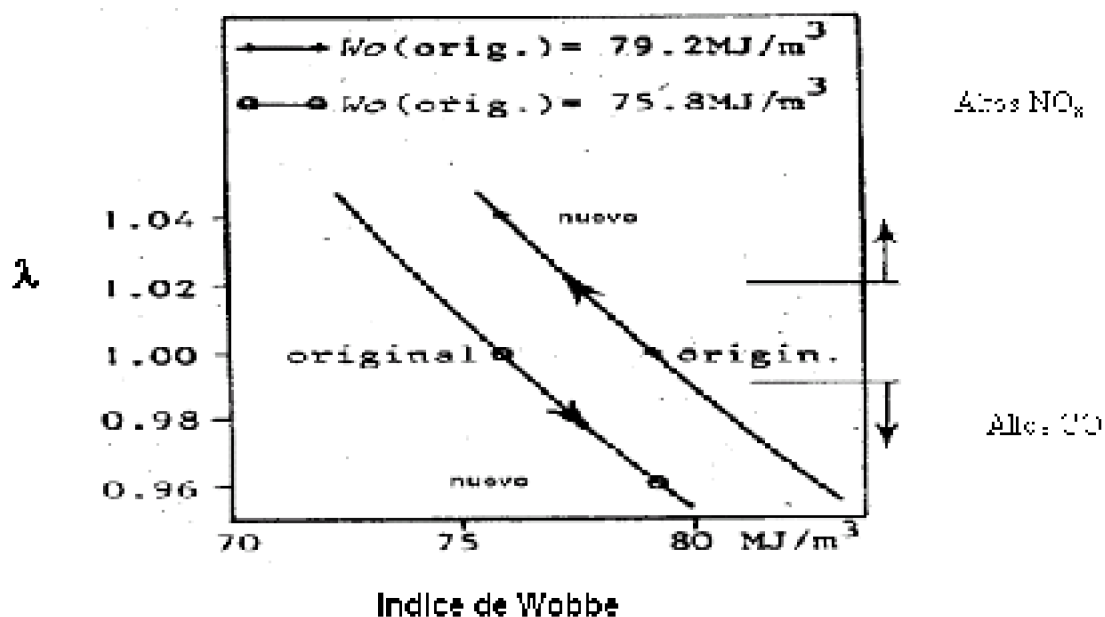


Figura 12. Efecto de las variaciones en la comp. GLP en λ (Klimstra, 1986)

Muchas aplicaciones incluyen este análisis, tal es el caso de algunas instalaciones de cogeneración que están equipadas con facilidades para trabajar con combustible de respaldo. Cuando se usa Biogás o gas de relleno como combustible primario, el gas natural sirve como combustible de respaldo. Para unidades que normalmente operan con gas natural, el propano es utilizado para situaciones críticas. Sin embargo, pasando a trabajar de biogás a gas natural en condiciones estequiométricas, da como resultado un mal encendido debido al uso de la mezcla excesivamente rica (Ver figura 13).

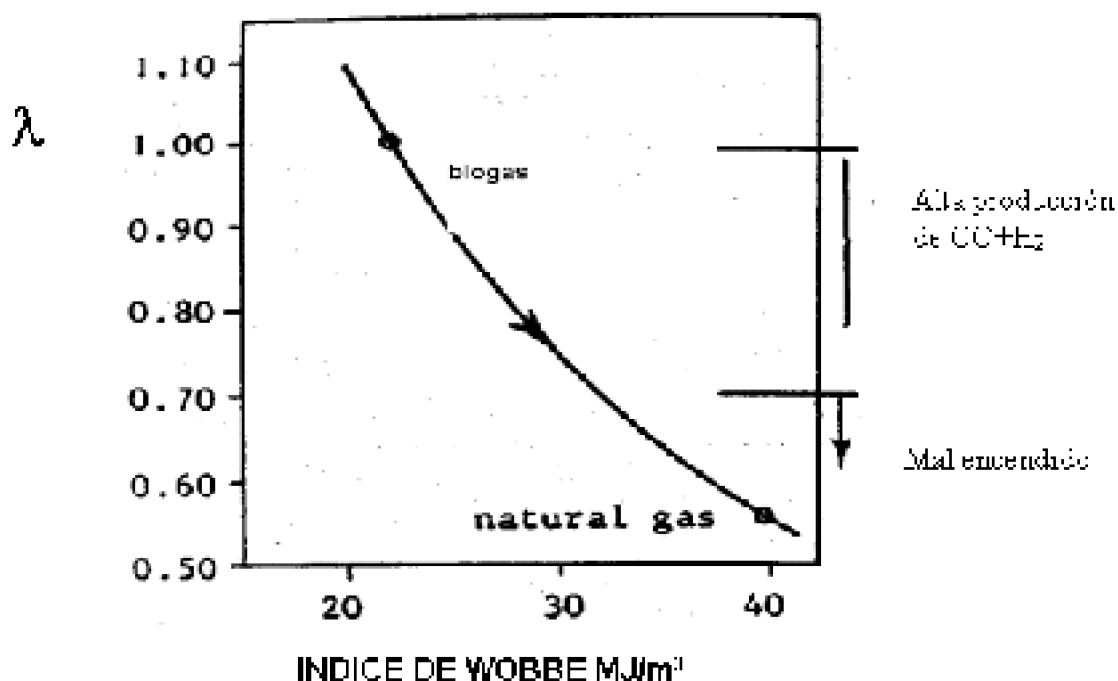


Figura 13. Efecto del cambio de biogás a gas natural en Wo. (Klimstra, 1986)

En estos casos se requiere un sistema de control para la tasa aire/ combustible o un sensor de oxígeno.

Peores consecuencias (llevando inclusive a la destrucción) pueden ocurrir cuando teniendo un motor diseñado intencionalmente para mezclas muy pobres ($\lambda \approx 1,45$) con gas natural como combustible primario, para entregar baja producción de NO_x y mínimo uso térmico se cambia el combustible por etano, resultando en una mezcla muy rica y trayendo como resultados: incremento de la velocidad de combustión, disminución de la resistencia al *knock* y severa sobrecarga térmica. La única ventaja es el incremento en la capacidad de potencia pero acompañado de sobrecarga mecánica. La figura 14 describe esta situación.

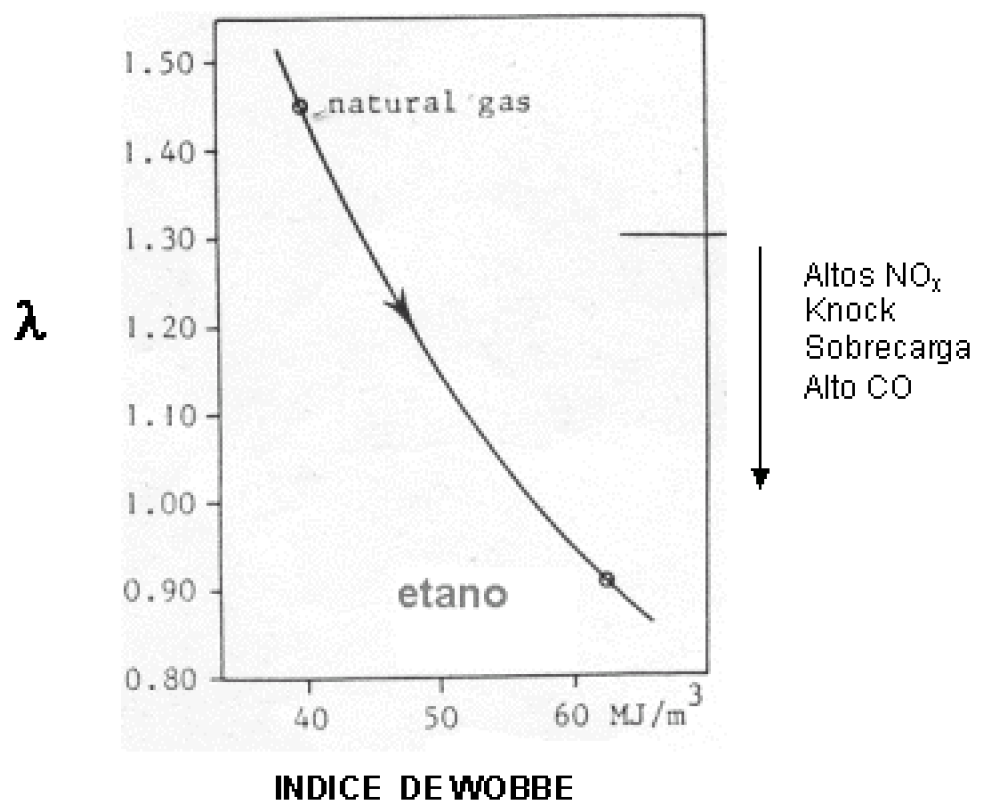


Figura 14. Tasa aire/ combustible vs .índice de Wobbe para un motor que pasa de operar con gas natural a etano (Klimstra, 1986)

Con respecto a las variaciones aceptables en el índice de Wobbe, es importante incluir condiciones prácticas de operación de motores. El consumo específico de combustible es un importante aspecto y económicamente menos atractivo que las tasas aire/ combustible deben ser inducidas para cambios en el índice de Wobbe.

De otro modo, las condiciones atmosféricas influyen en el análisis anterior si el motor opera a condiciones diferentes a las del nivel del mar (101,325 Kpa y 273,15 K). Diferencias en la temperatura entre el aire de combustión y el gas entregan diferentes tasas aire/ combustible. Cuando se fija la temperatura del gas, la tasa aire/ combustible varía inversamente a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta del aire, así:

$$\lambda (\text{nuevo}) = \lambda (\text{original}) \sqrt{\frac{T(\text{original})}{T(\text{nuevo})}} \quad (7)$$

Una diferencia de 30 K en la temperatura del aire puede desviar en 5 % la tasa aire/combustible.

Los cambios en la presión atmosférica influyen en la capacidad de potencia, pero la tasa aire/combustible permanecerá constante si el sistema de control de la relación funciona adecuadamente. Otros cambios en el desempeño del motor pueden resultar de cambios en la humedad del aire, pero esto no excederá en 1 % el consumo de combustible y la capacidad de potencia. Generalmente, la variación permitida de 1 % en el índice de Wobbe del gas natural no inducirá variaciones en el desempeño que excedan las que ocurran debido a los cambios normales de las condiciones atmosféricas.

INTERCAMBIABILIDAD DE GASES COMBUSTIBLES

Un concepto idealizado de intercambiabilidad es el siguiente: dos gases son perfectamente intercambiables si al reemplazar el uno por el otro, las características de operación del aparato doméstico, comercial o industrial no se modifican. Esta definición implica que para alcanzar una intercambiabilidad perfecta, los gases deben tener composición química idéntica, cuestión que en la práctica resulta imposible.

Una definición más práctica, es la intercambiabilidad aproximada, la cual admite la utilización de gases de composición diferente en un aparato, siempre que este opere, en un rango satisfactorio. (Amell, et al, 1998)

Análisis comparativo teórico de los gases naturales de Guajira, Cusiana y Apiay

Para establecer la intercambiabilidad de los principales gases naturales colombianos en el sector vehicular es necesario conocer sus composiciones químicas y principales propiedades de combustión. En la tabla 18 aparecen las composiciones químicas de los gases de prueba para determinar teóricamente su intercambiabilidad

Tabla 18. Composición de los Gases de experimentación (%Vol)

Componente	Guajira ²	Cusiana ²	Gas preparado ¹
Metano	97,76	76,55	76,35
Etano	0,38	10,86	11,77
Propano	0,2	5,36	5,36
i-Butano	0	0,68	0
n-Butano	0	0,78	3,2
Otros pesados	0	0,26	0
Nitrógeno	1,29	0,44	1,32
Dióxido de Carb.	0,37	5,07	2,0
Total	100	100	100

ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DE LA COMPOSICION QUIMICA DE LOS PRINCIPALES GASES NATURALES COLOMBIANOS SOBRE EL RENDIMIENTO DE LA CONVERSION Y EL DESEMPEÑO

¹ La referencia de "Gas preparado" fue entregado por AGA-FANO el día 06/05/03, lote 14553 y serial 93294.

² La composición química de los gases naturales de Guajira y Cusiana son extractadas de la tabla 1.

En las tablas 19 y 20 se encuentran las propiedades fundamentales de combustión para los dos gases referidos anteriormente (tanto másicas como volumétricas) que fueron calculadas Mediante la utilización del software Propiedades de Combustión del Grupo Ciencia y Tecnología del Gas de la Universidad de Antioquia.

Tabla 19. Propiedades de combustión de los gases de experimentación (volumétricas)

Gas	D	Va	PCS (MJ/st)	PCI (MJ/st)	W (MJ/rn)	LSI	LII	V _{f_o} ⁱ	V _{f_o}
Guajira	0,567	9,44	37,34	33,58	49,61	15,14	5,06	10,43	8,46
Cusian	0,734	11,04	47,71	41,42	55,69	14,54	4,42	12,12	9,99
A	0,734	11,49	45,73	41,43	53,37	ND	ND	12,65	10,40

Tabla 19. Propiedades de combustión de los gases de experimentación (Continuación)

Gas	VCO ₂	VH ₂ O	VN ₂	□ CO ₂	%CO ₂ (hh)	%H ₂ O(hh)	% N ₂ (hh)
Guajira	0,995	1,975	7,47	11,76	9,53	18,92	71,55
Cusiana	1,252	2,232	8,73	12,53	10,33	17,59	72,08
A	1,307	2,25	ND	12,57	ND	ND	ND

Tabla 20. Propiedades de combustión (másicas)

GAS	d	m _a	PCS(MJ/Kg)	PCI(MJ/Kg)	mf ⁱ (hh)	mf (hh)
Guajira	0,567	16,63	54,07	48,77	17,56	15,40
Cusiana	0,734	14,72	48,60	44,19	15,57	13,76
A	0,734	15,69	50,65	45,98	16,52	14,70

- Factor de equivalencia en la sustitución de los Gases Naturales Colombianos Guajira y Cusiana (Agudelo, et al, 2002)

La energía primaria que entra al motor está definida por la cantidad de combustible consumido y su poder calorífico superior. Sólo una fracción de esa energía se convierte en trabajo útil para la tracción en el eje del motor, debido a que se presentan las siguientes pérdidas:

- Calor latente de vaporización del agua (En los productos de la combustión de un hidrocarburo, se forma vapor de agua cuya energía no se puede recuperar)
- El calor sensible de los gases de escape a alta temperatura que salen del motor (no

recuperable completamente)

- De energía por combustión incompleta
- El calor transferido al agua de refrigeración
- Por convección y radiación que sucede a alta temperatura en el motor

Dado lo anterior, puede decirse que el rendimiento de conversión de combustible η_m en el motor puede definirse como:

$$\eta_m = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{térmica}}} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{térmica}}} \quad (8)$$

Si la energía térmica ($E_{\text{térmica}}$) está definida por el producto de la cantidad de combustible (Volumétrico o másico) en la unidad de tiempo que consume el motor y su poder calorífico inferior, PCI, (Volumétrico o másico).

La energía útil ($E_{\text{útil}}$), disponible en el eje del motor, se emplea para realizar la tracción en el vehículo necesaria para :

- Arrastrar el peso del vehículo
- Vencer las pérdidas por fricción de rodadura entre las llantas y la superficie de la carretera (Es función del peso del vehículo y de la inclinación de la carretera)
- Vencer las pérdidas por resistencia aerodinámica(Función de la velocidad, área frontal del vehículo y la densidad del aire)
- Fuerza de aceleración debida a cambios de velocidad del vehículo.

En la figura 15 se muestra la secuencia de conversión de energía en

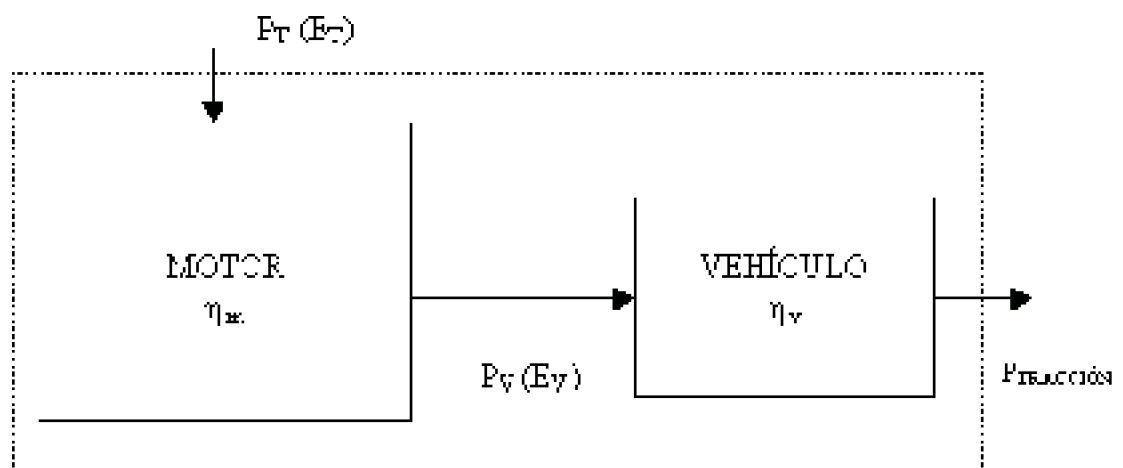


Figura 15. Balance global de energía en el sistema motor-vehículo (Agudelo, et al, 2002)

El sistema motor-vehículo. En la figura 15, P_T : Potencia térmica, E_T : Energía

térmica, P_V : Potencia útil en el eje del vehículo, E_V : Energía útil en el eje del vehículo, PTRACCION : Potencia resultante de tracción

La tabla 21 muestra los rendimientos de conversión de energía en el motor, en el vehículo y en el sistema global.

Rendimiento del motor	Rendimiento del vehículo	Rendimiento global
(η_m)	(η_v)	(η_{global})
$\eta_m = \frac{E'_{vehículo}}{E_{combustible}}$	$\eta_v = \frac{E'_{tracción}}{E_{vehículo}}$	$\eta_{global} = \frac{E'_{tracción}}{E_{combustible}}$

Tabla 21. Rendimientos de conversión de energía en el motor, en el vehículo y en el sistema global

Para encontrar el factor de equivalencia gasolina-gas es necesario suponer:

El peso del cilindro de gas incrementa aproximadamente en 8% la fuerza de tracción del vehículo

Igual distancia recorrida por ambos combustibles

Velocidad constante

Despreciable la fuerza aerodinámica (comparada con las fuerzas inerciales y de fricción), dado que sólo es notoria a partir de 100 Km/h. Situación poco probable en las ciudades colombianas

Teniendo en cuenta lo anterior se puede deducir:

$$E_{tracción GN} = 1,08 E_{tracción Gasolina} \quad (9)$$

De la tabla 21 se puede afirmar:

$$\eta_{global GNC} = \frac{E'_{tracción GNC}}{E_{combustible GNC}} \quad (10) \quad \vee \quad \eta_{global Gasolina} = \frac{E'_{tracción Gasolina}}{E_{combustible Gasolina}} \quad (11)$$

Que conduce a la relación:

$$\frac{Volumen_{GNC}}{Volumen_{Gasolina}} = 1,08 \frac{\eta_{global Gasolina}}{\eta_{global GNC}} \frac{PCI_{gasolina}}{PCI_{GNC}} \quad (12)$$

El rendimiento global para ambos casos depende del rendimiento de la conversión de combustible en el motor. Según Mitzlaff (Mitzlaff, 1988) , el motor gana en alrededor de 10% de rendimiento cuando opera con GNC. La razón básica es la homogeneidad en la formación de la mezcla y sencillez de la molécula de metano. Considerando que la eficiencia global es función únicamente de la eficiencia del motor, puede establecerse el factor $\square$.

Donde:

$\square$ = Factor peso de cilindros * relación eficiencias del motor = $1,08 \cdot 0,9 = 0,972$.

Retomando la ecuación 12, se llega a:

$$\frac{Volumen_{GNC}}{Volumen_{Gasolina}} = \Omega \frac{PCI_{gasolina}}{PCI_{GNC}} \quad (13)$$

La tabla 22 muestra los factores de equivalencia, $\square$, que se obtienen con diferentes gases naturales colombianos.

Tabla 22. Factores de equivalencia energética (Agudelo, et al, 2002)

Campo	PCI (MJ/m ³ _{st})	V _{GNC} / V _{Gasolina}	Variación (%)
Apiay	37,63	3,15	9,2
Guajira	35,43	3,34	14,37
Cusiana	41,42	2,86	0,00

En los cálculos anteriores se supone que el PCI de la gasolina permanece constante en 122 MJ / galón. Se interpretan dichos resultados así: Para sustituir la energía que entrega 1 galón de gasolina con un PCI de 122 MJ / galón se requieren 3,34 m³_{st} de gas de Guajira, 3,15 m³_{st} de gas de Apiay y 2,86 m³_{st} de gas de Cusiana.

La aplicación de este modelo a tres gases naturales colombianos muestra que se obtendría un rendimiento 14,37 % mayor (Más kilómetros recorridos con el mismo volumen de combustible) con el gas natural de Cusiana que con el gas natural de la Guajira y un 9,2% más de rendimiento que con el gas natural de Apiay.

3.5 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL GAS NATURAL EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y AMBIENTAL

· Índice de Wobbe

De la tabla 19 se pueden obtener los índices de Wobbe inferiores (Wi) de los gases de Guajira y gas de referencia que permiten hacer un análisis teórico del comportamiento mecánico y ambiental de un motor convertido a gas cuando se pasa de operar de gas de Guajira a gas de Cusiana. Luego:

$$W_{GUAJIRA} = \frac{PCI_{GUAJIRA}}{\sqrt{d_{GUAJIRA}}} = \frac{33,58 MJ / m^3_{st}}{\sqrt{0,567}} = 44,59 MJ / m^3_{st} \quad (14)$$

$$W_{CUSIANA} = \frac{PCI_{CUSIANA}}{\sqrt{d_{CUSIANA}}} = \frac{41,43 MJ / m^3_{st}}{\sqrt{0,734}} = 48,35 MJ / m^3_{st} \quad (15)$$

De las ecuaciones (14) y (15) se puede establecer el % variación como:

$$\% \text{ Variación} = \frac{W_{CUSIANA} - W_{GUAJIRA}}{W_{CUSIANA}} * 100\% = 7,8\% \quad (16)$$

Las variaciones en la composición del combustible gaseoso puede afectar el nivel de emisiones. El efecto primario es debido a las variaciones del índice de Wobbe, que puede incidir directamente la tasa aire/ combustible y por lo tanto las emisiones. De las observaciones de la figura 11 y la ecuación (6) de tal forma que se cumple:

$$\lambda(\text{Combustible}) = \frac{W_{ob}(\text{Guajira})}{W_{ob}(\text{Cusiana})} \quad \lambda(\text{Guajira}) = \frac{44,59}{48,35} * 1,074124 = 0,9222 * \lambda_{GUAJIRA} \quad (17)$$

Implica que la tasa aire / combustible es menor cuando se pasa de operar con gas de Guajira a Gas de Cusiana, pero con un aumento del nivel de emisiones de CO. Par evitar ello, se debe instalar un sistema de control de lazo cerrado (incluye Hardware y software) que permita mantener constante la tasa aire/ combustible. Si el motor opera con $\lambda_{GUAJIRA} = 1,0$ (mezcla estequiométrica) al pasar a operar con gas de Cusiana, $\lambda = 0,92$. (mezcla rica) aumenta el consumo específico de combustible y la producción de CO.

Otras características que pueden ocurrir en este cambio (Acevedo, et al, 2003) son :

- El incremento de la velocidad de propagación de la combustión (debido al mayor contenido de etano del gas natural de Cusiana)
- La reducción del tiempo de duración de la fase inicial de desarrollo de la llama laminar (debido al aumento en el contenido de etano)
- La disminución de la resistencia al *knock* (debido a la disminución del contenido de metano en la mezcla aire /combustible cuando opera con Cusiana)
- Mayor sobrecarga térmica y mecánica del motor (debidas al mayor contenido energético volumétrico de la mezcla aire/combustible que entra a los cilindros cuando opera con Cusiana)
- El aumento en el contenido de CO₂ (característica del gas natural de Cusiana) en el combustible hace que actúe como diluyente reemplazando el nitrógeno y bajando las tasas de reacción y las tasas de liberación de calor trayendo como consecuencia la

disminución en la velocidad de propagación de la llama. Esto es debido al incremento en la capacidad calorífica molar de las mezclas en comparación con el aire, la influencia llega a ser más pronunciada a altas temperaturas. También el CO_2 es un reactivo en algunos pasos del mecanismo de reacción química y es generalmente endotérmico.

CAPITULO 4

4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

4.1.1 PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS

Es importante definir como hipótesis, aquellas relacionadas directamente con los objetivos específicos planteados en la investigación.

Sean:

Ho = Hipótesis nula = Cambiar de composición de gas no afecta la potencia de salida del motor

Ha = Hipótesis a probar = Cambiar de composición de gas si afecta la potencia de salida del motor

4.1.2 CONSIDERACIONES TÉCNICAS DEL EXPERIMENTO

- EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS

- **MOTOR CFR** Es el motor en el que se realizan los experimentos. Es un motor de combustión interna monocilíndrico de relación de compresión variable (Ver Figuras 16 y 17) empleado por la ASTM para medir *knock*, índice de octano e índice de cetano de combustibles líquidos y cuyas características técnicas aparecen en la tabla 23.

Tabla 23. Características técnicas del motor CFR (ASTM - CFR, 1943)

COMPONENTE	VALOR
Escala de relación de compresión	4 a 10
Diámetro del pistón (mm)	82,55
Longitud de la carrera (mm)	114,3
Desplazamiento (cm ³)	612,87
Anillos de pistón	5
Diámetro de la bujía (mm)	18
Peso del motor (Ton)	0,475

Las partes del motor CFR que aparecen en la figura 15 son: A: Tanque de aire B: Condensador de enfriamiento C: Tanque de gases de escape D: Múltiple de escape E: Válvula de drenado de condensado F: Escala para tiempo de avance en la volante libre G: Manivela para ajuste de relación de compresión H: Tubo para llenado de aceite I: Tuerca para drenado de aceite J: Tanque de recirculación de aceite lubricante K: Filtro de aceite L: Múltiple de drenado de aceite M: Interruptor de ignición N: Válvula selectora de combustible O: Cilindro alimentador de combustible P: Válvula de drenado de combustible Q: Perilla de ajuste de combustible R: Termómetro para el aire de entrada S: Tanque de combustible T: Resistencia para el calentamiento del aire de entrada.

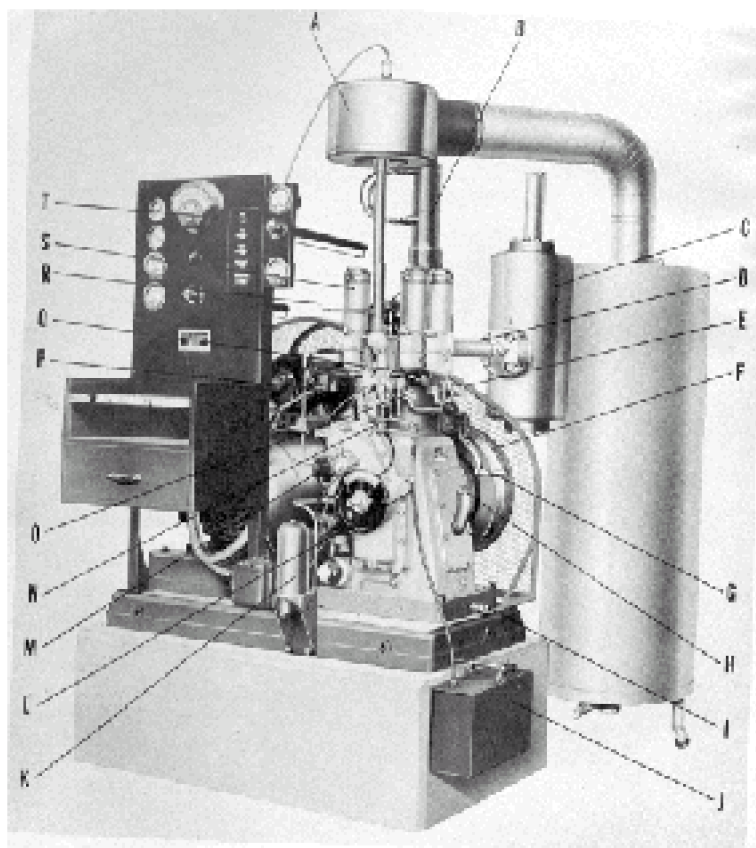


Figura 16. Motor CFR (ASTM - CFR, 1943)

En la figura 17 aparecen otras partes del motor CFR: A: Rodamientos autolubricados del generador DC de 110 voltios B: Interruptor magnético para motor de inducción C: Botón de reset de seguridad D: Tablero de control E: Tabla para el operario F: Motor de inducción sincrónico, con rodamientos de bola G: Medidores H: Control de calor del múltiple I: Conexión del respiradero J: Micrómetro para medición de elevación del cilindro K: Manivela para elevación o disminución de altura de cilindro L: Conducto para llenado de aceite, tubo de nivel y drenado M: Tornillo fijador de posición de cilindro N: Tanque de condensador O: Agujero para llenado de sistema de enfriamiento, use agua suave u otros refrigerantes indicados P: Conexiones para entrada y salida de agua de enfriamiento Q: Mirilla para indicar nivel de agua de enfriamiento R: Conexión flexible de tubo de escape S: Trampa de condensación T: Interruptor eléctrico triple para el calentador de aceite

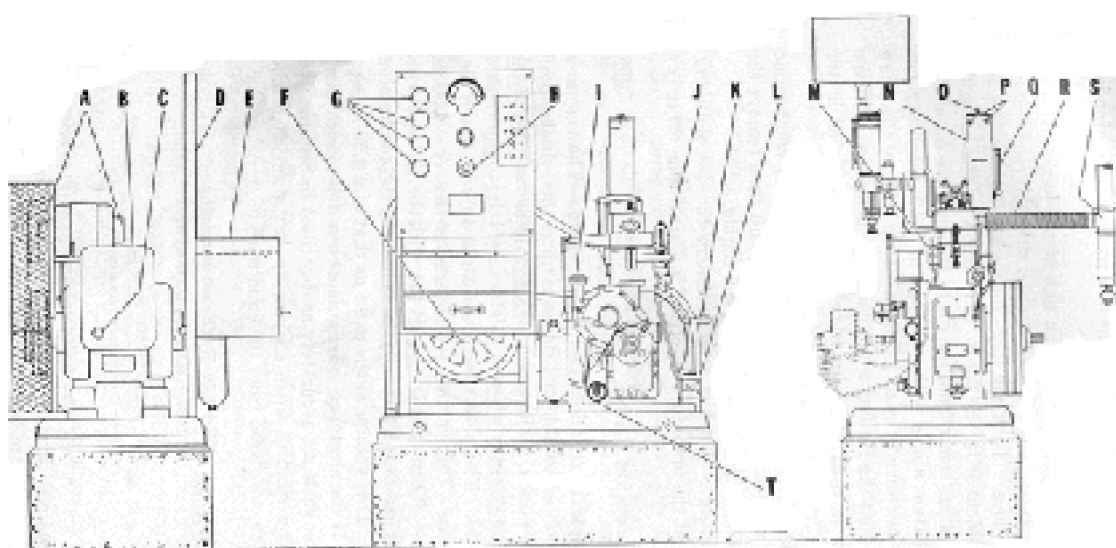


Figura 17. Motor CFR (ASTM - CFR, 1943)

Para realizar los ensayos con combustibles gaseosos se hace necesario hacer unas modificaciones en el sistema de alimentación de combustible. En la figura 18 aparece el sistema de alimentación para combustibles líquidos.

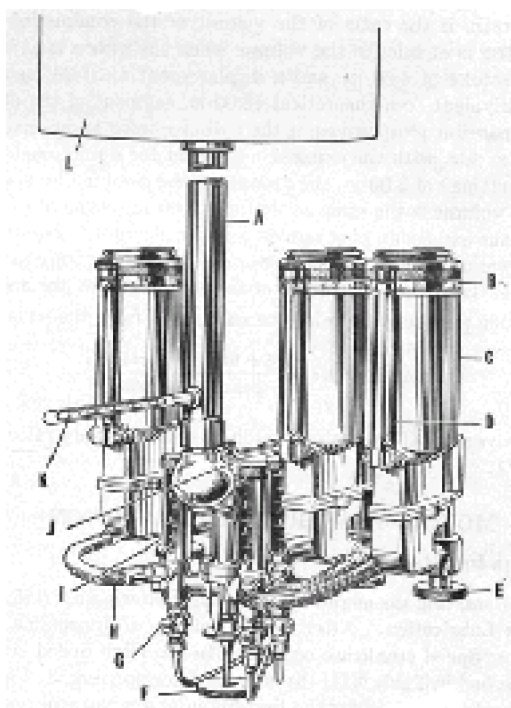


Figura 18. Carburador Estándar CFR de nivel ajustable (ASTM - CFR, 1943)

Las partes del carburador de la figura 18 son: A: Silenciador de entrada de aire B: Indicador de porcentaje de mezcla C: Tanque de combustible D: Medidor de nivel de suministro de combustible E: Perilla de control de nivel de combustible F: Perilla de selección de combustible G: Válvula de drenado H: Línea flexible de combustible J: Indicador de nivel de combustible En la figura 19 aparece una sección del motor sin este carburador y muestra el lugar a través del cual tiene el acceso la mezcla aire / combustible.

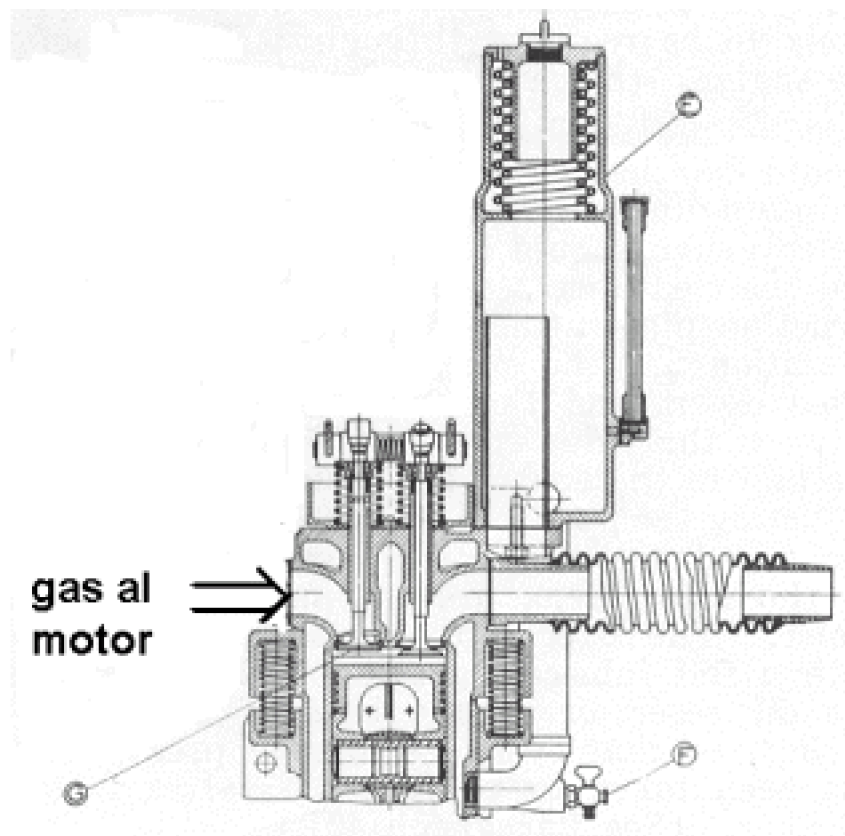


Figura 19. Sección parcial del motor que muestra entrada de gas al múltiple de admisión y cabeza del cilindro (ASTM - CFR, 1943)

El carburador puede removerse por completo y en lugar de ello fijar el mezclador de la figura 20.

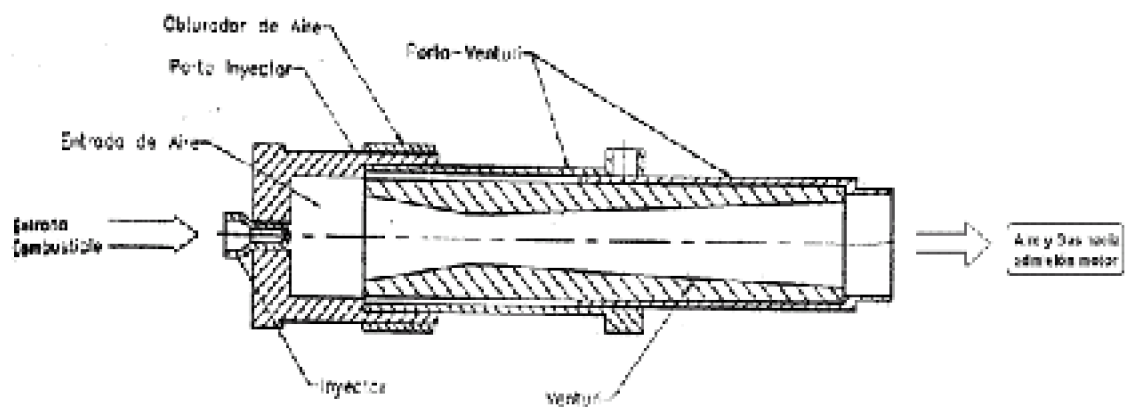


Figura 20. Mezclador

Analizador de gases "MAIHAK". Este equipo es utilizado para medir las concentraciones en porcentaje en volumen de los gases de escape (% CH₄, % O₂, % CO₂ y % CO). Las características del analizador se presentan en la tabla 24.

Tabla 24. Características del analizador de gases NDIR

Parámetro	Valor
Marca	Maihak
Rango para CO	0,001-5% V
Rango para CO ₂	0,001-25% V
Rango Para CH ₄	0,001-25% V
Tipo de sensor	Infrarrojo no dispersivo
Temperatura de operación	5-45 °C
Tiempo de respuesta	30 s
Caudal de gas	10-100 l/min
Entrada de gas	Muestra enfriada y desecada
Base de medición	Seca
Precisión	0,01

- **Acondicionador de gas.** Es un equipo ubicado antes del analizador de gases. Su función es enfriar los productos de combustión o la premezcla y retirar el contenido de agua
- **Medidor de caudal “Sierra Series 820, TOP-TRAK flow monitors”.** Con el cual se mide el caudal descargado de ambos gases a la admisión del motor
- **Pistola estroboscópica.** Permite medir las RPM del motor y el ángulo de avance de la chispa
- **Regulador de alta presión para metano.** Controla la presión a la salida del cilindro de gas natural
- **Regulador de baja presión para metano.** Permite controlar la presión de alimentación de gas natural a la admisión del motor
- **Manómetro tipo bourdon.** Se emplea para determinar la presión de suministro de gas en la línea. Con esta presión y la temperatura del gas en la línea, la cual es medida con un termómetro, se puede corregir el caudal medido en condiciones de sitio y llevarlo a condiciones estándar
- **Termocupla.** Se utiliza para medir la temperatura de los gases de escape
- **Sensor de presión piezoeléctrico.** Usado en conjunto con el amplificador SCOPEMETER 123 para medir presión máxima en la cámara de combustión
- **Amplificador SCOPEMETER 123.** Usado para amplificar la señal tomada del sensor. Transforma la señal de presión en una señal de voltaje

En la figura 21 aparece el montaje (incluyendo los equipos e instrumentos mencionados anteriormente) utilizado en la experimentación. En la figura 22 aparece un segundo montaje para medir la presión máxima en la cámara de combustión

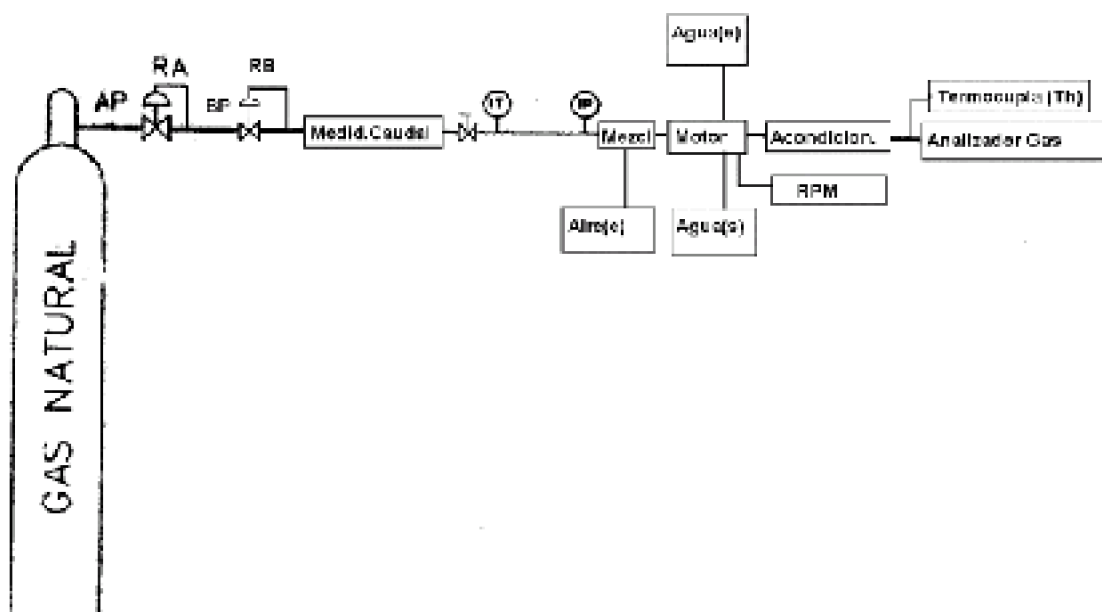


Figura 21 Montaje para la experimentación (e: entrada de fluido, s: salida de fluido)

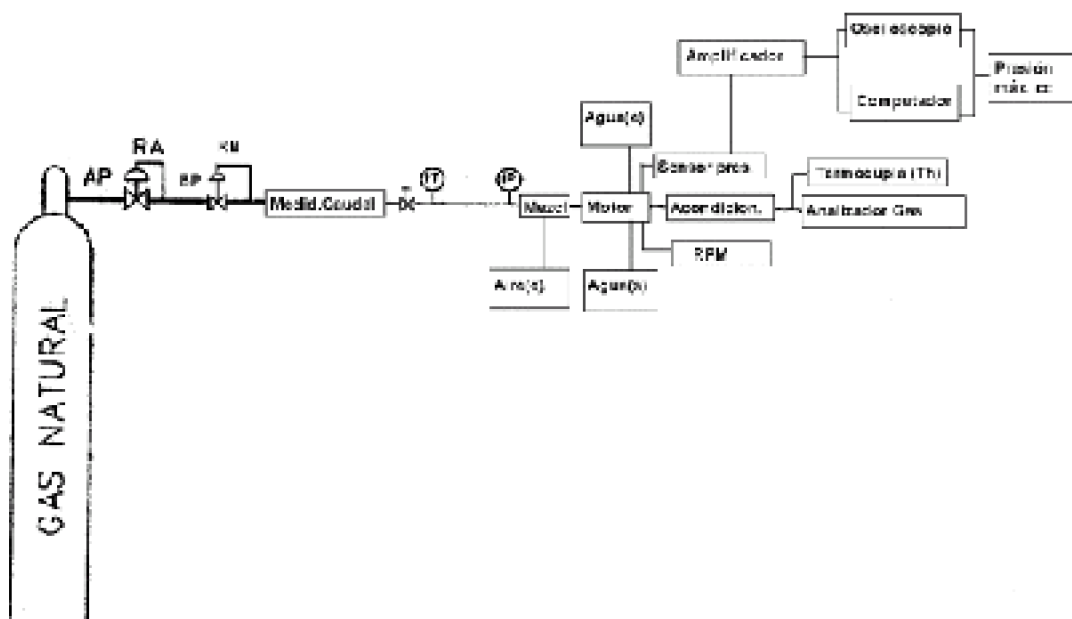


Figura 22. Montaje para la experimentación (e: entrada de fluido, s: salida de fluido)

Algunas características operativas de la experimentación fueron:

- La participación permanente de los Ingenieros Ricardo Moreno, Diego Henao y Carlos Acevedo en la realización de los experimentos
- Los experimentos se realizaron entre 8:30 AM y 12:30 PM de Lunes a Viernes
- Se controló la velocidad de “aire en reposo” en el interior del taller para evitar errores en la medición del analizador de gases

- El ensayo para cada gas se realizó hasta que la temperatura de los gases de escape se estabilizara por lo menos 30 segundos
- El tiempo entre replicas fue de 4 minutos
- Se conservaron las condiciones de experimentación del motor así: relación de compresión 7.43:1, obturación del mezclador completamente abierta, 910 RPM, 18° de avance de la chispa y diámetro de inyector 1.35 mm
- La presión de suministro de gas en cada réplica se controla con el regulador de baja presión, permaneciendo siempre totalmente abierta la válvula de compuerta que está después del medidor de caudal (Ver figuras 20 y 21).

4.2 Consideraciones Estadísticas Del Experimento

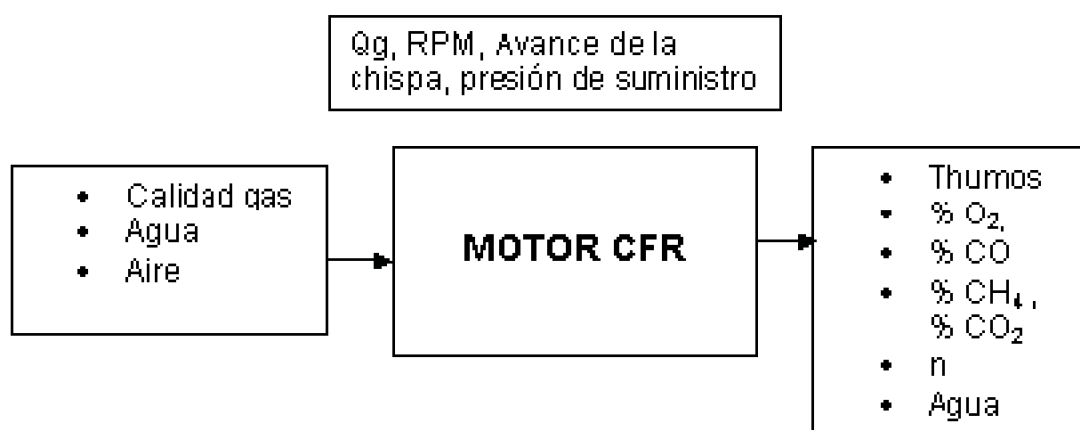


Figura 23. Asignación de variables en el experimento

En la figura 23 las variables están identificadas así:

- **Variables de entrada** : Calidad del gas, agua de refrigeración a la entrada del motor y aire en la admisión
- **Variables controlables** : Caudal de gas (Q_g) , velocidad de giro del motor (RPM) , avance de la chispa ($^\circ$) y presión de suministro del gas (P_s)
- **Variables incontrolables** : Presión atmosférica , temperatura ambiental y humedad relativa
- **Variables de salida** : Temperatura de los gases de escape (Thumos) , $\% \text{CO}_2$, $\% \text{CO}$, $\% \text{O}_2$, $\% \text{CH}_4$, tasa de aireación (n) y agua de refrigeración a la salida del motor

Dadas las características y objetivos del proyecto sólo se tiene un factor por analizar, la calidad del gas. Para ello se selecciona un modelo estadístico de comparación simple con un factor a dos niveles:

- Nivel 1 : Gas de Guajira
- Nivel 2 : Gas de Cusiana

Cualquiera de las variables de salida (Ver Figura 23) puede ser elegida como variable de referencia. Se seleccionó el % CO₂ por ser un valor representativo del fenómeno y del cual se tienen registros de medición a partir de experimentos anteriores, para lo cual, el cálculo del número de réplicas se toma una varianza de 0,0117 y como error de experimentación un valor de $\sigma = 0,5$ (% Volumen).

Para este modelo estadístico se determina el tamaño muestral mediante la fórmula:

$$\phi^2 = \frac{n_1 Da}{2a\sigma} \quad (18)$$

Donde:

n_1 = Número de replicas a = Niveles del factor no principal = 2 σ^2 = Varianza estimada = 0,0117 Da = Desviación experimental = $\sigma = 0,5$ (% Vol). ϕ_1 = Grados de libertad del factor no principal = $a-1 = 1$ α = Error de tipo I = 0,05 $1-\alpha$ = Intervalo de confianza = 0,95 β = Error tipo II = Aceptar la hipótesis nula H_0 , siendo falsa.

Reemplazando los datos anteriores en la ecuación (18), se sigue el siguiente procedimiento:

Con $n_1 = 2$ y reemplazando datos en la fórmula (18) se obtiene $\phi^2 = 10,68$, de otro modo $\phi = 3,26$. Si $\phi_1 = 1$, se asume ϕ_2 = Grados de libertad del denominador de la ecuación mencionada = 10 .Luego se toman como referencia gráficas estadísticas de curvas características de operación para efectos fijos del modelo de análisis de varianza y que permite determinar gráficamente $\beta = 0,025$.

Por lo anterior, $1-\beta = 0,975$ es la potencia de la prueba. Repitiendo estos cálculos para $n_1 = 3$ y $n_1 = 4$ se llega a la ficha técnica del experimento que aparece en la tabla 25.

Tabla 25 Ficha técnica del experimento.

Nombre	Descripción
Modelo	Modelo estadístico de comparación simple con un factor a dos niveles
Variable de referencia	Emisión de dióxido de carbono
Factor	Calidad del gas
Varianza	0,0117
Error de experimentación	$\sigma = 0,5$ (%Volumen)
Intervalo de confianza	95%
Potencia de la prueba	97,6%
Grados de libertad	6
Número de replicas	4

4.3 Esquema experimental y aleatoriedad asignada

Ya que se tiene un factor con dos niveles y el número de replicas es cuatro, el tamaño muestral es ocho (8). En la figura 24 aparece el orden aleatorio de la realización de los ensayos.

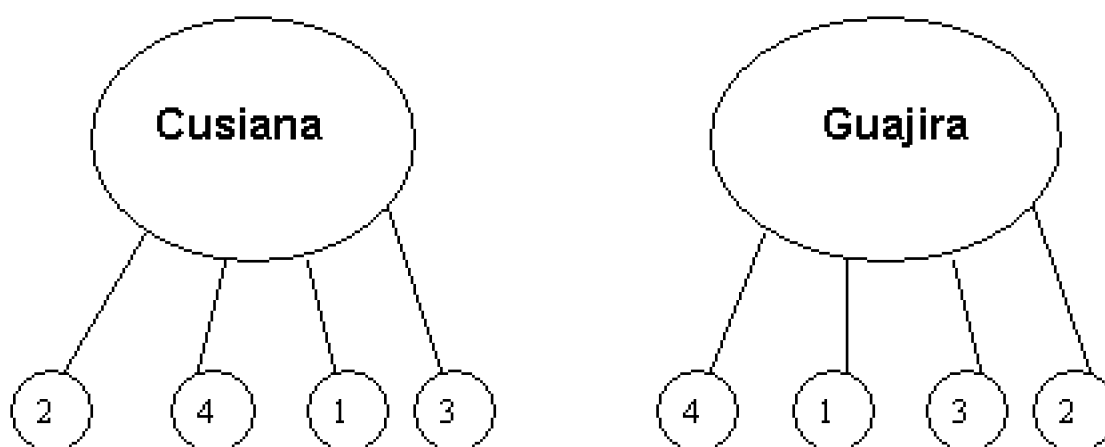


Figura 24. Orden aleatorio de la realización de los ensayos.

4.4 Descripción del procedimiento experimental

Uno de los objetivos del proyecto es analizar el comportamiento mecánico del motor (salida de potencia) convertido a gas cuando se cambia la composición química. El motor CFR usado no permite medir ni directa ni indirectamente la salida de potencia efectiva. La potencia entregada por el motor es absorbida por el motor sincrónico conectado a él y utilizada para mantener constante la velocidad especificada (910 RPM).

En este experimento se puede determinar el comportamiento ambiental (nivel de emisiones) del motor cuando se cambia la composición química del gas de suministro. Para ello las pruebas se dividen en tres grupos: Pruebas preliminares, ensayos con Cusiana y experimentación con Guajira.

- Grupo de pruebas preliminares de condiciones de funcionamiento a gas del Motor CFR

Este bloque de pruebas se realizó teniendo en cuenta el montaje que aparece en la figura 21. El procedimiento que se llevó a cabo para encontrar las condiciones adecuadas del motor (relación de compresión) y de suministro de gas (presión y caudal) fue el siguiente:

1. Verificar condiciones de inicio del motor: funcionamiento de la refrigeración, nivel de lubricación, obturación completamente abierta del mezclador, válvula de paso después del medidor de caudal completamente abierta y establecer cual es la relación de compresión del motor. Además, anotar la temperatura de suministro del gas
2. Encender el motor (mantener en cero la salida del regulador de baja presión)
3. Mover lentamente el tornillo de calibración del regulador de baja presión para permitir el paso de gas (en este caso es Guajira, de alta disponibilidad en el laboratorio)
4. Observar y anotar tanto la presión como el caudal de gas en el momento que se inicia la combustión de la mezcla en el motor
5. Continuar moviendo el tornillo de calibración del regulador de baja presión hasta que el motor muestre un funcionamiento continuo en su combustión. Anotar este valor de presión
6. Permitir que el motor opere en esta condición hasta que la temperatura de humos de escape se estabilice en un valor determinado por lo menos durante 15 segundos. Tomar este valor de referencia
7. Anotar los valores correspondientes de emisiones de CH₄ , O₂ , CO₂ y CO entregados por el analizador de gases
8. Reducir a cero la presión de salida en el regulador de baja presión. Permitir que el motor opere sin admisión de gas (durante 10 segundos) para realizar un “barrido” de gas de la cámara de combustión del mismo. Apagar el motor y esperar 4 minutos
9. Cambiar la relación de compresión del motor moviendo la palanca destinada para ello (parte G, figura 16). Leer la altura alcanzada en el micrómetro de elevación del cilindro (parte J, figura 17) y confrontar este valor en la tabla de relaciones de compresión y lecturas del micrómetro de elevación del cilindro. Anotar el valor determinado
10. Repetir los pasos 2 al 9 hasta determinar las condiciones necesarias para un correcto funcionamiento del motor.

· Grupo de pruebas con gas de Cusiana

1. Instalar el cilindro de gas de Cusiana según las condiciones de montaje de la figura 22
2. Fijar la relación de compresión en 7.43:1 para todas las pruebas (incluyendo Guajira)
3. Verificar las condiciones correctas de operación del motor: funcionamiento de la refrigeración, nivel de lubricación, obturación completamente abierta del mezclador y válvula de paso después del medidor de caudal completamente abierta. Además, anotar la temperatura de suministro del gas
4. Encender el motor (mantener en cero la salida del regulador de baja presión). Permitir que el motor opere así durante 1 minuto (facilitar el barrido de gas en la cámara de combustión)

Mover lentamente el tornillo de calibración del regulador de baja presión para permitir5. el paso de gas de Cusiana. Seguir este paso hasta que la presión alcance 374 mbar y el caudal sea de 20,4 LSM

Permitir que el motor opere en esta condición hasta que la temperatura de humos de escape se establezca en un valor determinado por lo menos durante 15 segundos. Anotar el valor de la temperatura de los gases de escape. Registrar en un archivo del computador (dispuesto en el montaje según figura 22) el comportamiento de la presión de la mezcla quemada dentro de la cámara de combustión.

Anotar los valores correspondientes de emisiones de CH₄ , O₂ , CO₂ y CO entregados por el analizador de gases 7.

Reducir a cero la presión de salida en el regulador de baja presión. Permitir que el motor opere sin admisión de gas (durante 10 segundos) para realizar un “barrido”de gas de la cámara de combustión del mismo. Apagar el motor y esperar 4 minutos 8.

Repetir los pasos 4 al 8 para las cuatro (4) replicas experimentales con gas de Cusiana. 9.

Grupo de pruebas con gas de Guajira

Instalar el cilindro de gas de Guajira según las condiciones de montaje de la figura 221.

Verificar las condiciones correctas de operación del motor: funcionamiento de la refrigeración, nivel de lubricación, obturación completamente abierta del mezclador y válvula de paso después del medidor de caudal completamente abierta. Además, anotar la temperatura de suministro del gas 2.

Encender el motor (Mantener en cero la salida del regulador de baja presión) .Permitir que el motor opere así durante 1 minuto (facilitar el barrido de gas en la cámara de combustión) 3.

Mover lentamente el tornillo de calibración del regulador de baja presión para permitir4. el paso de gas de Guajira. Seguir este paso hasta que la presión alcance 374 mbar. Anotar el caudal de gas alcanzado

Permitir que el motor opere en esta condición hasta que la temperatura de humos de escape se establezca en un valor determinado por lo menos durante 15 segundos. Anotar el valor de la temperatura de los gases de escape. Registrar en un archivo del computador (dispuesto en el montaje según figura 22) el comportamiento de la presión de la mezcla quemada dentro de la cámara de combustión.

Anotar los valores correspondientes de emisiones de CH₄ , O₂ , CO₂ y CO entregados por el analizador de gases 6.

Reducir a cero la presión de salida en el regulador de baja presión. Permitir que el motor opere sin gas (durante 10 segundos) para realizar un “barrido”de gas de la cámara de combustión del mismo. Apagar el motor y esperar 4 minutos 7.

Repetir los pasos 3 al 7 para las cuatro (4) replicas experimentales con gas de Guajira. 8.

Para el gas de Guajira se realizaron otros dos bloques de pruebas manteniendo las mismas condiciones de funcionamiento del motor y el orden de los pasos mencionados anteriormente, pero con las siguientes modificaciones:

- Bloque de pruebas con igual potencia térmica de entrada al motor. Para ello se fija la presión de suministro del gas de Cusiana en 374 mbar y para el gas de Guajira la presión de suministro es 431 mbar. (Ver procedimiento de cálculo en el anexo A).
- Bloque de pruebas con caudal de suministro de 20,4 LSM.

CAPITULO 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Pruebas con igual entrada de presión de suministro de gas al motor CFR

En la tabla 26 se encuentran los resultados de esta prueba. Cuando se pasa de un combustible de menor Índice de Wobbe (Guajira) a un combustible de mayor índice de Wobbe (Cusiana) debe disminuir la tasa de aireación. Los resultados de la prueba certifican lo anterior (ver figura 28, en promedio la disminución es 3,8%).

TABLA 26. Ensayos con motor CFR (montaje según figura 22) Gases Guajira y Cusiana (igual presión de entrada)

GAS	ORDEN	O ₂ (%)	CO(%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	N	Thumos °C)	Tgas (°C	Q (LSM)	Ps (n
Guajira	2	2,91	2,17	10,00	0,11	1,14	382	18	21,4	374
	4	2,78	2,46	9,94	0,15	1,12	383	18	21,4	374
	1	2,94	2,48	9,78	0,11	1,12	385	18	21,4	374
	3	2,82	2,35	9,90	0,08	1,12	382	18	21,4	374
Cusiana	4	2,84	4,15	9,31	0,09	1,08	366	18	20,4	374
	1	2,83	4,22	9,54	0,13	1,09	367	18	20,4	374
	3	2,78	4,23	9,41	0,12	1,08	366	18	20,4	374
	2	2,68	4,31	9,26	0,07	1,06	366	18	20,4	374

Relación de compresión = 7.43 :1 Velocidad angular = 910 RPM Avance de la chispa = 18 ° Obturación Mezclador = Totalmente abierta Diámetro inyector = 1,35mm

MOTOR Diámetro pistón = 3,25 pulg. Longitud carrera = 4,5 pulg. Volumen desplazado = 37,33 pulg³ **TIEMPO DE MEDICIÓN ENTRE REPLICAS = 4 min.**

En la tabla 26 y en las figuras 25 a 31 se observan las siguientes tendencias cuando se pasa de operar con gas de Guajira a gas de Cusiana:

- Mayores emisiones de CO (ver figura 25). Lo cual confirma el planteamiento teórico de la figura 12. En promedio se incrementan 44 %. Con ambos gases y en todas las replicas, el nivel de emisión de CO sobrepasa la norma (0,01%) (Amell, 1997).

Entre las causas se tienen: La presencia de un efecto pulsatorio en las mediciones ya que no se instalo un dispositivo que permita una estabilización de los flujos de escape ("instalar un remanso" a la salida del motor) y la realización de una mezcla inapropiada en la cámara de combustión.

El CO es un producto intermedio de la combustión de un HC (Payri, et al, 1979), de elevada toxicidad por su alta afinidad con la hemoglobina de la sangre. Para relaciones aire / combustible próximas a la estequiométricas (1 a 1,15), la formación de CO en la combustión se debe fundamentalmente a la disociación del CO₂. Si un sistema de alimentación consigue mejorar la homogeneidad de la mezcla reduce también la emisión total de CO, puesto que disminuye la emisión de cada cilindro, disminuye la diferencia entre cilindros y permite operar con mezclas globalmente más pobres sin fallos de combustión (Crouse, 1971).

- Menores emisiones de CO₂ En promedio la reducción es 5,5 %. (ver figura 26) debido a las menores ϕ y más cercanas a la estequiometrica que se utilizan cuando se opera con gas de Cusiana
- Menores emisiones de CH₄ (ver figura 27, en promedio la diferencia entre ambos es de 9%). Con ambos gases las emisiones de CH₄ son muy bajas. En la experimentación se tienen en general, mezclas ligeramente pobres, donde existe exceso de oxígeno y la temperatura todavía es elevada (es decir, que la llama no tiene problemas para progresar), la aparición de HC en el escape es mínima puesto que estos se oxidan, aunque sólo sea parcialmente (formación de CO) , en el múltiple y tubo de escape (Agudelo, 2002)
- Menores temperaturas de salida de los humos con Cusiana. Indica una realización de mejor combustión (ver figura 29, en promedio la diferencia es 4,4%)
- Mayor presión en la cámara de combustión. Indica una mayor probabilidad de entregar más potencia al motor (ver figura 30, en promedio la diferencia es 2,05%).
- Menor caudal de gas de suministro (ver figura 31, la diferencia es 4,6%) En el anexo A se realiza un análisis de la sustitución de un gas por otro teniendo en cuenta que cuando se cambia un gas por otro, permaneciendo todos los parámetros constantes, el caudal en sitio de Guajira es mayor que el caudal de Cusiana.

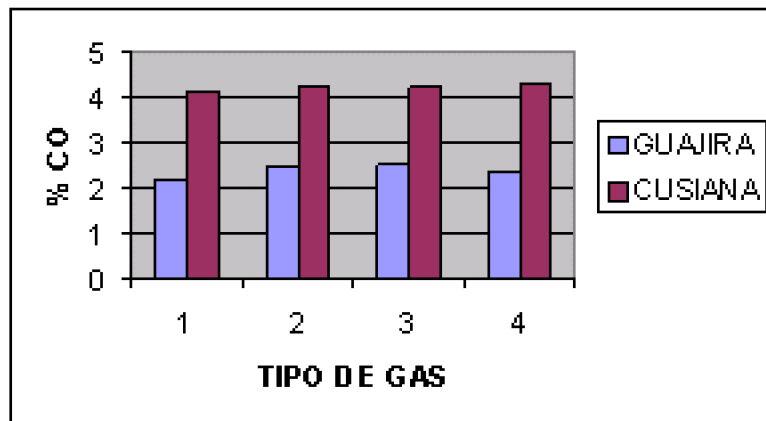


Figura 25. Emisiones de % CO en cada replica con Guajira y Cusiana

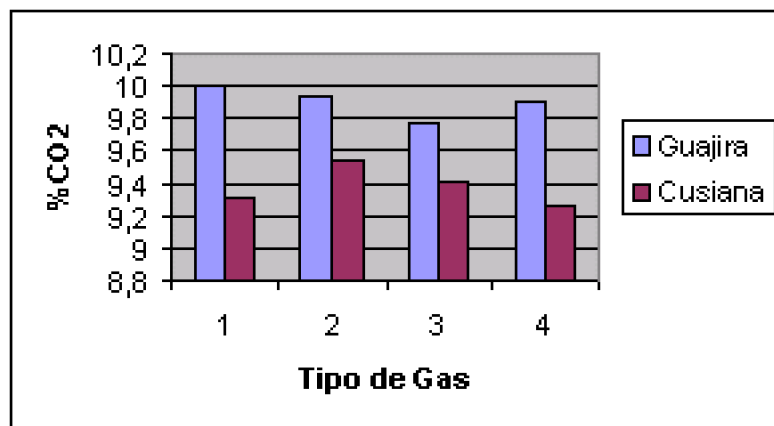


Figura 26. Emisiones de % CO2 en cada replica con Guajira y Cusiana

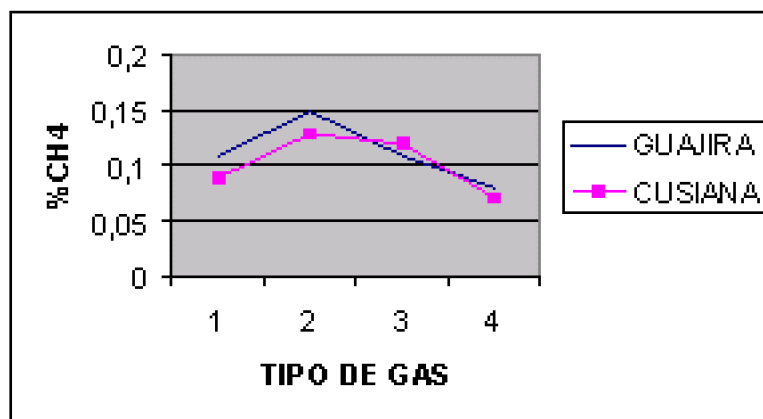


Figura 27. Emisiones de % CH4 en cada replica con Guajira y Cusiana

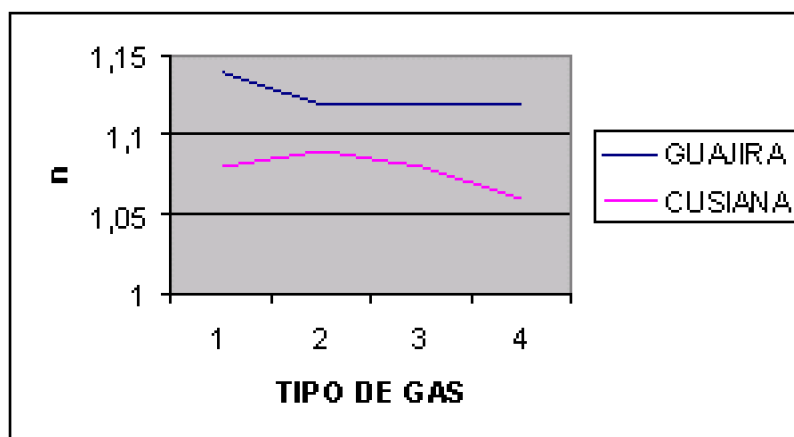


Figura 28. Tasa de exceso de aire (n). en cada replica con Guajira y Cusiana

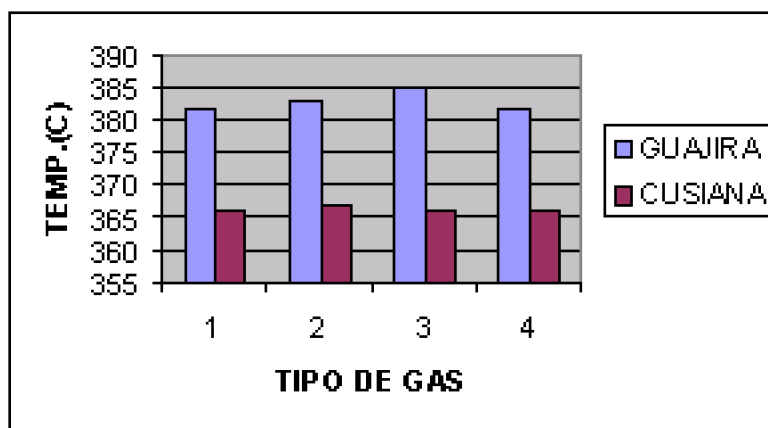


Figura 29. Temperaturas de humos en cada caso para Guajira y Cusiana (°C)

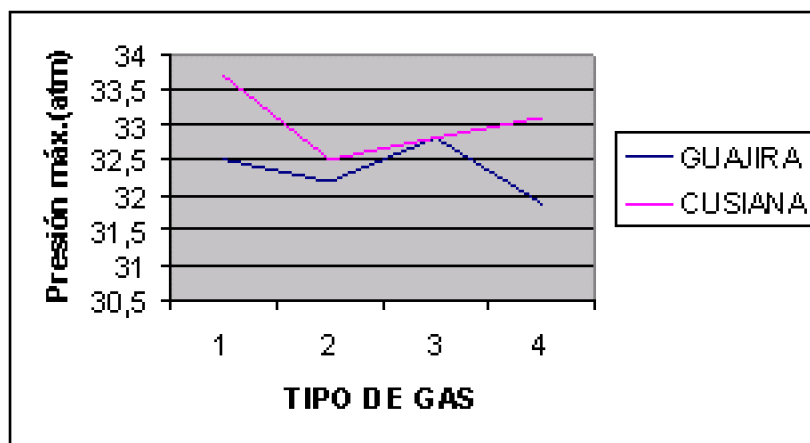


Figura 30. Presión máxima en la cámara de combustión cuando el motor opera con Guajira y con Cusiana (atm)

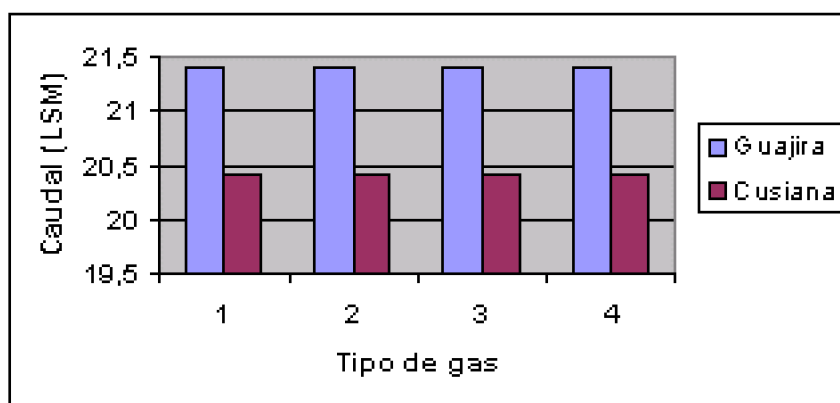


Figura 31. Caudal de suministro cuando el motor opera con Guajira y con Cusiana (LSM)

La tabla 27 resume los resultados anteriores cuando se pasa de operar el motor con gas de Guajira a Cusiana.

Tabla 27 Variación de las variables principales de salida cuando el motor pasa a operar de gas de Guajira a gas de Cusiana (%)

Tendencia	CO	CO ₂	CH ₄	n	Thumos	Q	Pmáx
Aumento	44						2,05
Disminución		5,5	9	3,8	4,4	4,6	

Tabla 28. Ensayos con motor CFR Gases GUAJIRA Y CUSIANA (igual potencia térmica de entrada)

GAS	ORDEN	O ₂ (%)	CO(%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	n	Thumos (°C)	Tgas (°C)	Q (LSM)
GUAJIRA	2	4,71	5,11	6,08	1,66	0,98	315	18	22,2
	4	4,46	5,15	6,54	1,70	1,00	326	18	22,2
	1	4,30	5,23	6,62	1,66	0,99	339	18	22,2
	3	4,41	5,01	6,28	2,08	0,98	323	18	22,2
CUSIANA	4	2,84	4,15	9,31	0,09	1,08	366	18	20,4
	1	2,83	4,22	9,54	0,13	1,09	367	18	20,4
	3	2,78	4,23	9,41	0,12	1,08	366	18	20,4
	2	2,68	4,31	9,26	0,07	1,06	366	18	20,4

*
Q = Caudal corregido con las condiciones de suministro del gas (18 °C , presión de suministro) Condiciones de referencia del medidor (1 atm, 21°C) Relación de compresión = 7,43 :1 Velocidad angular = 910 RPM Avance de la chispa = 18 °
Obturación Mezclador = Totalmente abierta Diámetro inyector = 1,35mm **MOTOR**

Diámetro pistón = 3,25 pulg. Longitud carrera = 4,5 pulg. Volumen desplazado = 37,33 pulg³ **TIEMPO DE MEDICIÓN ENTRE REPLICAS = 4 min.**

Tabla 29. Ensayos con motor CFR Gases GUAJIRA Y CUSIANA (igual caudal de entrada)

ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DE LA COMPOSICION QUIMICA DE LOS PRINCIPALES GASES NATURALES COLOMBIANOS SOBRE EL RENDIMIENTO DE LA CONVERSION Y EL DESEMPEÑO

GAS	ORDEN	O ₂ (%)	CO(%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	n	Thumos (°C)	Tgas (°C)
Guajira	2	2,68	3,94	8,87	0,13	1,03	345	18
	4	2,95	3,98	8,71	0,09	1,04	344	18
	1	2,72	3,68	9,08	0,09	1,05	347	18
	3	2,65	4,13	8,87	0,13	1,02	358	18
Cusiana	4	2,84	4,15	9,31	0,09	1,08	366	18
	1	2,83	4,22	9,54	0,13	1,09	367	18
	3	2,78	4,23	9,41	0,12	1,08	366	18
	2	2,68	4,31	9,26	0,07	1,06	366	18

Relación de compresión = 7,43 :1 Velocidad angular = 910 RPM Avance de la chispa = 18 ° Obturación Mezclador = Totalmente abierta Diámetro inyector = 1,35mm
MOTOR

Diámetro pistón = 3,25 pulg. Longitud carrera = 4,5 pulg. Volumen desplazado = 37,33 pulg³ **TIEMPO DE MEDICIÓN ENTRE REPLICAS = 4 min.**

- Pruebas con igual entrada de potencia térmica y caudal de gas de suministro

Las tablas 28 y 29 muestran los resultados de las pruebas realizadas teniendo constante la potencia térmica de entrada al motor (ver anexo A para determinar la condición necesaria en la prueba) y el caudal de suministro respectivamente.

Obsérvese como en ambos casos el valor de la tasa de aireación aumenta .Esto contradice el principio estipulado para el cambio de tasa de aireación “cuando se pasa de operar de un gas con un índice de Wobbe menor a un gas de índice de Wobbe mayor, la tasa de aireación debe disminuir”

6. CONCLUSIONES

- Cuando se pasa de un combustible de menor Índice de Wobbe (Guajira) a un combustible de mayor índice de Wobbe (Cusiana) disminuye la relación aire/ combustible en 3,8%. Lo que implica, si el motor opera en mezcla pobre cerca de la mezcla estequiométrica se reduce el consumo de combustible. Sin embargo, se debe contar con un sistema de control electrónico de lazo cerrado que detecte estos cambios para lograr que el motor opere con una relación aire/ combustible constante y evite que se aumente el nivel de emisiones de CO en 44%. Trae como ventaja positiva respecto a las emisiones ya que : disminuyen 5,5%CO₂, y 9% CH₄
- En el cambio de gas de Guajira a Cusiana se reducen las condiciones de operación satisfactorias del motor ya que se evidencia la disminución de la resistencia al *knock* (Debido a la disminución del contenido de Metano en la mezcla aire /combustible)
- Sólo la composición química del gas natural de Guajira cumple los requerimientos internacionales de calidad exigidos por la gran mayoría de fabricantes de motores dedicados a gas natural, lo que implica un inconveniente en la utilización futura de gas de Cusiana en el parque automotor colombiano.

Otras características resultantes del cambio de operación con gas natural de Guajira a Gas natural de Cusiana son:

- La temperatura de los humos disminuye en 4,4%.Indica una realización de mejor combustión

- La presión máxima alcanzada en la cámara de combustión aumenta en 2,05% , lo que implica una mayor probabilidad de entregar más potencia al motor
- la reducción del tiempo de duración del desarrollo de la fase inicial de llama laminar en la cámara de combustión (Aumenta la velocidad de propagación de la llama, debido al mayor contenido de etano de Cusiana)
- Mayor sobrecarga térmica y mecánica del motor (Debidas al mayor contenido energético volumétrico de la mezcla aire/combustible que entra a los cilindros)
- Se obtiene un rendimiento 14,37 % mayor (Más kilómetros recorridos con el mismo volumen de combustible) con el gas natural de Cusiana que con el gas natural de la Guajira.

Sin realizar ninguna modificación en el motor, estos dos gases no son intercambiables ya que cambian las condiciones de operación. Para lograr la intercambiabilidad de estos gases en un rango satisfactorio de operación, se debe introducir un sistema de control de lazo cerrado que modifique la curva de avance de encendido y la relación aire / combustible.

- Recomendaciones finales

Para completar el estudio de la intercambiabilidad de estos gases en motores que operan con gas en Colombia se deben tener en cuenta los siguientes Factores:

- Realizar el estudio en motores comerciales a gas
- Incluir la influencia de las condiciones atmosféricas
- Incluir los diferentes Kits de conversión comerciales
- El efecto combinado de la altitud (Por concentración de oxígeno) con la composición química del combustible sobre el desempeño del motor y el efecto de la variación en el tiempo de duración de la fase inicial de desarrollo de llama laminar debida a la composición del combustible sobre la electrónica de control de avance.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo C. y Agudelo. J. R. "Factores que inciden en la combustión de un motor operando con gas natural". En Revista Gas Vehicular, año 3 No. 10-Octubre del año 2002, Colombia. pp 27-31.
- Agudelo, J R. y Amell A. "Factor de equivalencia en la sustitución de gasolina por gas natural comprimido para uso vehicular" en Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia No 25, Abril 2002. pp. 7-12.
- Agudelo J. R., Delgado A. y Gutiérrez E. "Aplicación de herramientas informáticas al diagnóstico de la combustión en motores". en Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia, No. 22. Junio de 2001. pp 106-115.
- Agudelo J. R. Curso gas natural vehicular. Especialización en combustibles gaseosos. Universidad de Antioquia, 2002. pp 64-69.
- Amell A. A.; Barraza C., y Gómez E. Tecnología de la combustión de los gases. CESET, Universidad de Antioquia, junio de 1997, p 6.
- Amell A. A. "Teoría de descarga de inyectores " en Curso combustión del gas. Especialización en combustibles gaseosos. Universidad de Antioquia, 2002. pp 8-14.
- Amell A. A. " Teoría de la intercambiabilidad de gases combustibles "en Curso combustión del gas natural y quemadores industriales. Universidad de Antioquia, 1998.
- ASTM-CFR. KNOCK TESTING UNIT. Edition 11, Waukesha Motor Company, New

- Cork, 1943,pp 47.
- Bevilacqua, O.M.. Tecnología del vehículo de gas natural y programa de Evaluación de desempeño del Combustible. Gas Research Institute Report GRI-97/0184,1997.
- Boschan, E., Meggyes, A. y Szabari. L."Effect of gas quality changes on gas engine emission", International Gas Research Conference, 1989.
- CREG. "Numeral 6.3" En Resolución 071 de 1999, Bogotá 1999.
- Crouse, W.H. "Automotive emission control". Editorial Mc Graw Hill, New York, 1971.
- Degobert, P. Automobile and Pollution Technip, Paris, 1995.
- Dubel, M., Schmillen, K, y Wackertapp. H."Influence of gas composition on the knocking behaviour of spark –ignited gas engines", International Gas Research Conference, 1983.
- Heywood,J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw- Hill, N.Y., 1988.
- Hien, L."Effect of Gas Composition Variations on the Operation, Performance and Exhaust Emissions of Natural Gas-Powered Vehicles. IANGV-International Association for Natural Gas Vehicles, Sydney-Australia, 2002.
- Huertas J.I., "El poder calorífico del combustible asociado a los mitos sobre la pérdida de potencia y recalentamiento del motor". Revista *Gas Vehicular*, No. 5. Colombia. 2001.
- King, S.R. "The impact of natural gas composition on fuel metering and engine operational characteristics". Society of Automotive Engineers .Report SAE 861578 .
- Klimstra, J. "Interchangeability of gaseous fuels- The importance of the Wobbe-Index", Society of Automotive Engineers Report SAE 861578.
- Kubesh, J.T. "Effect of gas composition on octane number of natural gas fuels". Gas Research Institute Report GRI-92/150, 1992 .
- Lampert, J.K. y Farrauto. R.J. "Catalyst development for methane emissions abatement from lean burn natural gas engines". Gas Research Institute Report GRI-97/0212, 1997.
- Lampert, J.K. Farrauto, R.J. y Kazi .S "Methane emission abatement from lean burn natural gas vehicle exhaust", SAE Paper 961971, Society for Automotive Engineers, 1996.
- Leiker, M. , Christoph, K.,Rankl, M., Cartellieri , W. y Peifer.,L."The Evaluation of the antinocking property of gaseous fuels by means of the methane number and its practical application to gas engines". 9 th International Congress on Combustion Engines, Stockholm, 1971.
- Liss, W.E y Trasher. W. "Natural gas a stationary engine and vehicular fuel" SAE Paper 912364, 1991.
- McCormick, R.L., Newlin, A.E., Mowery,M.S , Grabosky,M.S. y Ohno. T.R. "Rapid deactivation of lean burn natural gas engine exhausts oxidation catalysts". SAE Paper 961976, Society of Automotive Engineers, 1996.
- Mongotmery, D. C. Design and Analysis of Experiments. John Willey and sons, third edition, New York, 1991, p 607.
- Nylund, N.O. y Lawson. A. "Exhaust emissions from natural vehicles", International

- Association for Natural Gas Vehicles, 2000.
- Payri, F." Soluciones a la contaminación de motores térmicos alternativos de automoción", Monografía sobre medio ambiente, serie tecnología y medio ambiente, Vol. 1, 1979.
- Rousseau, S., Lemoult, B. y Tazerout, M. "Combustion, Characterization of natural gas in a lean burn spark ignition engine". Instn. Mech.Engrs, 1999, 213(D), pp 481-489.
- Ryan, T.W. y Callahan. T. J. "Effects of gas composition on engine performance and emissions". Gas Research Institute, Report GRI-92/0054, 1992.
- Schollmeyer, H.J. y Wegener, R. "Effect of gas properties on the operation of natural gas vehicles". 2001 International Gas Research Conference, Amsterdam, 2001.
- Stephenson, J. "1997 Position Paper on Natural Gas Vehicles", International Association for Natural Gas Vehicles/ International Gas Union, 1997 .
- UPME .Movilidad limpia. En Revista escenarios y estrategias, Vol. 4, Santafé de Bogotá, 1999. pp. 7-14.
- UPME .La cadena del gas natural en Colombia. Actualización 99 , Santafé de Bogotá DC, Mayo, 1999. pp. 33-37
- Yossefi, D., Belmont, M.R., Ashcroft, S.J.y Mackell, S.J. "Ignition source characteristics for natural gas burning vehicle engines". Instn. Mech. Engrs. 2000, 214(D),pp 171-180.
- Yossefi, D., Belmont, M.R., Ashcroft, S.J. y Mackell, S.J. "A comparison of the relative effects of fuel composition and ignition energy on the early stages of combustion in a natural gas spark ignition engine using simulation". Instn. Mech.Engrs. 2000, 214(D), pp 383-393.
- Von Mitzlaff, Klaus. Engines for Biogas, Theory, modifications, economic operation, Gate, GTZ. Wiesbaden, Germany, 1988. p58

ANEXOS

ANEXO A. Cálculo de la presión de suministro del gas de Guajira para

garantizar igual entrada de energía térmica al motor CFR

En las condiciones experimentales de trabajo del CFR se determino que la presión del gas de suministro esta en el rango de mediana presión. Retomando la ecuación que identifica la potencia térmica entregada a través de un inyector en las condiciones citadas anteriormente:

$$\text{Potencia térmica} = C^* A^* P^* Q_{MR}^* \sqrt{\frac{T_*}{P_* \rho_{AIR} dT_o}} * PC_i \quad (1)$$

$$\text{Con } Q_{MR} = \left(\frac{P_o}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} * \sqrt{\left(\frac{2*\gamma}{\gamma-1} \right)} \sqrt{\left(1 - \left(\frac{P_o}{P} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right)} \quad (2)$$

Siendo P_o : Presión absoluta del gas antes de la descarga y

γ : Relación de calores específicos a presión y volumen constantes

Potencia térmica bruta entregada por Guajira = Potencia térmica bruta entregada por Cusiana.

En otras palabras, $PT_{GUAJIRA} = PT_{CUSIANA}$

Teniendo en cuenta lo anterior se llega a :

$$Q_{MR_{GUAJIRA}} Wi_{GUAJIRA} = Q_{MR_{CUSIANA}} Wi_{CUSIANA} \quad (3)$$

Con Wi como el poder calorífico del gas.

Si se utiliza el software de Combugas del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas de la Universidad de Antioquia con los datos experimentales de Cusiana:

Diámetro del inyector = 1,35 mm Temperatura de suministro = 18 °C Temperatura ambiente = 20 °C Presión de suministro = 374 mbar Presión atmosférica = 852 $Wi_{CUSIANA} = 48,357 \text{ MJ/m}^3_{st}$ $Wi_{GUAJIRA} = 44,614 \text{ MJ/m}^3_{st}$

Si

$$\gamma = \sum Y_i \gamma_i$$

para mezclas de gases puros (con Y_i como la fracción másica de cada gas puro). Reemplazando los valores de las fracciones másicas de los componentes del gas de Guajira se obtiene $\gamma = 1,3098$ (5)

Con P_o = Presión atmosférica + Presión de suministro del gas de Guajira (6)

Reemplazando (4),(5) y (6) en (2) y despejando para la presión de suministro del gas de guajira se obtiene:

Presión de suministro del gas de Guajira = 432 mbar = 6,34 psig



Figura 46. Foto 1 de montaje experimental



Figura 47. Foto 2 de montaje experimental.