

Evaluación experimental de un motor encendido por chispa que utiliza biogás como combustible

Experimental evaluation of a spark-ignited engine using biogas as fuel

Juan Miguel Mantilla Gonzalez¹, Borys Javier Aguirre Junco² y Luis Andres Sarmiento Pinilla³

RESUMEN

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron como combustibles diferentes mezclas de CH₄ y CO₂, las cuales se introdujeron en un motor encendido por chispa al que se le acopló un conjunto de dispositivos que permitieron el adelanto de la chispa, el suministro de gas y la medición del consumo del mismo. Se realizaron pruebas al motor en banco con el fin de conocer la variación en los principales parámetros de operación y emisiones. Los resultados muestran que al aumentar el porcentaje de CO₂ en la mezcla aumenta el ángulo de adelanto de la chispa, disminuye la potencia y el torque máximo, y se pueden reducir, hasta en 90% en algunos casos, las emisiones en el escape cuando las mismas se revisan siguiendo la Resolución 1015 de 2005 expedida por el DAMA. Como otro resultado se logró reconocer los principales componentes a tener en cuenta cuando se convierte un motor de este tipo para funcionamiento con combustibles gaseosos.

Palabras clave: biogás, combustible gaseoso, metano, motor de combustión interna, emisiones.

ABSTRACT

Different CH₄ and CO₂ mixtures were used as fuel in this work; they were fed into a spark-ignited engine equipped with devices allowing spark advance, gas delivery and gas consumption to be measured. Engine bench-tests revealed changes in the main operation parameters and emissions. The results showed that increasing CO₂ percentage in the mixture increased the spark angle, reduced maximum power and torque and reduced exhaust emissions (by 90% in some cases) when DAMA resolution 1015/2005 was applied. The main components to be considered when an engine of this type operates with gas fuel were also recognised.

Keywords: biogas, emission, gaseous fuel, internal combustion engine, methane.

Recibido: marzo 15 de 2008

Aceptado: junio 23 de 2008

Introducción

Después del Protocolo de Kyoto, el interés en el aumento de la producción de energía por medios alternativos dentro del consumo primario de energía mundial ha ampliado significativamente la búsqueda en la disminución de la contaminación atmosférica y los cambios climáticos generados por el consumo de combustibles fósiles en los últimos cincuenta años (MacLean y Lave, 2003). Colombia ha estado trabajando en la investigación de combustibles alternativos, en la masificación del gas natural vehicular (GNV), la utilización de alcohol carburante y el desarrollo de proyectos alrededor de la biomasa, esta última con buenas posibilidades en el país gracias a la gran actividad agrícola existente.

Desde los años ochenta, en Colombia se han instalado en forma masiva biodigestores para producir biogás y abono de excelente calidad a partir de la descomposición anaeró-

bica de residuos orgánicos procedentes de la industria agrícola (IIT, 1983). La información existente en torno a la implementación del biogás como combustible en motores de combustión interna encendidos por chispa es reducida, limitándose principalmente a anotaciones técnicas sobre el procedimiento de conversión para funcionamiento con el nuevo combustible (Siripornakrachai y Sucharitakul, 2007; ISAT y GTZ, 2008; Fischer *et al.*, 2008). El biogás ha sido utilizado como combustible en motores de combustión interna encendidos por chispa desde la crisis energética en los años setenta. Numerosos estudios apuntan a que existe viabilidad técnica al utilizar este combustible como reemplazo de los combustibles fósiles. Esta viabilidad se da al comparar parámetros de operación y emisiones contra el funcionamiento de los mismos motores con combustible tradicional, en este caso gasolina. Los principales resultados en este aspecto se pueden resumir en: (1) disminución de la relación aire-combustible estequiométrica, empobrecimiento de mezcla (Karim y Wierzba, 2002); (2) disminución de

¹ Ingeniero mecánico, Universidad Industrial de Santander, Colombia. M.Sc., Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Colombia. Candidato a doctor, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. jmmantillag@unal.edu.co

² Ingeniero mecánico. Estudiante de M.Sc., Ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. bjaguirrej@unal.edu.co

³ Ingeniero mecánico, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Ingeniero, FUNDIKOM Ltda. asarmiento@fundicom.com.co

la temperatura y la presión máxima en el proceso de combustión a medida que aumenta el CO₂ en el biogás (Huang y Crookes, 1998, 1998-2); (3) reducción de la potencia al freno y aumento de las emisiones específicas (Midkiff, Bell, Rathnam y Bhargava, 2001); (4) descenso en la eficiencia térmica al freno (Huang y Crookes, 1998, 1998-2; Midkiff, et al., 2001); (5) aumento leve de la emisión de monóxido de carbono e hidrocarburos sin quemar (Midkiff et al., 2001); (6) disminución en la velocidad turbulenta de quemado que causa mayor duración de la combustión (Huang y Crookes, 1998; Roubaud et al, 2002; Roubaud y Favrat, 2005); (7) aumento considerable en el consumo específico de combustible, aún mayor si se requiere que la potencia de salida sea similar a la obtenida con gasolina (Crookes, 2006).

Ante el enorme potencial que pudiera tener la unión de la producción de biogás con la generación *insitu* de energía eléctrica, surge el interés por desarrollar el presente trabajo, esperando conocer los alcances y restricciones cuando se utiliza este biocombustible en un motor.

El desarrollo de la investigación consiste en utilizar tres mezclas diferentes de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) como combustible, seleccionadas según la composición que comúnmente se presenta en el biogás obtenido en un biodigestor (IIT, 1983; Duque, Galeano y Mantilla, 2006). Estas mezclas fueron fabricadas en laboratorio y certificadas por el mismo, debido a la imposibilidad de tener la producción de biogás cerca del motor. Además se utiliza un motor de combustión interna de cuatro tiempos, monocilíndrico, encendido por chispa, refrigerado por aire, y acondicionado para variar el ángulo de encendido y para realizar las mediciones correspondientes de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC1930 (Icontec, 2001). Se desea ver el efecto de los diferentes combustibles sobre parámetros de operación y emisiones como: torque, potencia, consumo horario y específico de combustible, eficiencia térmica, emisiones de monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO₂) e hidrocarburos sin quemar (HC), principalmente. Se presenta entonces inicialmente, el montaje experimental en detalle. Posteriormente se enseñan los resultados obtenidos para las pruebas realizadas, y se finaliza con las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

Montaje experimental

Para la realización del experimento sobre el motor se sigue la norma NTC1930 [Icontec 2001], la cual es una prueba de potencia máxima, es decir, con mariposa totalmente abierta. Se utiliza un motor monocilíndrico de aspiración natural marca Briggs-Stratton, que posee una relación de compresión de 7,5 que no se modifica. Inicialmente se efectúan pruebas con gasolina para encontrar la línea base del motor. Luego se instala el encendido con distribuidor a cambio del encendido magnético con que cuenta originalmente el equi-

po, para posteriormente llevar a cabo pruebas con gasolina para verificar la correcta instalación del mismo. A continuación se instala el sistema de alimentación de gas mostrado en la Figura 1 y se hacen las pruebas para el motor funcionando con este combustible, bajo tres composiciones de metano (CH₄) (50%-90%) y CO₂ (10%-50%).

Las variables que se miden en el experimento son: carga sobre el motor, consumo de combustible, consumo de aire, temperatura de gases de escape, velocidad de giro del motor, ángulo de adelanto de chispa, humedad relativa ambiente, temperatura ambiente y presión atmosférica.

Cuando se trabaja con gas se requiere para la medición del consumo de combustible un contador doméstico de diafragma y un acumulador, ya que el flujo que entrega el cilindro a presión atmosférica no es suficiente para el funcionamiento del motor. Para el consumo de aire se utiliza un tanque diseñado para este propósito, el cual posee una boquilla de entrada estandarizada y calibrada.

El motor se instala sobre un freno hidráulico marca GO Power que posee una celda de carga, un tacómetro y una válvula para la regulación del caudal de agua. Para el adelanto de la chispa se emplea una pistola estroboscópica marca Alltest modelo 1100, y para la medición de los gases de escape el equipo Sun MGA 1400, que lee la composición molar de monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO₂), oxígeno (O₂) e hidrocarburos sin quemar (HC).

Los gases utilizados son suministrados por la empresa AGAFANO S.A. División Gases Especiales, en cilindros de 1 metro cúbico, a una presión de 5.000 kPa. Se implementa entonces un sistema de reducción de presión en dos etapas para evitar el congelamiento del gas en la expansión hasta presión atmosférica en la admisión (ver Figura 1).

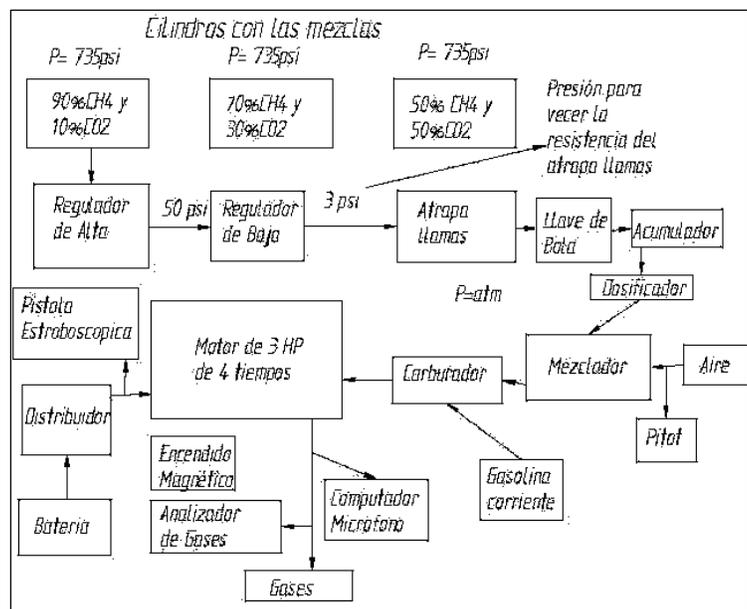


Figura 1. Esquema del montaje para las pruebas del motor monocilíndrico

Sistema de alimentación de gas

A continuación se mencionan las partes que fueron montadas y que componen el sistema de alimentación de gas al motor (ver Figura 1): cilindro, regulador de alta presión, regulador de baja presión, válvula de bola, válvula antirretorno, contador, acumulador, surtidor en el carburador.

Las mezclas de CH₄ y CO₂ fueron adquiridas en cilindros a alta presión (5.000 kPa). Sin embargo el suministro de gas al motor se debe hacer a presión atmosférica para evitar un efecto de sobrealimentación. Por lo anterior se corre con el riesgo de congelamiento del CO₂ debido a la reducción drástica de presión. Para evitar este efecto, se instalan dos reguladores de presión sobre la línea de alimentación de gas: el primero, de alta presión, reduce hasta 75 psi (517 kPa); y el segundo, de baja presión, opera hasta 3 psi (20,68 kPa), que es la necesaria para vencer la válvula antirretorno. Está válvula se instala como implemento de seguridad para evitar, en el caso de inicio de combustión en la línea de suministro de gas, que la llama avance en dirección al cilindro. Una válvula de bola se instala para realizar fácilmente el corte o suministro del flujo de gas que llega al contador y que luego, a la misma presión atmosférica, se almacena en el acumulador. En el contador se mide el consumo de gas en litros. El acumulador se adiciona al sistema de alimentación de gas para que el motor aspire el gas necesario para su funcionamiento sin llegar a generar sobrealimentación en la mezcla. El dosificador de gas llega al carburador por medio de una tobera que mezcla el gas del cilindro con el aire que viene del tanque. Esta tobera que mezcla el combustible con el aire se denomina mezclador.

El dosificador se elabora de manera similar al surtidor que porta el carburador para el funcionamiento con gasolina, pero con unas características que permitan la mayor aproximación posible a la relación aire-combustible estequiométrica para cada mezcla de gas utilizada.

Encendido

Los principales componentes del sistema de encendido son: batería, interruptor, bobina, distribuidor, platinos y bujía.

El sistema de encendido original no permite adelantar el ángulo de salto de la chispa debido a que cuenta con encendido magnético. Por esta razón se implementa un siste-

ma eléctrico de distribuidor junto con una batería y una bobina. Para controlar el encendido eléctrico se adiciona un interruptor entre la batería y la bobina.

El montaje del distribuidor en el banco de pruebas permite su giro para el adelanto y el atraso de la chispa. Además se construyen un par de poleas dentadas con relación 2 a 1, una de ellas en el distribuidor y la otra en el cigüeñal del motor, con el fin de transmitir el movimiento correctamente.

Combustible empleado

Un biodigestor puede producir biogás con diferentes proporciones en el contenido de metano y CO₂; el porcentaje de metano está entre 40% y 70%, dependiendo del material orgánico con el que se alimenta el biodigestor (Duque, Galeano y Mantilla, 2006). Porcentajes aun mayores de metano, hasta 95%, pueden lograrse eliminando el CO₂ para de esta forma mejorar el poder calorífico del biogás. Dado que esta variación en el porcentaje de metano implica el manejo de diferentes variables que no son del alcance de este trabajo, se opta por adquirir mezclas patronadas de CH₄ y CO₂ que simulen tres diferentes combinaciones de gases obtenidos en un biodigestor.

Las mezclas adquiridas presentan el análisis cromatográfico mostrado en la Figura 2.

Componente		Concentración solicitada	Análisis	Unidad	Variación abs.
Component		Order	Analysis result	Unit	Uncertainty
DIOXIDO DE CARBONO	CO ₂	50	50,0	%	± 1,2 %
METANO	CH ₄	BALANCE	BALANCE	%	±

Componente		Concentración solicitada	Análisis	Unidad	Variación abs.
Component		Order	Analysis result	Unit	Uncertainty
DIOXIDO DE CARBONO	CO ₂	30	30,3	%	± 0,8 %
METANO	CH ₄	BALANCE	BALANCE	%	±

Componente		Concentración solicitada	Análisis	Unidad	Variación abs.
Component		Order	Analysis result	Unit	Uncertainty
DIOXIDO DE CARBONO	CO ₂	10	10,3	%	± 0,2 %
METANO	CH ₄	BALANCE	BALANCE	%	±

Figura 2. Resultados de las cromatografías hechas a los gases combustibles empleados

Las propiedades de los gases empleados frente a la gasolina varían considerablemente desde el punto de vista del montaje, especialmente en que el gas es incoloro y sin olor, por

lo que la instalación de mangueras y reguladores debe ser estricta. Así mismo, el gas es totalmente seco y no presenta las características de refrigeración y lubricación que sí tiene la gasolina, con lo que el motor presenta condiciones diferentes de funcionamiento.

A continuación, en la Tabla 1 se muestra la densidad y el poder calorífico inferior (PCI) para la gasolina y las mezclas de gas empleadas en el motor.

Tabla 1. Densidad de las Mezclas y Poder Calorífico inferior (Giacosa, 1988; Obert, 2000, Ecopetrol, 2004)

Combustible	Densidad a 15,6 °C (kg/m ³)	PCI (kJ/kg)
Gasolina	739	46522,5
90% metano 10% CO ₂	0,8	38258,81
70% metano 30% CO ₂	1,037	22927,41
50% Metano 50% CO ₂	1,275	13319,73

El posible riesgo de tener mezclas con CO₂ a altas presiones y requerirlas posteriormente a condiciones atmosféricas para el funcionamiento del motor, es el congelamiento del CO₂ al expandirse antes de entrar a la cámara de combustión, lo que obliga a utilizar un calentador en los puntos donde se realice esta expansión; sin embargo, al hacer las pruebas, las mezclas a las condiciones de Bogotá no han presentado este problema por lo siguiente:

1. Son mezclas de CH₄ y CO₂ homogéneas y estables.
2. Empleo de dos etapas de reducción de presión (expansión).
3. Consumo relativamente bajo: de 0,4 kg/h a 1,2 kg/h (ver Figura 6)

Procedimiento de pruebas

El motor monocilíndrico tiene una potencia nominal, según el fabricante, de 3 hp (2,24 kW) a 3.600 rpm y condiciones atmosféricas de 15.6 °C y 101,325 kPa. Al acoplar un nuevo distribuidor es necesario ponerlo a punto, evitando de esta forma incluir fallas desde el principio del montaje, por esta razón inicialmente se adecúa y se mide el ángulo Dwell.

Para las tres mezclas de metano con CO₂ (figura 2) y la gasolina, se realizan pruebas de velocidad variable haciendo lecturas de consumo de combustible, presión de aire a la entrada del motor, carga, emisiones de gases y temperatura, humedad y presión ambiental.

Las pruebas de velocidad variable se llevan a cabo en Bogotá, en donde se tiene una presión de 0,73 atm, a 2.600 msnm, 18 °C y 60% de HR (humedad relativa) en promedio. Cuando el motor funciona con gasolina inicialmente, se obtienen las curvas de potencia y torque del motor, además del ángulo de salto de chispa adecuado, esto

con el fin de tener valores de referencia para comparación con los encontrados en el funcionamiento del motor con gas.

En todas las pruebas empleando mezclas de gas, el paso inicial para el funcionamiento del motor es el de encenderlo con gasolina para luego ajustar el ángulo de salto de la chispa a determinadas revoluciones. Con el motor en funcionamiento se corta el suministro de gasolina, se deja un tiempo antes de abrir la llave del gas, esperando que se vacíe la cuba del carburador, y cuando en el analizador de gas disminuye el porcentaje de CO drásticamente y el motor se encuentra operando regularmente, se toman las máximas y mínimas velocidades de giro alcanzadas con carga y sin carga, a diferentes ángulos de salto de chispa, para determinar inicialmente el intervalo de funcionamiento que permite cada mezcla de gases. Posteriormente se llevan a cabo las pruebas de velocidad variable encontrando el ángulo de máximo torque al freno (MTF) para las diferentes velocidades alcanzadas anteriormente.

Resultados

Potencia

Inicialmente se realizan pruebas sin hacer cambios al encendido magnético del motor, se obtiene una potencia máxima de 1,8 hp (1,34 kW) a 4.000 rpm (Figura 3). Posteriormente se instala un distribuidor que permite la modificación del ángulo de salto de la chispa. Esta modificación (montaje de un distribuidor y una correa para la transmisión del movimiento) implica la disminución de la potencia máxima hasta 1,6 hp (1,19 kW), tal como se muestra en la Figura 3 en la curva identificada como "EncDistri". Esta última curva es la que se toma como línea base para las comparaciones cuando el motor utiliza las mezclas de CH₄ y CO₂.

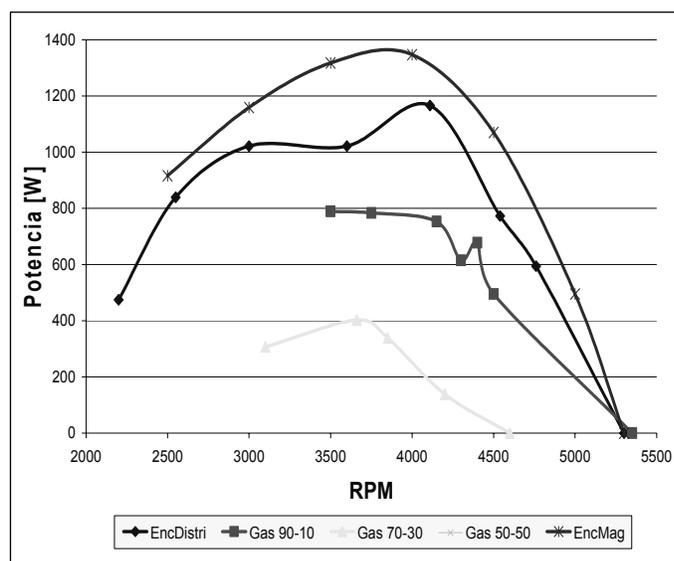


Figura 3. Potencia contra velocidad de giro del motor encendido con distribuidor para los diversos combustibles considerados

La reducción de la potencia, respecto al funcionamiento con gasolina, al emplear mezclas de CH_4 y CO_2 , es evidente al analizar la figura 3 y la tabla 2. Puede notarse además que el intervalo de velocidades de funcionamiento del motor al aplicar carga es menor al que se obtiene con gasolina, a pesar de ajustar el ángulo MTF para cada velocidad de giro, debido a que las mezclas de gas no tienen el suficiente poder calorífico para trabajar altas cargas a bajas velocidades de giro del motor. Por otro lado, se observa también que la curva de funcionamiento se desplaza hacia menores velocidades de giro a medida que aumenta la cantidad de CO_2 en la mezcla, ya que se necesita más tiempo para encender el combustible, y a altas velocidades de giro no se cuenta con ese tiempo a pesar de hacer un ajuste importante en el ángulo de salto de la chispa.

Tabla 2. Resultados obtenidos para potencia empleando los diferentes combustibles

Combustible	Potencia máxima (hp(kW))@rpm)	Mínima rpm con carga	Máximas rpm, carga cero	Ángulo de chispa para el MTF (grados)	Diferencia porcentual de la potencia con gasolina
Gasolina	1,58(1,18)@4.110	2.200	5.300	35	--
90% de CH_4	1,07(0,8)@3.500	3.500	5.300	46,5	32%
70% de CH_4	0,54(0,40)@3.660	3.100	4.600	55	66%
50% de CH_4	0,06(0,045)@2.900	2.300	3.000	58	96%

En el funcionamiento con la mezcla 50% de CH_4 y 50% de CO_2 el arranque en frío del motor no es difícil, contrario a lo que se piensa. La máxima velocidad de giro que se consigue es de 3.100 rpm para varios ángulos de salto de chispa. Al intentar frenar el motor su velocidad de giro cae rápidamente hasta llegar a apagarse, es decir, no tiene un funcionamiento estable bajo carga. La lectura de carga apenas fue la mínima que se puede observar en la escala del e-quipó empleado.

Es de anotar que los datos obtenidos reportados para la prueba de potencia fueron ajustados utilizando una corrección por condiciones atmosféricas tal como lo recomienda SAE (Society of Automotive Engineers) en su norma SAE J1349. Los resultados para pruebas hechas a presiones atmosféricas diferentes a la estándar deben ajustarse a ésta, en donde se ha convenido que el aire seco a 15,6 °C (60 °F) y 76 cm de Hg. (29,92 in Hg) represente las condiciones a nivel del mar o estándar.

Al realizar la corrección puede decirse que la potencia producida por el motor de cuatro tiempos queda dependiendo de las condiciones atmosféricas requeridas para que el motor funcione, si el motor trabaja en una región con presión barométrica baja habrá una reducción de la potencia producida, y análogamente, si la temperatura del aire que entra en el motor es elevada la potencia producida será menor (Obert, 2000).

Torque

En la Tabla 3 y la Figura 4 se observa el comportamiento del torque para las diferentes mezclas de gases. El porcentaje de pérdida de torque respecto al funcionamiento con gasolina es 34% para la mezcla 90% de CH_4 y 10% de CO_2 , y del 68% para la mezcla 70% de CH_4 y 30% de CO_2 . La disminución del torque está ligada a la reducción de CH_4 en la mezcla, similar a lo que sucede con la potencia. Se muestra en la Tabla 3 el cambio en el MTF para los diferentes combustibles utilizados. La tendencia, como es de esperar, es la de aumentar este valor a medida que disminuye el CH_4 en la mezcla porque el tiempo necesario para iniciar la combustión debe ser mayor.

Tabla 3. Resultados obtenidos para el torque empleando los diferentes combustibles

Combustible	Torque máximo (N·m@rpm)	Ángulo de chispa para el MTF (grados)
Gasolina	3,25@3.000	35
90% de CH_4	2,15@3.500	46,5
70% de CH_4	1,05@3.660	55
50% de CH_4	0,15@2.900	58

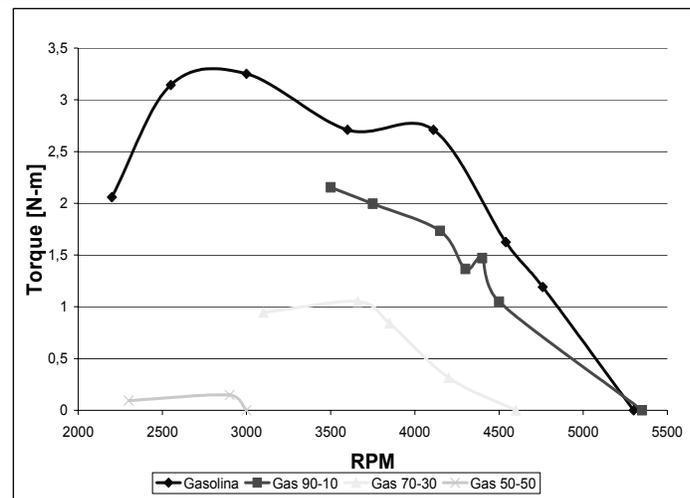


Figura 4. Torque contra velocidad de giro del motor encendido con distribuidor para las diferentes mezclas de gas y gasolina

Consumo de combustible

En la Figura 5 puede notarse que el consumo en masa para las mezclas de gas es ligeramente mayor que el de gasolina para todo el rango de revoluciones de funcionamiento del motor. Dado que la gasolina se encuentra en estado líquido y las mezclas en estado gaseoso, éstas últimas requieren altas presiones para poder almacenar el combustible necesario que permita tener la misma autonomía que con la gasolina. Otra razón tiene que ver con que el poder calorífico inferior de las mezclas de gases es progresivamente menor

que el de la gasolina, a medida que el CH₄ en la mezcla disminuye.

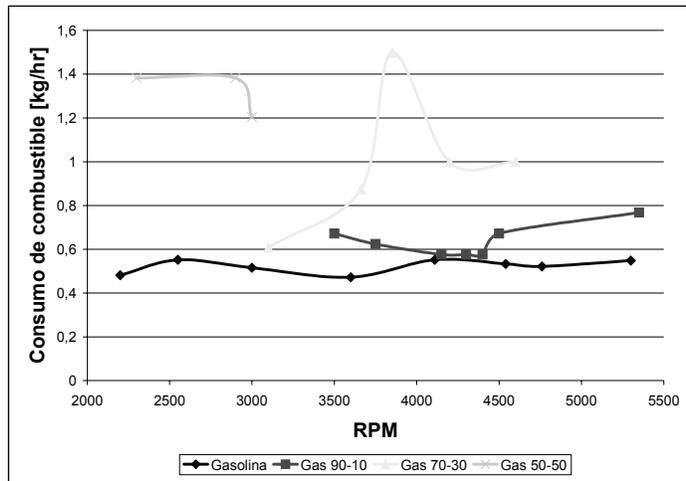


Figura 5. Consumo de combustible frente a revoluciones para el motor encendido con distribuidor para gasolina y las diferentes mezclas de gas

Si bien la Figura 5 muestra las diferencias en cuanto a consumo másico, se debe tener en cuenta que se están comparando combustibles con densidades muy diferentes. Para realizar un contraste más real se requiere analizar los datos de la Figura 6, la cual contiene la energía dentro del combustible que entra al motor. En esta figura se aprecia que, a pesar de que el consumo másico de combustible es mucho mayor para las mezclas de gas, comparado con gasolina, la energía de entrada apenas sobrepasa en algunos puntos a la energía de entrada de la gasolina. Este es un punto bien importante a tener en cuenta cuando se desean realizar las conversiones. Durante el desarrollo del presente trabajo el gas se introdujo al motor a presión atmosférica, lo que indica que para las condiciones de carga y velocidad del motor los datos reportados en la Figura 6 son los máximos disponibles, pero la energía de entrada es menor que para la gasolina. Entonces puede pensarse que una alimentación de gas combustible a presiones mayores que la atmosférica trae como consecuencia el igualar la energía de entrada al motor con respecto a la gasolina. De esta forma sería factible aumentar la salida de potencia y de torque.

Consumo específico de combustible

En la figura 7 se observa que las curvas de la mezcla 90% de CH₄ y la de la gasolina presentan la misma tendencia, con un mínimo valor hacia el punto de mayor potencia. Sin embargo, para la mezcla 70% de CH₄ y la de 50% de CH₄ este parámetro aumenta considerablemente, como se muestra en la misma figura. Los resultados indican que para obtener un kW en la salida del motor se requiere más combustible a medida que se aumenta la cantidad de CO₂ en la mezcla, debido principalmente a la disminución en el poder calorífico inferior.

Eficiencia Volumétrica

En la figura 8 se puede ver que todas las curvas de eficiencia volumétrica disminuyen a medida que aumentan las revoluciones del motor, esto se debe principalmente a que a mayores velocidades no se tiene el tiempo suficiente para garantizar un llenado del cilindro.

Con la implementación de las mezclas de gases la eficiencia volumétrica disminuye considerablemente, debido a que el combustible en estado gaseoso ocupa el espacio del aire, formando un bloqueo e impidiendo que este entre en mayor cantidad al motor.

Relación aire-combustible

La relación aire-combustible estequiométrica para los combustibles utilizados se presenta en la Tabla 4.

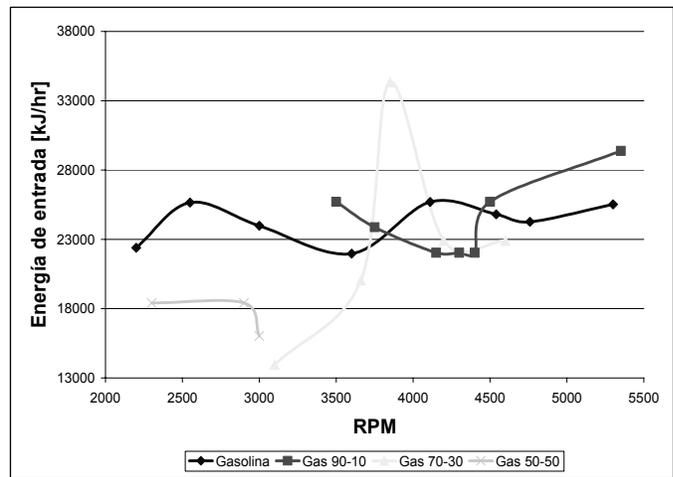


Figura 6. Energía de entrada al motor para los diferentes combustibles

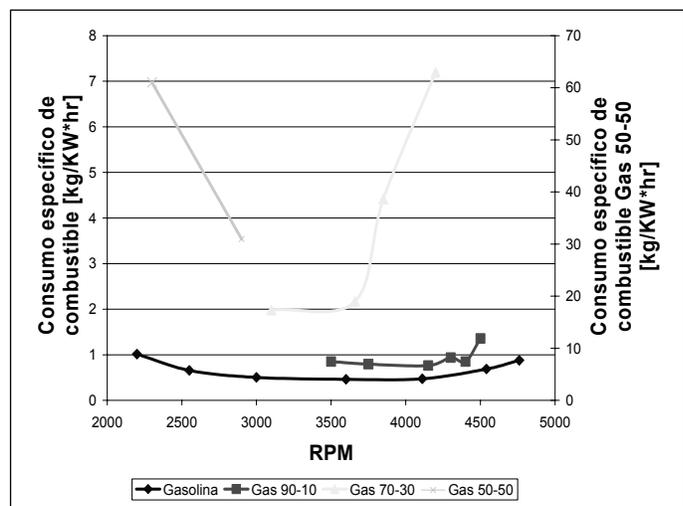


Figura 7. Consumo específico de combustible. La mezcla 50-50 se lee en el eje secundario

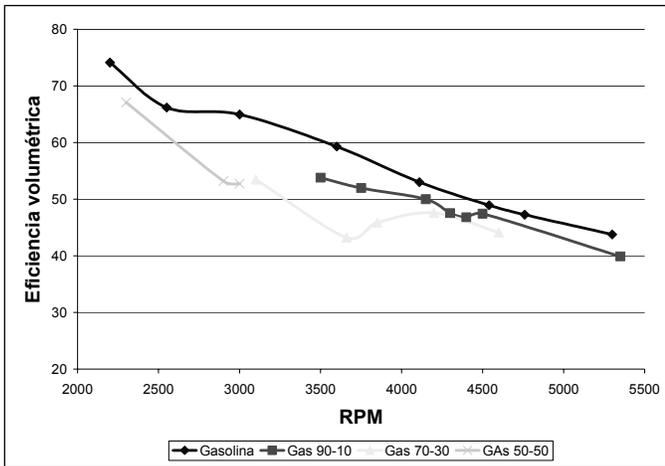


Figura 8. Eficiencia volumétrica frente revoluciones para el motor funcionando con gasolina y las diferentes mezclas de gases y encendido con distribuidor

Tabla 4. Relaciones estequiométricas en masa y en volumen para diferentes combustibles

Combustible	Relación A/F en volumen	Relación A/F en masa-
Gasolina	59,5	15,1
100% de CH ₄	9,5	17,2
90% de CH ₄	8,56	13,2
70% de CH ₄	6,6	7,9
50% de CH ₄	4,76	4,6

La relación aire-combustible se calcula como la razón entre la masa de aire que entra al motor y la masa de combustible, para una condición de carga y velocidad específica. Es importante conocerla, sobre todo para tener en cuenta el comportamiento de las emisiones, pero por sí sola no dice mucho. Al relacionar este parámetro con los valores descritos en la Tabla 4, se obtiene lo que se conoce como relación aire-combustible equivalente. Este valor muestra de forma más clara la región (mezcla rica, pobre o estequiométrica) donde se encuentra funcionando el motor. Es así como la Figura 9 presenta el comportamiento de la relación aire-combustible equivalente. Los valores mayores que 1 representan mezcla pobre, es decir, con mucho aire y poco combustible; los valores iguales a 1 equivalen a funcionamiento cerca del punto estequiométrico; y los valores menores que 1 significan funcionamiento con mezcla rica. Se puede observar en esta figura que, excepto en un punto para la mezcla 70% CH₄, el motor estuvo correctamente ajustado para funcionar con los diferentes combustibles, estableciendo un intervalo de trabajo para la relación aire-combustible equivalente entre 0,9 y 1,2.

Gases de escape

A continuación se presentan las figuras que muestran el cambio en las emisiones de HC, CO, CO₂ y O₂ cuando varían las condiciones de velocidad del motor. Para cada emisión se incluyen

dos figuras; la primera contiene el valor de la emisión volumétrica reportada por el analizador de gases, mientras que la segunda señala la emisión másica específica, es decir, por unidad de potencia. Esta segunda figura es la que permite una comparación real entre los diferentes combustibles.

En la Figura 10 se observa en general que la emisión de hidrocarburos sin quemar es mayor cuando el motor utiliza gasolina como combustible. Sin embargo, al analizar la información de la figura 10-1 esto cambia totalmente. La emisión específica es menor únicamente para la mezcla con 90% de CH₄, para los dos otros casos es mayor para los mismos intervalos de velocidad. Eso quiere decir que por cada unidad de energía la emisión másica de HC aumenta a medida que también lo hace el contenido de CO₂ en las mezclas con 70% y 50% de CH₄.

Al hacer los cálculos correspondientes a cuánto carbono del combustible se convierte en HC, CO y CO₂, se encuentra lo mostrado en la tabla 5. A medida que aumenta el contenido de CO₂ en las mezclas gaseosas, más carbono se convierte en CO₂, teniendo en cuenta que la potencia de salida va a disminuir.

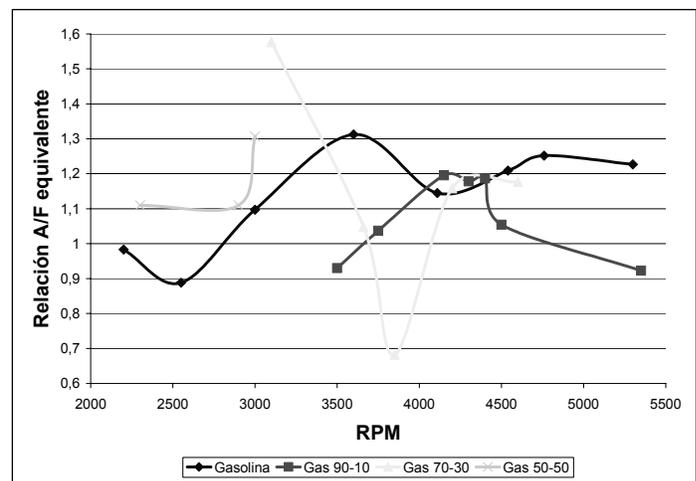


Figura 9. Relación aire-combustible equivalente

Tabla 5. Relación entre producción de emisiones a partir del carbono en el combustible y la potencia

Combustible	Masa promedio de carbono en combustible [kg]	Porcentaje del carbono en el combustible que se convierte en CO	Porcentaje del carbono en el combustible que se convierte en CO ₂	Porcentaje del carbono en el combustible que se convierte en HC	Potencia de salida promedio [W]
Gasolina	0,44	0,19	0,81	0,004	736,37
90% de CH ₄ 10% de CO ₂	0,39	0,09	0,91	0,002	685,87
70% de CH ₄ 30% de CO ₂	0,55	0,01	0,98	0,001	293,44
50% de CH ₄ 50% de CO ₂	1,04	0,005	0,99	0,0016	37,24

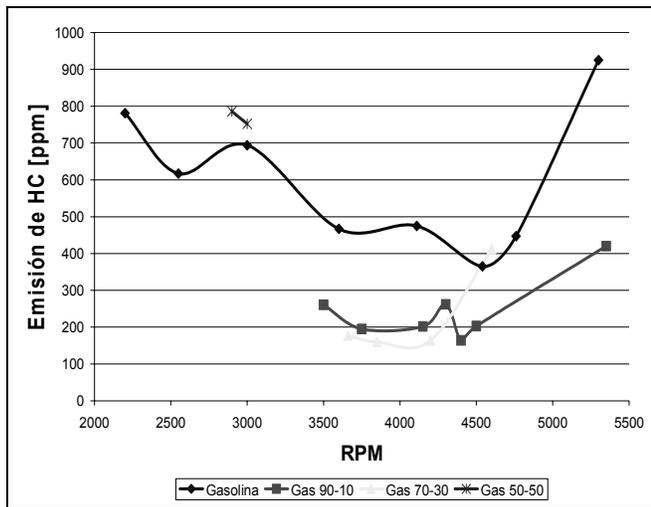


Figura 10. Partículas por millón de hidrocarburos sin quemar

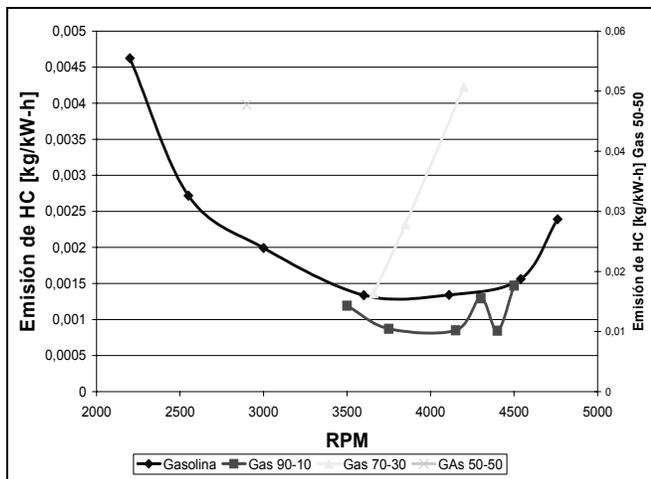


Figura 10-1. Emisión específica de hidrocarburos sin quemar

En la Figura 11 se presenta la emisión de CO. Este valor disminuye cuando se introducen las mezclas gaseosas. En la Figura 11-1 se observa un comportamiento similar, con pequeñas reducciones, indicando que el proceso de combustión es un poco más eficiente con las mezclas gaseosas. Se sabe que es de esta forma ya que, como se observa en la Figura 12-1, y en la Tabla 5, la emisión de CO₂ específica aumenta para estos combustibles, luego más carbonos del combustible se quemaron completamente. Ahora bien: definitivamente contribuye a la mayor emisión de CO₂ el hecho de que el combustible gaseoso tenga dentro de sus componentes esta especie. Sin embargo, se puede afirmar que la combustión es mejor, ya que la proporción de CO₂ en el escape está en mayor proporción que la cantidad de CO₂ en el combustible original.

La Figura 13 muestra la emisión de O₂ en el escape. Esta emisión, y la específica, tienen comportamientos muy similares a los mostrados para el CO₂. En la Figura 13-1 se refuerza lo mencionado anteriormente sobre la mejora en el proceso de combustión. La mayor emisión específica de O₂ para los combustibles gaseosos, sumado a la leve disminución en el

CO, contribuye a afirmar que se utiliza el oxígeno necesario para la combustión, cuya demanda es menor para los combustibles gaseosos, y por ende la emisión de O₂ es mayor. Este oxígeno adicional ayuda a que se forme más CO₂.

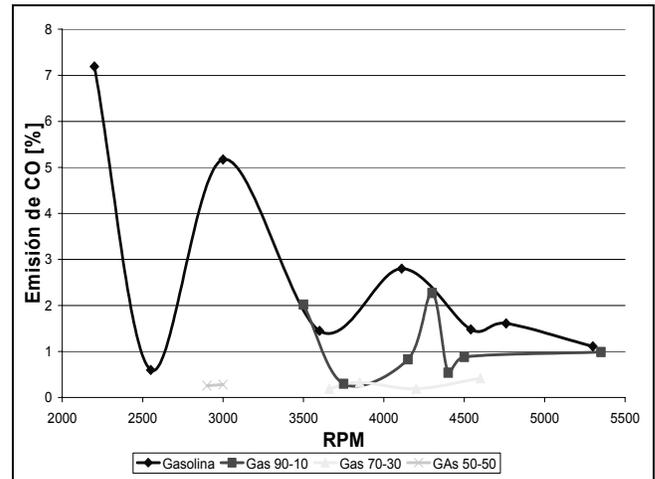


Figura 11. Porcentaje de CO

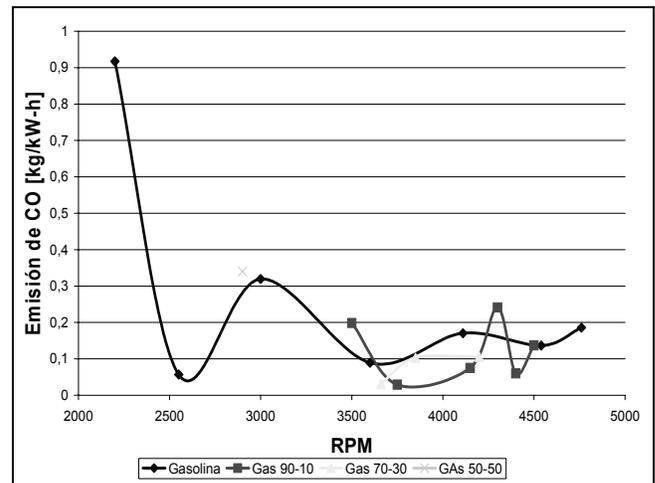


Figura 11-1. Emisión específica de CO

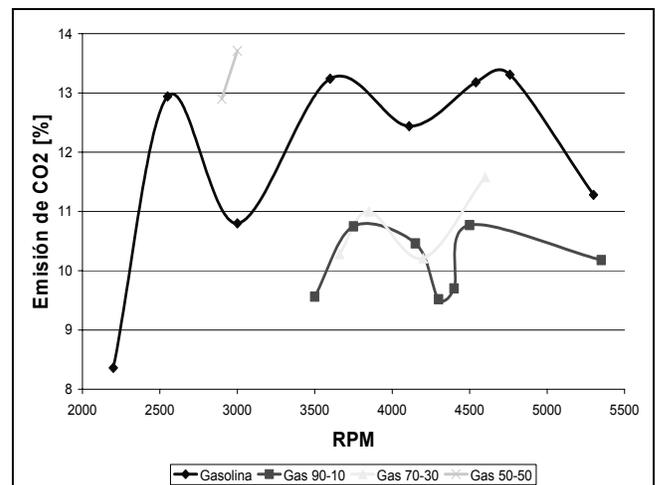
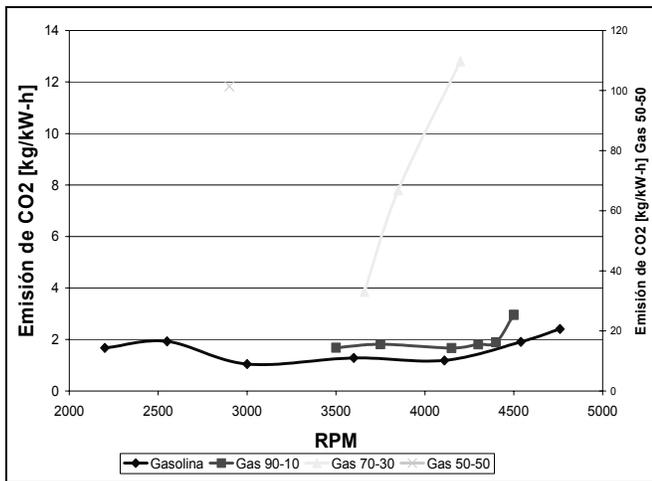
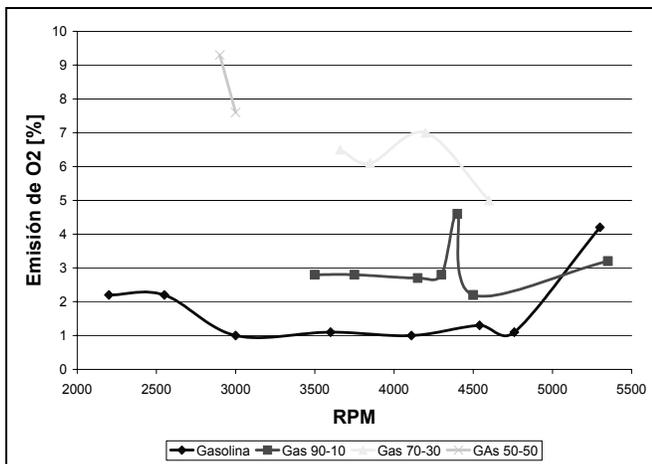
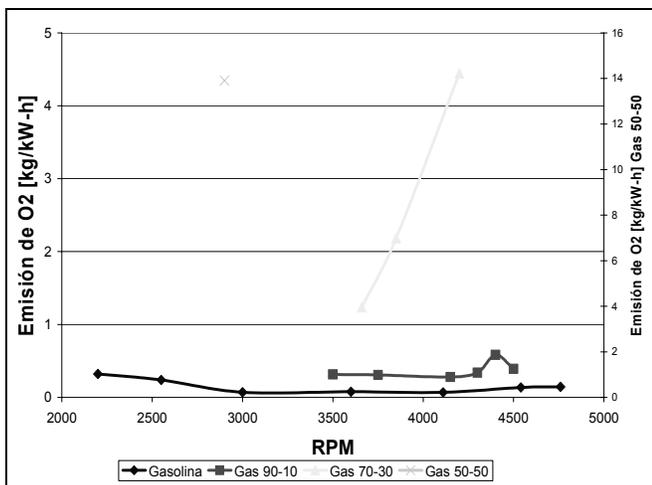


Figura 12. Porcentaje de CO₂

Figura 12-1. Emisión específica de CO₂Figura 13. Porcentaje de O₂Figura 13-1. Porcentaje de O₂

Según la Resolución 1015 de 2005 emitida por el DAMA [11], las emisiones del motor para funcionamiento con gasolina se encuentran en el límite de los valores máximos permitidos para %CO en volumen y para partes por millón de HC. Al implantar las mezclas de 90% y 70% de CH₄, los valo-

res de las dos variables en consideración están muy por debajo de los valores máximos permitidos, mientras que con la mezcla 50% de CH₄ la lectura de partes por millón de HC está por encima del valor límite, a diferencia del porcentaje de CO, que es tan solo 0,26% de CO, cuando el valor límite es de 4% de CO. Eso, además de validar de alguna forma el funcionamiento de este tipo de motores con combustibles gaseosos, respecto a la norma, muestra también la falta que hace una nueva revisión de esta legislación, ya que como pudo observarse, con tal tipo de mediciones no se puede establecer un punto de comparación real y definitivo.

Eficiencia térmica

La eficiencia térmica, mostrada en la Figura 14, relaciona la energía de salida del motor (en forma de potencia) con la energía de entrada al motor (Figura 6). La eficiencia térmica en general es menor para los combustibles gaseosos por efecto directo de la disminución de potencia.

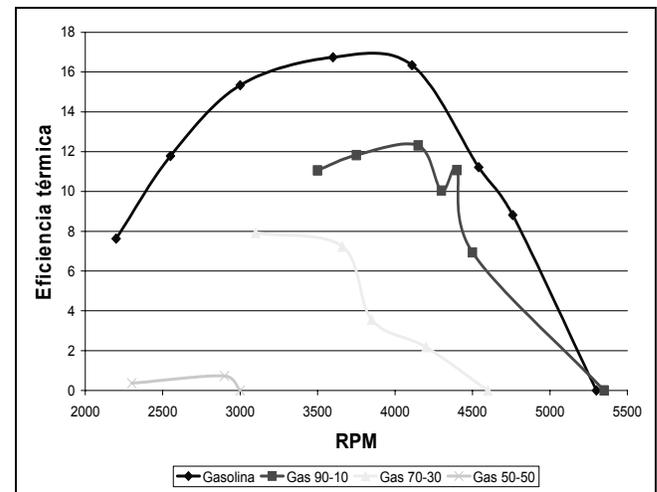


Figura 14. Eficiencia térmica

Ángulo de la chispa

Al implementar las diferentes mezclas de gas pudo notarse que la chispa para lograr el máximo torque (MTF) varía con las revoluciones y con la cantidad de metano presente en el gas. A medida que disminuye la cantidad de metano en la mezcla, el ángulo de salto de la chispa aumenta, teniendo un intervalo de 45° a 60° para la mezcla 50% CH₄, un intervalo de 46° a 55° para la mezcla 70% CH₄ y un intervalo de 40° a 47° para la mezcla 90% CH₄. En la Figura 15 se aprecian estos cambios.

De manera similar, para todas las mezclas de gas aumenta el ángulo de salto de la chispa con el aumento de las revoluciones del motor, como puede verse en la Figura 15. A medida que la velocidad de giro del motor aumenta, se requiere que el ángulo de salto de la chispa aumente también para lograr la mayor presión posible cuando el pistón se encuentre en el punto muerto superior, y así obtener el mayor torque de salida.

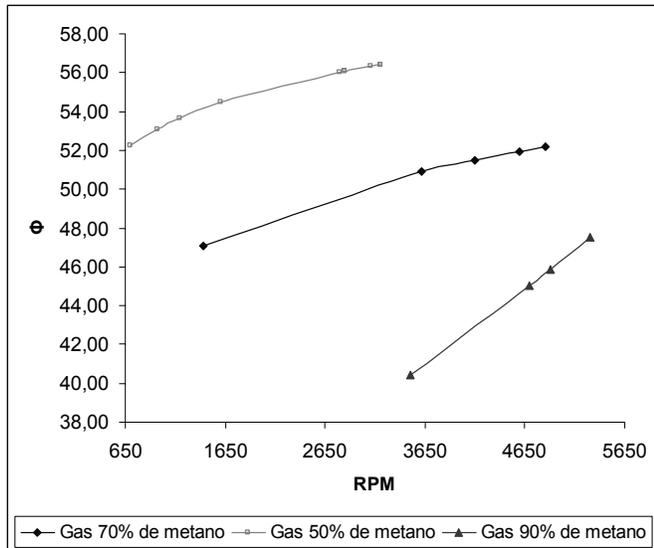


Figura 15. Variación del ángulo de encendido para las diferentes mezclas de metano y CO_2

Sin embargo, la variación del ángulo para una misma velocidad de giro y diferentes gases, es reflejo de la influencia del CO_2 en las condiciones de la cámara de combustión. El CO_2 consume energía de la combustión, disminuyendo la velocidad de propagación de la llama y la presión máxima alcanzada, lo que finalmente se traduce en un ángulo mayor para el punto de máximo torque.

Al realizar las pruebas implementando las mezclas de gas, es notable la posibilidad de lograr menores revoluciones que con gasolina (sin carga en el motor). Por ejemplo, con las mezclas de gas se alcanzaron 700 rpm como mínimo, mientras que con gasolina las mínimas revoluciones fueron 1.100 rpm. Este comportamiento se debe al estado gaseoso del combustible (CH_4 y CO_2), que a bajas revoluciones del motor tiene mayor facilidad de unirse con el aire y producir una mezcla más homogénea para la combustión.

Conclusiones

La reducción de la potencia, respecto al valor máximo obtenido con gasolina, al emplear 90% de CH_4 es de 32%, con la mezcla de 70% de CH_4 la reducción de potencia es el 66%.

Para la mezcla 50% de CH_4 se puede concluir que se debe operar en un intervalo de cargas y velocidades muy restringido, lo que hace que no tenga mucha funcionalidad.

La reducción de potencia y torque es causada en gran manera por la pérdida de energía producida a medida que aumenta el CO_2 .

La reducción de potencia y torque para las mezclas de CH_4 , a medida que aumenta el porcentaje de CO_2 , viene acompañada de una reducción en la velocidad de giro del motor y un aumento en el ángulo del salto de la chispa.

De ser obligatoria la utilización de un gas pobre en un motor

de combustión interna de cuatro tiempos similar al empleado en este trabajo, es recomendable hacer modificaciones permanentes en el motor, como el aumento de la relación de compresión, que permitiría tener una mayor potencia y así un mejor desempeño con gas, pero con la desventaja de no poder emplear nuevamente gasolina, ya que la mayor relación de compresión implica el uso de un combustible de mayor octanaje para evitar la detonación en el motor.

Aunque el consumo en masa por unidad de tiempo de combustible es mayor para el gas debido a su peso molecular, el costo lo hace atractivo para su aplicación como combustible alternativo. Debido a esto se puede pensar en aumentar la cantidad de combustible gaseoso introducido al motor para que sea mayor la potencia de salida.

El empleo de un gas pobre con contenidos de CO_2 hasta de 50% almacenado a altas presiones (735 psi) no presenta riesgo de condensación o congelamiento de dicho gas a condiciones atmosféricas de Bogotá (20 °C y 0.71 bar). Para lugares con mayor presión y mayor temperatura el riesgo es aun menor.

De acuerdo con la forma de medir decretada por el DAMA, la contaminación por gases (% CO , % CO_2 y ppm de HC) se reduce claramente con el empleo de un gas pobre como combustible. El único caso separado de este comportamiento es el combustible con 50% de CH_4 .

Para todos los combustibles empleados la eficiencia volumétrica del motor se reduce a medida que aumenta la velocidad de giro, debido a la carencia de un buen llenado del cilindro a esas velocidades. Esta situación es normal para todos los motores, pero existe una reducción mayor con el empleo de mezclas con alto contenido de CO_2 (30% y mayor).

Es importante a partir de los alcances de este trabajo, implementar mezclas de gas pobre en un motor de las mismas características a presiones superiores a la atmosférica, esperando conocer si las mezclas con altos contenidos de CO_2 pueden llegar a tener mayor viabilidad.

La mezcla para combustión es mucho más homogénea con combustibles gaseosos que con gasolina, es por eso que se pueden mantener más bajas revoluciones con gas natural que con gasolina; los datos obtenidos experimentalmente muestran que el motor se mantiene estable a unas 700 rpm con gas, pero con gasolina las mínimas velocidades alcanzadas fueron de 1.100 rpm.

Bibliografía

- Crookes R., Comparative bio-fuel performance in internal combustion engines., Biomass and Bioenergy, Vol. 30, 2006, pp. 461-468.
- Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA)., Resolución 1015 de 2005: Niveles permisibles de emisiones contaminantes., Disponible en: <http://www.ama.gov.co/>, consultado el 14 de marzo, 2008.

- Duque, C., Galeano, C., Mantilla, J., Plug flow biodigester evaluation., *Livestock Research for Rural Development*, Vol. 18, N° 04. Disponible en <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd18/4/duqu18049.htm>, consultado el 14 de marzo de 2008.
- Empresa Colombiana de Petroleos (ECOPETROL)., *Combustibles líquidos, gasolina Corriente.*, Diciembre 12, 2004. Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/>, consultado el 14 de marzo de 2008.
- Fischer, T., Krieg, A., Bird, C., Planning and construction of biogas plants for solid waste digestion in agriculture., disponible en www.kriegfischer.de/texte/planning%20and%20construction%20of.pdf, consultado el 14 de marzo de 2008.
- Giacosa, D., *Motores Endotérmicos.*, Editorial Omega, Barcelona. ISBN: 84-282-0848-4, 1988.
- Huang, J., Crookes, R., Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine., *Fuel* 77, No. 15, 1998, pp. 1793-1801.
- Huang, J., Crookes, R., Spark-ignition engine performance with simulated biogas—a comparison with gasoline and natural gas., *J. Inst. Energy*, Vol. 71, 1998-2, pp. 197-203.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC)., *Norma Técnica Colombiana NTC 1930: Vehículos automotores.*, Motores de combustión interna. Potencia neta., Bogotá, 2001.
- Instituto de Investigaciones Tecnológicas (IIT)., *Estudio sobre obtención de Biogás a partir de desechos orgánicos.*, Bogotá, 1983.
- ISAT, GTZ., *Biogas Digest, Volume 1: Biogas basics.*, Disponible en: www.gtz.de/de/dokumente/en-biogas-volume1.pdf, consultado el 14 de marzo de 2008.
- Karim, G., Wierzbka, I., *Methane-carbon dioxide mixtures as a fuel.* SAE Special Publications, 1992, No. 927, No. 921557, pp. 81-91.
- MacLean, H., Lave, L., *Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies.*, *Progress in energy and combustion science*, Vol. 29, pp. 1-69, 2003.
- Midkiff, K., Bell, S., Rathnam, S., Bhargava, S., *Fuel composition effects on emissions from a spark-ignited engine operated on simulated biogases.*, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 123, 2001, pp. 132-138.
- Obert, E., *Motores de Combustión Interna: Análisis y aplicaciones.*, Compañía editorial Continental, México, ISBN: 968-26-1035-4, 2000.
- Roubaud, A., Favrat, D., *Improving performances of a lean burn cogeneration biogas engine equipped with combustion prechambers.*, *Fuel*, Vol. 84, 2005, pp. 2001-2007.
- Roubaud, A., Roethlisberger, R., Favrat, D., *Lean burn cogeneration biogas engine with unscavenged combustion prechambers: comparison with natural gas.*, *Int. J. Applied Thermodynamics*, Vol. 5, No. 4, 2002, pp. 169-175.
- Siripornakrachai, S., Sucharitakul, T., *Modification and tuning of diesel bus engine for biogas electricity production.*, *Mj. Int. J. Sci. Tech.* Vol. 01, N°2, 2007, pp. 194-207.