

Comparación del funcionamiento mecánico, termodinámico y ambiental de motores operando con gasolina y gas natural de La Guajira

John R. Agudelo S. , Iván D. Bedoya C.** y Ricardo Moreno S.****

(Recibido el 17 de abril de 2004. Aceptado el 27 de septiembre de 2004)

Resumen

En este artículo se presentan los resultados experimentales del funcionamiento mecánico y ambiental de un motor Toyota Hilux 2.400 cm³. con relación de compresión 9:1 y el diagnóstico termodinámico de un motor de ensayos normalizado de relación de compresión variable ASTM-CFR monocilíndrico, operando con gasolina y gas natural de La Guajira.

Al usar gas natural en el motor Toyota se observó que para mantener la misma potencia se produce un incremento del consumo específico de combustible cercano al 20%, sin embargo el costo específico (pesos/galón equivalente) está cercano al 50% a su favor. El rendimiento volumétrico mejoró alrededor del 10% respecto a la gasolina. Las emisiones de CO disminuyeron alrededor del 40%. Al hacer la comparación en términos termodinámicos en el motor CFR para una relación de compresión de 9:1, se observó que al usar gas natural de La Guajira, la potencia indicada disminuyó en 12,5%, la presión máxima de combustión disminuyó alrededor del 17%, lo que implica disminución proporcional en la temperatura instantánea cercana al 20% para las mejores condiciones de operación del motor. El coeficiente convectivo de transferencia de calor disminuyó alrededor del 28%. La primera fase de la combustión se duplica respecto a la gasolina al mantener el mismo ángulo de avance de chispa. Al usar un avance 15° por encima del establecido para gasolina, esta fase se hace similar.

-----*Palabras clave: gas natural, gasolina, combustión, consumo de combustible, emisiones.*

* Grupo GASURE. Universidad de Antioquia.

** Grupo GASURE. Universidad de Antioquia. ibedoyac@udea.edu.co.

*** Profesor ingeniería mecánica. Universidad de Antioquia. pmoreno@udea.edu.co.

Mechanical, thermo dynamical and environmental comparison of engines using natural gas and gasoline

Abstract

This paper shows experimental results of a Toyota Hilux 2400 swept volume, compression ratio 9:1 engine, operating with La Guajira natural gas and petrol. Also shows a thermodynamic study of those fuels in a normalized, variable compression ratio ASTM-CFR monocyliner engine.

When using natural gas, Hilux engine increases its fuel consumption around 20% for the same power. Volumetric efficiency increases 10% and CO emissions decrease around 40%. When comparing thermodynamic parameters in CFR engine operating at a compression ratio of 9:1, it was found a 12,5% decrease in indicated power and 17% in maximum combustion pressure, which is proportional to temperature diminish of around 20%. Convective heat transfer coefficient decreases around 28% respect to petrol. First laminar combustion phase is duplicated when using the same spark advance as petrol, nevertheless this is maintained almost constant when spark is advance 15° over petrol spark advance.

-----*Key words: natural gas, petrol, combustion, fuel consumption, emissions.*

Introducción

El gas natural utilizado como combustible “alternativo”, a pesar de su origen fósil, gana cada vez más terreno en el mundo de la automoción, especialmente en grandes núcleos urbanos donde existen problemas de concentración de emisiones contaminantes. En Colombia se viene implementando desde finales de 1984 en la costa atlántica, y más recientemente (2000) ha ganado terreno en el interior del país gracias al plan nacional de masificación de gas impulsado por el Gobierno. Su uso en motores dedicados permite aprovechar mejor sus propiedades fisicoquímicas como su elevado octanaje (en torno a 120) y su elevada difusividad molecular, que facilita el proceso de mezclado, así como la “limpieza” de su combustión asociada a la sencillez de su molécula. Igualmente, las condiciones de formación y encendido de mezcla se pueden optimizar para obtener mejores prestaciones del motor al quemar gas natural. Sin embargo, en motores bicomcombustibles, que son aquellos modificados para que puedan usar gasolina o gas natural, es más complejo el proceso, ya que la gasolina tiene propiedades fisicoquímicas y de combustión muy diferentes a las del gas natural.

Algunos estudios han demostrado que la configuración del sistema (*kit*) de conversión, así como la altura sobre el nivel del mar, la composición química del gas natural y el tipo de motor, tienen gran influencia sobre el éxito de la conversión del motor en modo bicomcombustible [1-5]. Estos estudios se han centrado en comparar variables de operación del motor como potencia, consumo de combustible y emisiones contaminantes. En conversiones que usan mezclador, se ha demostrado que la pérdida de potencia puede variar desde 12 [6] hasta 20% [5], mientras que la reducción en emisiones contaminantes pueden disminuir hasta el 90% en función del tipo de contaminante, bajo condiciones de operación similares a las de ciudad.

Con el fin de obtener conclusiones que se pudieran ampliar a motores de diferentes configuraciones, en este trabajo se realizó un análisis mecánico,

termodinámico y ambiental en motores de encendido provocado de funcionamiento bicomcombustible gas natural-gasolina. En el análisis mecánico se consideraron parámetros de diseño y eficiencia como presión media efectiva, consumo específico de combustible, potencia efectiva y par al freno. Para este fin se utilizó un motor Toyota Hilux 2.367 cm³., montado en banco de ensayos.

En el análisis termodinámico se realizaron mediciones continuas de presión en cámara, ángulo de giro del cigüeñal y caudales máxicos de combustible y aire, con el objetivo de efectuar el análisis comparativo entre ambos combustibles de variables como: forma de quemado del combustible, tasa de liberación de energía y rendimiento de la combustión; bajo condiciones controladas de régimen de giro del motor, temperatura de entrada de la mezcla, temperatura del aceite, presión del circuito de lubricación, avance de la chispa, relación de compresión y relación aire combustible. Para este fin se utilizó un motor monocilíndrico de relación de compresión variable, normalizado ASTM-CFR.

Montaje experimental

Para el análisis de variables de funcionamiento mecánicas y ambientales se utilizó un motor instrumentado marca Toyota Hilux modelo 22 R (tabla 1), unido mediante una junta homocinética a un freno dinamométrico hidráulico GO-Power System modelo 1978 D512, utilizado para simular condiciones de funcionamiento en ruta.

Tabla 1 Especificaciones del motor de ensayos mecánicos y ambientales

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Número de cilindros	4 en línea
Cilindrada (cm ³)	2.367
Carrera x diámetro (mm)	92 x 89
Potencia (kW)	75 a 4.800 rpm
Par (Nm)	185 a 2.500 rpm

Para el estudio termodinámico del proceso de combustión se utilizó un motor de ensayos

ASTM-CFR de relación de compresión variable entre 4:1 y 10:1 (figura 1). Este motor diseñado inicialmente para medir número de octano de gasolinas, ha sido modificado para realizar análisis termodinámico del proceso de combustión. Su diseño permite mantener constantes el régimen de giro (900 rpm) independientemente de que haya o no combustión, ya que está unido a través de bandas a un motor eléctrico síncrono y la temperatura del agua de refrigeración (temperatura de evaporación) lo que permite que las pruebas sean muy reproducibles.

Este motor fue instrumentado con una cadena de combustión conformada por un sensor de presión piezoeléctrico con amplificador de carga, un codificador angular, una tarjeta de adquisición de datos y un computador personal. La señal de presión instantánea en cámara de combustión se obtuvo a través de un captador piezoeléctrico AVL modelo 12QP505cl, refrigerado internamente con agua. La

señal de carga eléctrica emitida por el sensor era amplificada y convertida a voltios a través de un amplificador de carga piezoeléctrico AVL modelo 3066A01. El volumen instantáneo en la cámara de combustión se obtuvo con un codificador angular Heidenhain ROD 426 de 1.024 pulsos por revolución.

Diseño experimental

Para las variables de tipo mecánico y ambiental, se utilizó un diseño factorial multivariado [7]. La tabla 2 muestra las especificaciones del diseño experimental. Para gasolina se empleó un avance de 10°, recomendado por el fabricante del motor, para gas natural de La Guajira se empleó un avance de 25°, de acuerdo con las recomendaciones de los talleres de conversión de motores. En ambos casos se verificó que las emisiones del motor estuvieran dentro de lo permitido por las normas técnicas ambientales vigentes.

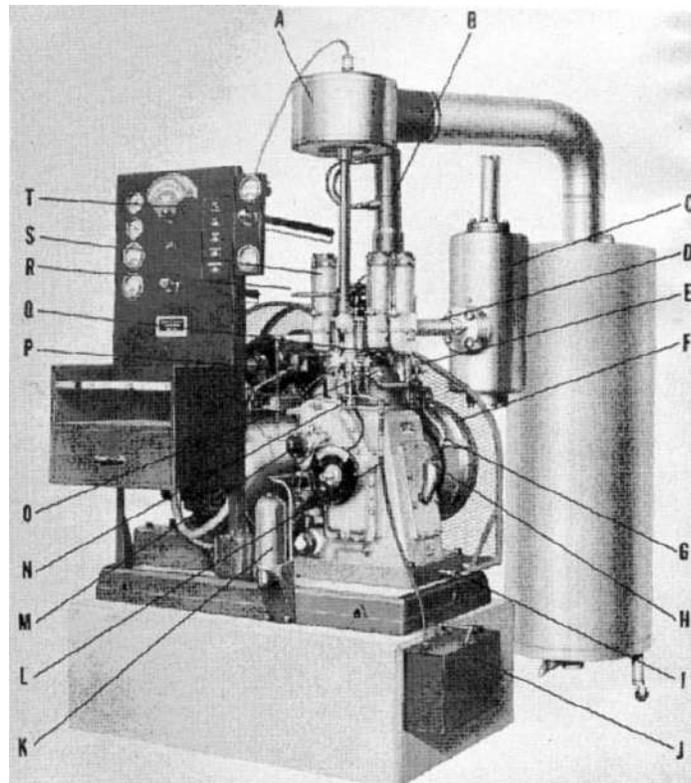


Figura 1 Motor ASMT-CFR para ensayos de combustión

La evaluación del efecto que los factores (tipo de combustible y grado de carga) tienen sobre cada una de las variables de caracterización (consumo de combustible, g_{ef} ; rendimiento volumétrico, η_v ; rendimiento efectivo, η_e ; costo de combustible, concentración de CO y CO₂) se realizó empleando diseños experimentales multifactor, basados en el análisis de varianza (ANOVA) para cada variable dependiente.

En este trabajo se decidió fijar los puntos de operación del motor (potencia fija) en condiciones normales de funcionamiento en ciudad (bajo régimen y bajo par), para evaluar el efecto sobre las variables antes mencionadas.

Los experimentos de combustión en el motor CFR se realizaron registrando 30 curvas consecutivas, una vez el motor estaba a punto. Para ello se utilizó un paquete informático desarrollado por los autores. Las condiciones de ensayo eran las propias del motor CFR, es decir, 900 rpm y 97 °C

el agua de refrigeración. Se tomaron mediciones para cuatro avances de chispa diferentes: 10, 15, 20 y 25° para cada combustible, intentando mantener la mezcla en condiciones estequiométricas. Con lo anterior se pretendía determinar el avance más adecuado para gasolina y gas natural de La Guajira.

Resultados y discusión

Comparación de variables mecánicas y ambientales en el motor Toyota Hilux

La tabla 3 muestra los resultados más relevantes obtenidos mediante un análisis de varianza (ANOVA).

Los valores P son un indicativo de la variación de la respuesta en las variables de desempeño al modificar los niveles de los factores seleccionados. Un valor de P menor o igual a 0,05 indica que el cambio en el factor tiene incidencia estadística-

Tabla 2 Diseño estadístico de experimentos

Factor	Característica Nivel			Designación nivel
Tipo de combustible	Gasolina extra			1
	Gas natural (La Guajira)			2
Grado de carga (Régimen de funcionamiento)	Régimen de giro (rpm)	Par (N-m)	Potencia (kW)	Modo
	1.800	15	2,82	2
	2.250	30	7,06	3
	2.750	40	11,51	4
	3.000	55	17,27	5

Tabla 3 Valores P obtenidos en el análisis de varianza con un 95% de confiabilidad para todas las variables

Factor	Valor P					
	Rendimiento de conversión combustible	Rendimiento volumétrico	% CO ₂	% CO	Relación aire / combustible	Costo específico de funcionamiento (\$/kWh)
Combustible	0,000	0,000	0,000	0,000	0,531	0,000
Régimen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Interacción factores	0,000	0,0005	0,000	0,000	0,000	0,000

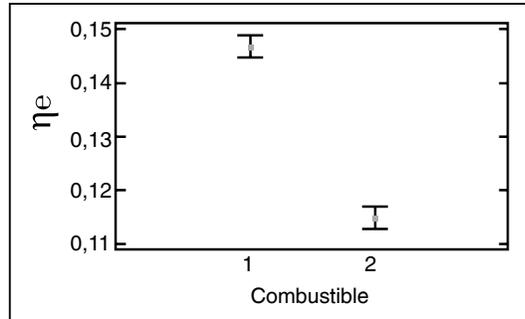


Figura 2 Estadística de la variable rendimiento de conversión de combustible (η_c) versus tipo de combustible (1: gasolina y 2: gas natural de La Guajira)

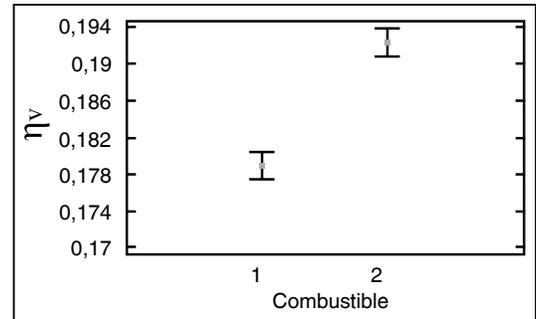


Figura 3 Estadística de la variable rendimiento volumétrico (η_v) versus tipo de combustible (1: gasolina y 2: gas natural de La Guajira)

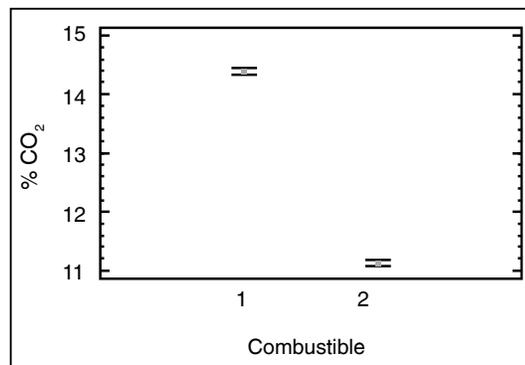


Figura 4 Estadística de la variable concentración de CO₂ (porcentaje en volumen) versus tipo de combustible (1: gasolina y 2: gas natural de La Guajira)

mente apreciable sobre la variable de análisis. Los resultados muestran que sólo la relación aire-combustible no se vio afectada al utilizar gasolina o gas natural de La Guajira ($P = 0,531 > 0,05$), lo que se esperaba, ya que al ajustar el motor se buscaba siempre que operara en condiciones de mezcla estequiométrica independiente del tipo de combustible empleado.

En la figura 2 se muestra que el rendimiento de conversión de combustible es menor cuando el motor trabaja con gas natural puesto que para producir la misma potencia el motor tiene más pérdidas de energía por transferencia de calor (la temperatura en los gases de escape es mayor al funcionar con gas natural) lo que implica que

al motor deba entrar una cantidad de energía mayor mostrando disminución en el rendimiento de conversión de combustible. Utilizando como referencia la figura 2 el rendimiento de conversión de combustible se reduce en 21% aproximadamente cuando se utiliza gas natural de La Guajira, lo anterior es equivalente a decir que para mantener la misma potencia en el motor, el consumo específico de combustible incrementa en torno a 21% al usar gas natural ya que son inversamente proporcionales.

En la figura 3 se observa que el rendimiento volumétrico es mayor cuando el motor trabaja con gas natural. Esto se debe a que para producir la misma potencia, el motor al funcionar con gas natural tiene que realizar mayor apertura de la mariposa (para dejar entrar más cantidad de mezcla) y esto hace que haya menor restricción en el aire de entrada obteniendo mayor rendimiento volumétrico. La figura 3 muestra un aumento en el rendimiento volumétrico del 8% utilizando gas natural.

En la figura 4 se observa que el porcentaje de CO₂ es mayor cuando el motor trabaja con gasolina. Esto se debe a que el gas natural tiene menor relación carbono/hidrógeno en su molécula.

En la figura 5 se observa que el costo específico de combustible (\$/kW-h) es menor cuando el motor trabaja con gas natural (entorno al 50% más bajo). Esto se debe a que el flujo másico

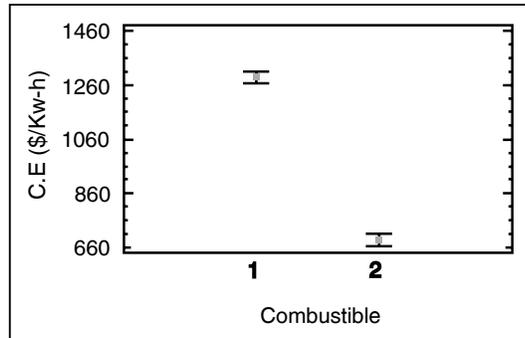


Figura 5 Estadística de la variable costo específico del combustible (\$/kW-h) versus tipo de combustible (1: gasolina y 2: gas natural de La Guajira)

de gas natural es menor y además es más económico en términos de energía equivalente que la gasolina.

Diagnóstico de la combustión en el motor CFR

El diagnóstico experimental de la combustión se realizó ayudados por el paquete informático DIATERM, desarrollado por los autores y que aparece descrito en la referencia [8]. La información del proceso de combustión se obtiene a partir de las señales instantáneas de presión y

posición del pistón, utilizando la primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado en el que se asume que el gas dentro de la cámara de combustión se comporta como un gas perfecto a la misma presión, temperatura y dosado (relación combustible-aire) en toda la cámara.

En las figuras 6 y 7 se muestran las curvas de presión en cámara de combustión para 4 avances de chispa diferentes en el caso de gasolina y gas natural de La Guajira respectivamente. La presión máxima de combustión disminuye alrededor del 17% al usar gas natural.

En las figuras 6 y 7 se aprecia un incremento en la presión y un acercamiento de su valor máximo hacia el punto muerto superior a medida que aumenta el avance. El criterio normalmente usado para seleccionar el mejor avance de chispa es aquel que mantenga la combustión centrada obteniéndose de esta manera el par máximo al freno [9]. Sin embargo dado que en el motor CFR no se pueden medir parámetros al freno, es necesario usar otro criterio, los autores optaron por seleccionar el periodo inicial de desarrollo de llama laminar, denominado por algunos autores tiempo de retraso por su equivalencia con los motores diesel [10].

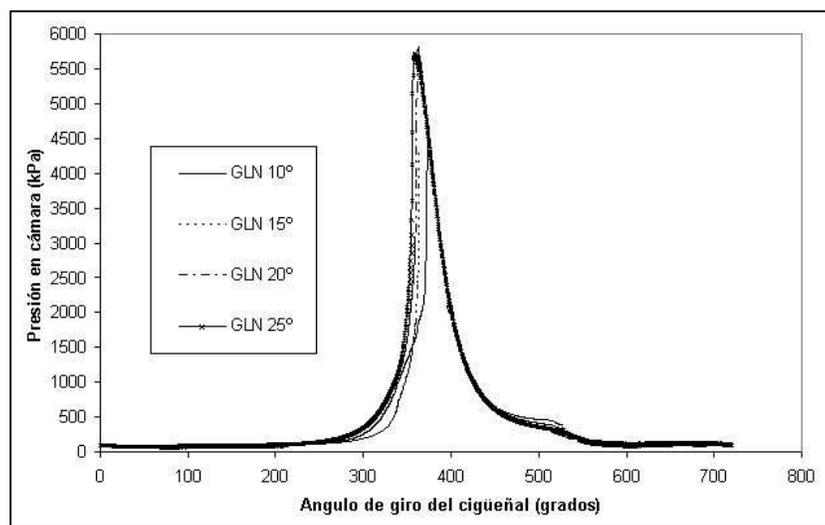


Figura 6 Presión medida en cámara de combustión con gasolina en función del ángulo de giro de cigüeñal para diferentes avances de chispa

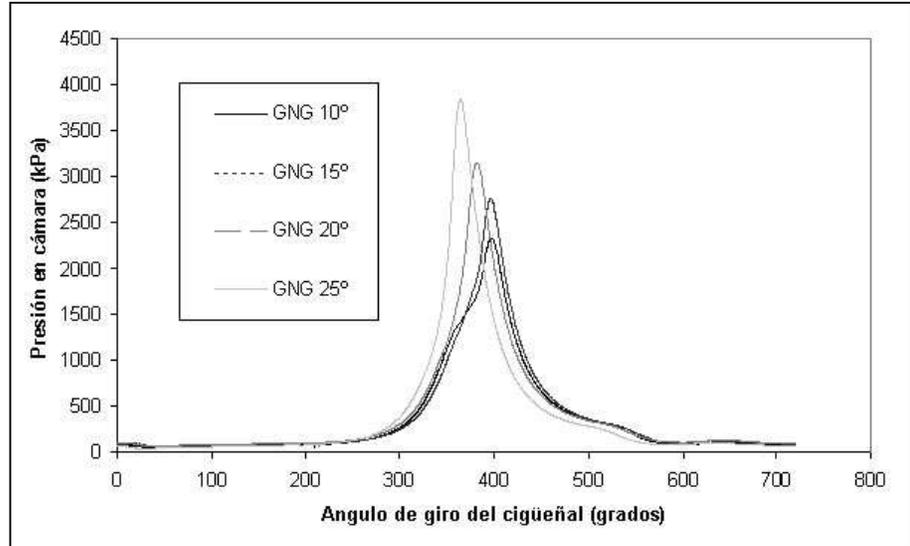


Figura 7 Presión medida en cámara de combustión para gas natural de La Guajira con diferentes avances de chispa

Haciendo la integral cerrada en la curva presión *versus* volumen se puede obtener lo que se denomina el trabajo indicado, a partir del cual se obtiene la potencia indicada. La potencia indicada para gasolina es de 4,69 kW, mientras que para el gas natural de La Guajira es de 4,16 kW, lo que representa una disminución del 12,5%.

En las figuras 8 y 9 se muestra la temperatura instantánea en el cilindro para gasolina y gas natural respectivamente. Las temperaturas en la cámara son inferiores para el gas natural; dado que la temperatura adiabática de llama de ambos combustibles es similar, esto significa que no hay completa conversión del calor liberado en

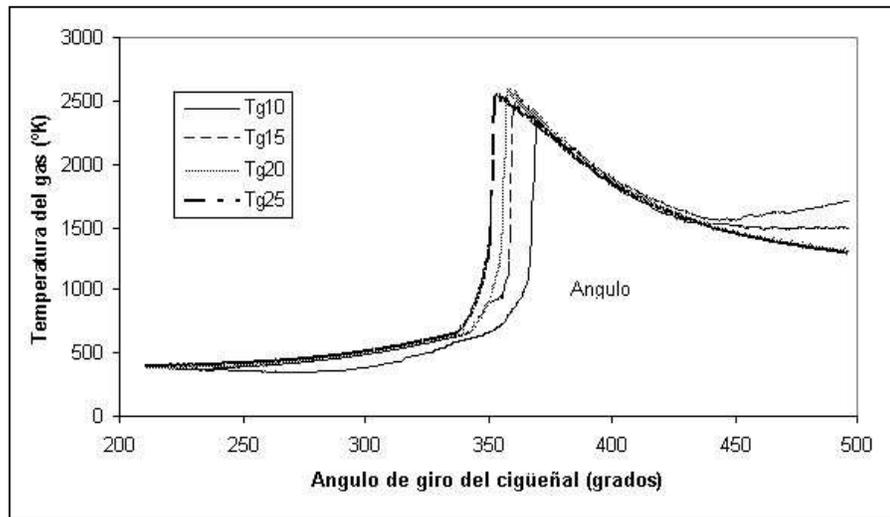


Figura 8 Temperatura instantánea del gas en el cilindro para gasolina con diferentes avances de chispa

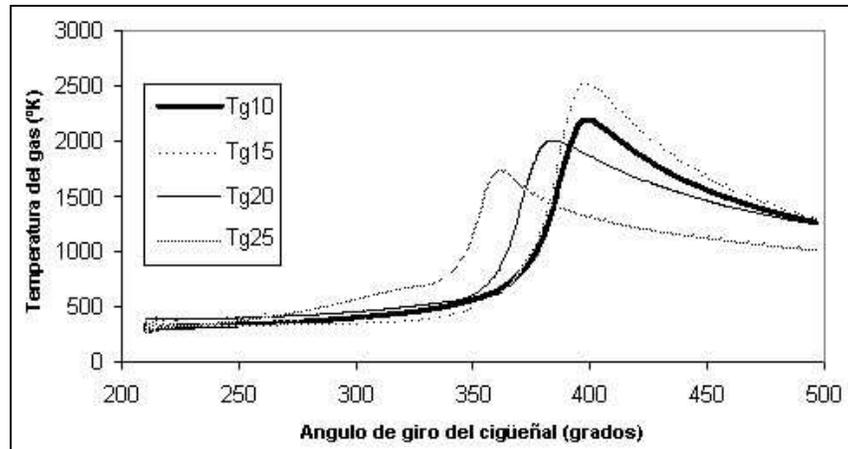


Figura 9 Temperatura instantánea del gas en el cilindro para gas natural con diferentes avances de chispa

la combustión del gas natural en trabajo, ya que gran parte del calor se va en los gases de escape incrementando su temperatura. Desde este punto de vista los mejores resultados con gas natural corresponden al mayor avance de chispa (25°), en el cual la temperatura es más baja al momento de abrir la válvula de escape (1.000 K).

Con avances de 10 y 15° se observa un incremento en la temperatura al momento de abrir la válvula de escape, adicionalmente con 10° se

aprecia un enfriamiento al comienzo, esto se puede explicar por la mala formación de mezcla, lo que permite el ingreso a la cámara de combustión de gasolina líquida que no se alcanza a quemar completamente por premezcla, de este modo el comportamiento se parece al de una inyección directa en cámara en la que hay también combustión por difusión.

En las figuras 10 y 11 se muestra el coeficiente convectivo instantáneo obtenido a través de

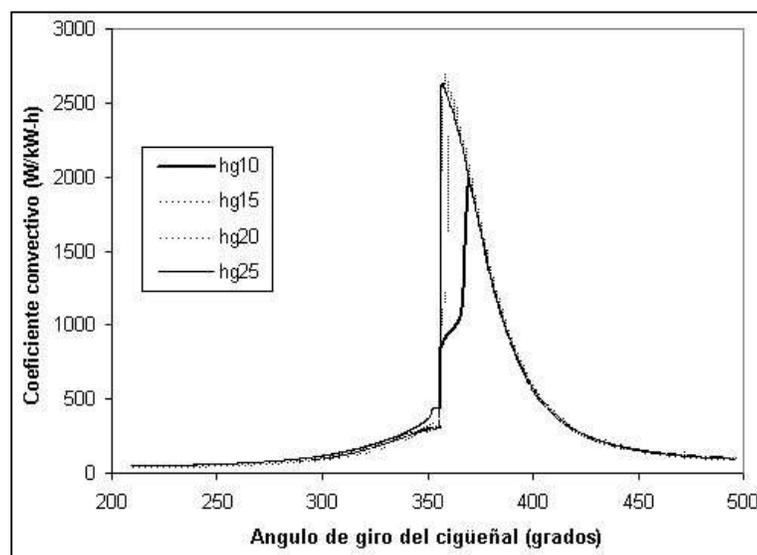


Figura 10 Coeficiente convectivo instantáneo (W/Kw-h) para gasolina con diferentes avances de chispa

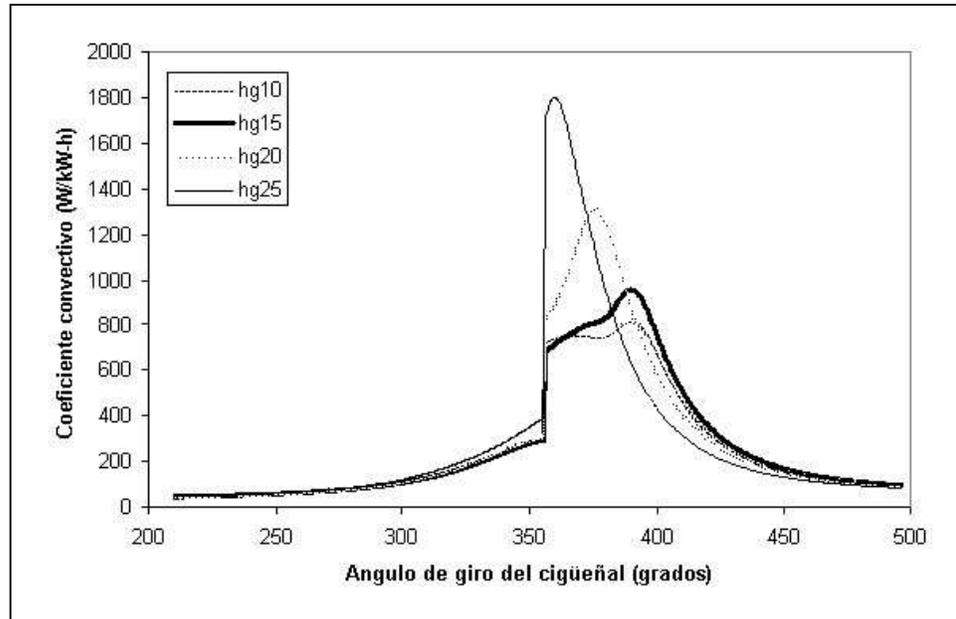


Figura 11 Coeficiente convectivo instantáneo (W/Kw-h) para gas natural de La Guajira con diferentes avances de chispa

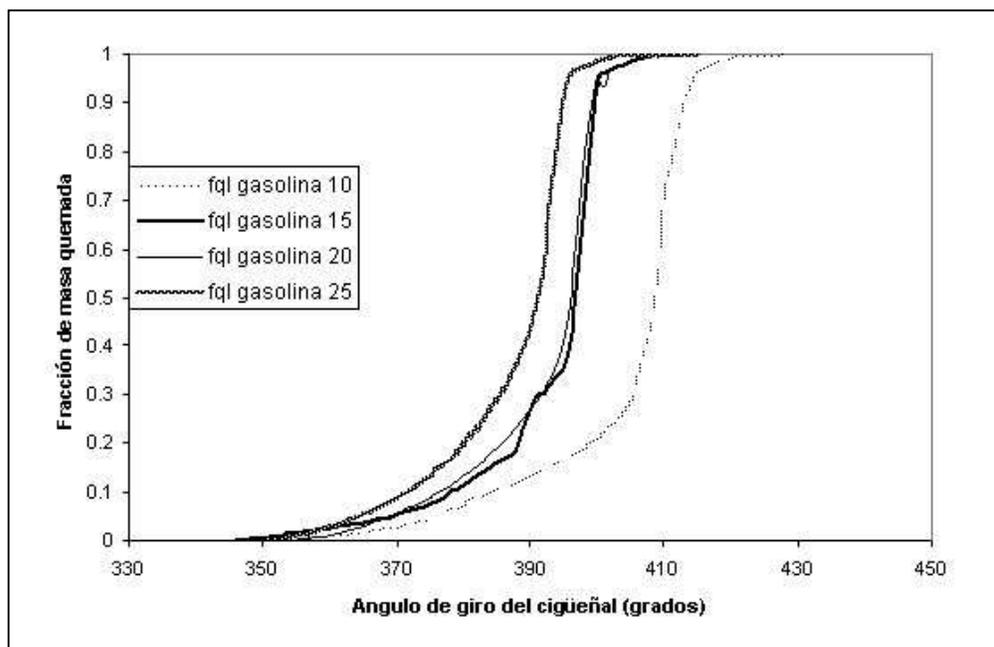


Figura 12 Fracción de masa quemada con gasolina para diferentes avances de chispa

la correlación de Woschni [9]. Se observa una disminución media alrededor del 28% al usar gas natural respecto a gasolina. No se tienen en cuenta efectos de radiación en la cámara, ya que este valor suele ser despreciable en motores de encendido provocado con llamas de premezcla en fase gaseosa [9].

En las figuras 12 y 13 se muestra la fracción de combustible quemado (x_b) para gasolina y gas natural de La Guajira respectivamente. X_b tiene un valor de cero antes de iniciar la combustión y un valor de 1 teóricamente al finalizar. Este valor está estrechamente relacionado con la velocidad de combustión [11].

De esta figura se infiere que a mayor avance más rápido termina la combustión, sin embargo la pendiente (velocidad de quemado) es similar independientemente del avance.

De las figuras 12 y 13 se infiere que para las condiciones de operación del motor, el gas natural presenta menor velocidad de quemado, lo que hace que la duración de la combustión sea mayor con gas natural (143° de giro de cigüeñal para un avance de 10°) que con gasolina (67° de giro de cigüeñal para el mismo avance de chispa). Para obtener una velocidad de quemado similar es ne-

cesario utilizar grandes avances con gas natural. Con un avance de 25° se obtiene un ángulo de duración de la combustión de aproximadamente 76°, que equivale al 12% más duración que con el avance recomendado por el fabricante del motor para gasolina (67°). Con un avance pequeño, por ejemplo 10°, se observa que al momento de abrir la válvula de escape (500° de giro de cigüeñal), todavía es posible que se esté quemando parte del gas natural, lo que puede dar lugar a problemas de origen térmico en el sistema de escape, temperaturas de escape elevadas y rendimientos de conversión de combustible bajos.

Asumiendo que la combustión inicia cuando se ha quemado el 1% del combustible total, o lo que es lo mismo, cuando se ha liberado el 1% del calor total, podemos determinar el periodo inicial de combustión o primera fase de combustión laminar, definido como la diferencia en grados de cigüeñal o en tiempo que transcurre desde que salta la chispa hasta que inicia la combustión turbulenta o principal. En la tabla 4 se comparan estos valores para gas natural de La Guajira y gasolina en los avances de chispa extremos (10 y 25°). Los resultados sugieren que el mejor funcionamiento del motor se logra con un avance de 10° para gasolina y un avance

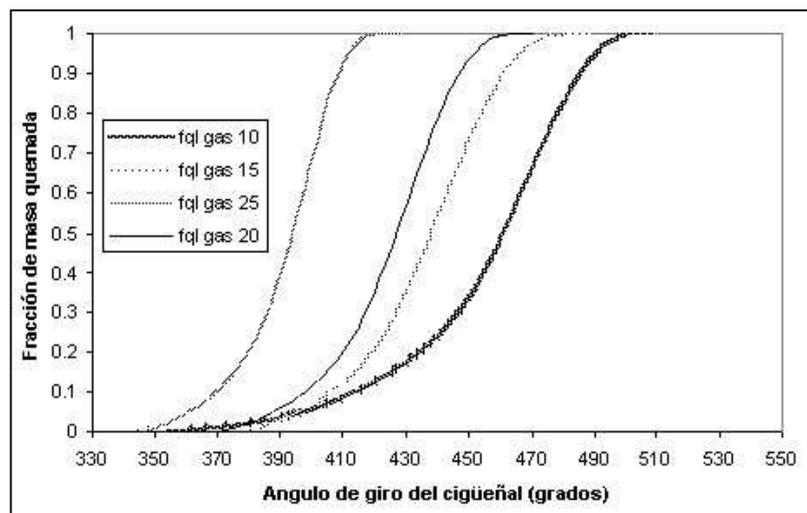


Figura 13 Fracción de masa quemada con gas natural de La Guajira para diferentes avances de chispa

Tabla 4 Periodo de desarrollo de llama laminar para gas natural de La Guajira y gasolina

<i>Avance</i>	<i>Gas natural</i>		<i>Gasolina</i>	
	<i>Grados</i>	<i>Tiempo (ms)</i>	<i>Grados</i>	<i>Tiempo (ms)</i>
10	20	3,7	8	1,48
25	15	2,7	20	3,7

de 25 para gas natural de La Guajira. Si se deja constante el avance en ambos combustibles se puede duplicar el periodo de desarrollo de llama laminar, produciendo mayor duración del proceso de combustión. El periodo de desarrollo de llama laminar de la gasolina con un avance de 25° es grande porque a esas condiciones la presión y la temperatura en el cilindro son bajas aún.

El gas natural, cuya estructura química es muy compacta, y su primera fase de la combustión es endotérmica [11], tiene una velocidad de combustión laminar del orden de la mitad que la gasolina, y no incrementa con la temperatura en la cámara [12], por lo tanto es necesario darle un avance mayor, ya que si se retrasa el avance, a pesar de tener mayores presiones y temperaturas en el cilindro, no hay tiempo suficiente para que se desarrolle completamente el proceso de combustión en el tiempo requerido.

Conclusiones

1. Los resultados en el motor Toyota Hilux permiten concluir que aunque se debe aumentar el flujo de gas natural al motor en un 20% para obtener la misma potencia que con gasolina el costo específico (\$/kW-h) sigue siendo del 50% favorable al gas natural.
2. La utilización de gas natural de La Guajira afecta las condiciones de operación del motor para la misma potencia que con gasolina. Se observó durante la experimentación que es necesario aumentar el rendimiento volumétrico del motor mediante la menor restricción que produce la mariposa del carburador.
3. Se presentó durante la experimentación la disminución en la eficiencia trabajando con gas natural producida por las pérdidas de calor

a los gases de escape. Esta disminución tuvo valor promedio de 21% respecto a gasolina, aunque fue más notorio para el régimen de funcionamiento 4.

4. Con base en el criterio del periodo de desarrollo de llama laminar, los avances que representan mejores condiciones de operación del motor fueron 10° para gasolina y 25 para gas natural de La Guajira. Aun así, se comprueba que esta primera fase de la combustión es del orden del doble para el gas natural (2,7 ms) respecto a la gasolina (1,48 ms).
5. Las presiones máximas de combustión son mayores con gasolina que con gas natural en el 12% para los avances recomendados.
6. La potencia indicada se reduce en torno al 12,5% con gas natural respecto a gasolina.
7. La temperatura instantánea en la cámara de combustión es inferior con gas natural que con gasolina. Sin embargo la temperatura de los gases de escape es mayor, lo que indica la disminución en el rendimiento de conversión de combustible.
8. El coeficiente de transferencia de calor convectivo es inferior alrededor del 28% con gas natural que con gasolina.
9. La duración de la combustión es mayor con gas natural que con gasolina. En los avances recomendados este valor está alrededor de 12%, pero puede llegar a ser el doble para avances extremos.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al Comité para el Desarrollo de la Investigación

(CODI) por financiar el proyecto “Gas Natural Comprimido para uso vehicular en el Valle de Aburrá. Fase I”, que dio origen a este artículo. Nuestro agradecimiento al ingeniero Álvaro Delgado Mejía por su gran colaboración en el diagnóstico experimental de la combustión y en la discusión de parámetros clave del artículo.

Referencias

1. Agudelo, John R. et al. “Influencia de la configuración del *kit* de conversión en el desempeño mecánico-ambiental de un motor de encendido provocado bicom bustible”. *Revista Facultad de Ingeniería*, N°. 31. Universidad de Antioquia. 2004.
2. Castaño, Diego y G. Patiño. “Estudio de los factores que inciden en el desempeño de motores de encendido provocado (mep) convertidos a gas natural”. *Monografía Universidad de Antioquia*. 2003.
3. Acevedo, Carlos. “Estudio sobre la influencia 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”. *Monografía Universidad de Antioquia*. 2003.
4. Prueba piloto de Gas Natural Vehicular —GNV— UPME. Contrato N°. 173. Bogotá, Dic., 1998.
5. Agudelo, John R. et al. “Influencia de la tecnología de conversión sobre el comportamiento de motores de gasolina convertidos a gas natural”. En *Revista Ingeniería y Desarrollo*. N°. 11. Universidad del Norte. Barranquilla, Colombia. Enero-julio 2002, pp. 28-41.
6. Evans, R. L. y Blaszcczyk, J. “A comparative study of the performance and exhaust emissions of a spark ignition engine fuelled by natural gas and gasoline”. *Journal of Power and Energy, Instn Mech Engrs*, Vol. 211 Part D, 1997, pp. 39-47.
7. Montgomery, Douglas. *Diseño y análisis de experimentos*. Grupo Editorial Iberoamérica. México. 1991. pp. 589.
8. Agudelo, J. R. et al. “Aplicación de herramientas informáticas al diagnóstico de la combustión en motores”. En *Revista Facultad de Ingeniería*. N°. 22. Universidad de Antioquia. Colombia. Junio de 2001. pp. 106-115.
9. Heywood, John B., *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, Nueva York. 1988.
10. Muñoz T., Manuel y Francisco Payri. *Motores de combustión interna alternativos*. Sección de publicaciones de la ETSII de la Universidad Politécnica de Madrid. 1985.
11. Yoseffi D, et al. “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., *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Part D, Journal of Automobile Engineering (2000), 214 (D), pp. 383-393.
12. Jones, A. L y R. L Evans. “Comparison of burning rates in a natural-gas-fueled spark ignition engine”. *Transaction of the ASME, Journal of engineering for gas turbine and power*. Vol. 107. Octubre de 1985. pp. 908-913.