

Influencia de la configuración del kit de conversión en el desempeño mecánico-ambiental de un motor de encendido provocado (MEP) bicomcombustible gasolina-gas natural vehicular

*John Ramiro Agudelo**, *Ricardo Moreno*** e *Iván Darío Bedoya****
(Recibido el 21 de abril de 2003. Aceptado el 18 de julio de 2003)

Resumen

Este artículo presenta los resultados de un estudio experimental realizado sobre un motor Toyota Hilux de 2.400 cm³ en el que se determinó la influencia de la modificación de varios factores (el tamaño del regulador, el tamaño del venturi de un mezclador fijo y su ubicación en ducto de admisión o sobre carburador) en los parámetros de operación mecánico-ambientales (consumo de combustible, rendimiento volumétrico, dosado relativo, emisiones de monóxido de carbono (CO) y emisiones de metano (CH₄)) del motor en cinco modos de operación diferentes (factor secundario).

Utilizando un diseño experimental multifactor y el análisis de varianza (tabla Anova) se evaluó estadísticamente el efecto que cada factor tuvo sobre la variación de cada una de los parámetros de operación, con la respectiva validación de los supuestos estadísticos de no autocorrelación y homoscedasticidad.

Los resultados mostraron una marcada influencia del tamaño del regulador y la ubicación del mezclador en el consumo de combustible y en la concentración de CO (proceso de combustión), mientras que el tamaño del venturi del mezclador afectó considerablemente la concentración de CH₄ (combustión incompleta).

----- *Palabras clave:* gas natural vehicular, emisiones, desempeño mecánico, conversión de motores, motores bicomcombustibles.

* Ingeniero Mecánico. Ph.D. en Termoeenergética. Miembro del Grupo Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Universidad de Antioquia. radian@udea.edu.co.

** Ingeniero Mecánico. Miembro del Grupo Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Universidad de Antioquia. erims080@udea.edu.co.

*** Estudiante de Ingeniería Mecánica. Universidad de Antioquia. Miembro del Grupo Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. eidbc490@udea.edu.co.

Influence of the configuration of conversion kit on the performance of a bifuel gasoline-vehicular natural gas spark ignition engine

Abstract

This article presents the results of an experimental study made on a Toyota Hilux 2.400 cm³ motor, for determining the influence on environmental-mechanical performance (fuel consumption, volumetric efficiency, equivalence ratio, the concentration of CO and CH₄) when the dimensions of the kit components are modified. The factors evaluated were: size of the regulator, diameter of the Venturi in a fixed mixer and its location (in the admission duct and on the carburetor). The motor was tested in five different operating conditions (secondary factor).

The effect of the statistic factor on environmental-mechanical performance was determined by using a multifactor experimental design and variance analysis. The respective validation of the statistic suppositions (no autocorrelation and homoscedasticity) complements the analysis.

The behavior of these variables showed a marked influence of the size of the regulator and the location for the mixer in the fuel consumption and in the concentration of CO (combustion process), while the diameter of the venturi mixer affects considerably the concentration of CH₄ (incomplete combustion).

----- *Key words:* natural gas for vehicles, emissions, performance, engines conversion, bifuel engines.

Introducción

La configuración correcta de un kit de conversión de un motor a gas natural en funcionamiento bicomcombustible ha sido de gran interés para investigadores, propietarios y empresas de conversión de vehículos. Los elementos más importantes que conforman el kit (mezclador, regulador y variador de avance) influyen directamente sobre el premezclado y posterior combustión de la mezcla aire-combustible, llegando a ser los gobernantes del proceso de encendido y combustión en el cilindro.

Como lo confirman varios investigadores [1-3, 8, 9] el mezclador tiene un efecto significativo sobre el desempeño de un motor convertido a gas natural en modo bicomcombustible. Un mezclador de venturi fijo puede producir una disminución en el rendimiento volumétrico hasta del 10% [8, 9] respecto al motor original, debido a la obstrucción que supone en la admisión. Dicha obstrucción puede ser influenciada por la geometría y ubicación del mezclador en el sistema de suministro de combustible del motor.

En un trabajo anterior, los autores habían detectado pérdidas de potencia del orden del 25% y disminución de la concentración de emisiones de CO en torno al 90% en un motor Toyota de 4.500 cm³ trabajando con gas natural vehicular en modo bicomcombustible [3].

La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) [4] observó diferencias en el consumo específico de combustible cercanas al 15% utilizando dos diferentes marcas de kits de conversión en un bus de transporte urbano.

Los comportamientos citados pueden haber sido influenciados por una mala selección del kit, por una mala ubicación del mezclador, o por una mala calibración del regulador o el mezclador.

Este artículo presenta los resultados de un estudio experimental realizado sobre un motor Toyota Hilux de 2.400 cm³ en el que se determinó la influencia de la modificación del sistema de suministro de combustible sobre los parámetros

de operación mecánico-ambientales del motor en cinco modos de operación diferentes.

Este trabajo permitió cuantificar la selección inadecuada de los elementos que conforman el kit, lo que conduce a un mal desempeño mecánico y ambiental que se refleja en pérdidas considerables de potencia y aumento de las emisiones contaminantes.

Los resultados que aquí se presentan pretenden mostrar que no basta con poner a punto el vehículo en vacío y que haya un aparente buen funcionamiento del motor, se deben medir las consecuencias de una mala regulación de la mezcla aire-gas natural en el desempeño global del vehículo.

Metodología

Para determinar la influencia de los elementos del sistema de suministro de combustible sobre los parámetros o variables de operación del motor, se seleccionaron como factores para modificar el tamaño del regulador, el diámetro del venturi del mezclador y la ubicación del mezclador en el ducto de admisión o sobre el carburador. La potencia desarrollada por el motor se utilizó como factor para observar la variación de los parámetros con el régimen de funcionamiento.

El análisis de desempeño mecánico se efectuó midiendo el consumo de combustible y de aire, el par, el régimen de giro y las temperaturas en cinco modos de operación del motor que intentaban reproducir las condiciones más frecuentes a las que este está sometido en ciudad. El diagnóstico de la combustión se realizó midiendo la concentración de monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄) en los gases de escape. Los experimentos se realizaron usando como línea base de comparación la operación con gasolina.

En las pruebas se utilizó gas natural de Guajira y gasolina con densidad de 0,7616 g/cm³ determinada en el Laboratorio de Crudos y Derivados de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Diseño experimental

Esta investigación pretende, a través de un diseño experimental multifactor, determinar cuáles de los factores elegidos tienen efecto estadísticamente significativo sobre el desempeño mecánico y ambiental de un motor convertido a funcionamiento bicomcombustible gasolina-gas natural.

La tabla 1 ilustra la designación de los factores y sus niveles en la experimentación:

En adelante la referencia de los niveles de cada factor se hará según la designación de la tabla 1. Por ejemplo, el mezclador con venturi de 34 mm de diámetro, se designará como Mezclador 1.

Los ensayos en motores de combustión interna alternativos se clasifican en cuatro grandes grupos [5]: control de calidad, homologación,

recepción y ensayos de investigación. En estos últimos, que corresponden a los que se realizaron en este trabajo, no se sigue una norma técnica específica, normalmente es consideración del investigador, basado en su experiencia y en la literatura, quien elige la manera como se deberán realizar. Aquí se ha seguido la metodología propuesta por Lapuerta *et al.* [6] quienes seleccionaron convenientemente cinco puntos de operación del motor en régimen estacionario del ciclo de conducción europeo para sus ensayos de investigación.

De acuerdo con el diseño experimental se designaron las ocho configuraciones posibles del sistema de alimentación de aire y combustible que se muestra en la tabla 2.

Las variables dependientes que se consideraron para caracterizar el desempeño mecánico fueron:

Tabla 1 Designación de los factores y sus niveles en la experimentación

| Factor | Característica nivel | | | Designación nivel |
|---------------------------|---|-------|----------|--------------------------|
| Tipo de mezclador | Diámetro venturi: 34 mm | | | Mezclador 1 |
| | Diámetro venturi: 39 mm | | | Mezclador 2 |
| Tipo de regulador | Rango de operación: 1.000-3.000 cm ³ Potencia máxima: 100 kW | | | Regulador 1 |
| | Rango de operación: 3.000-6.000 cm ³ Potencia máxima: 140 kW | | | Regulador 2 |
| Ubicación del mezclador | En ducto de admisión de aire | | | Ubicación 1 |
| | Sobre carburador | | | Ubicación 2 |
| Régimen de funcionamiento | Régimen de giro | Par | Potencia | Modo |
| | (rpm) | (N-m) | (kW) | |
| | 1.000 | 0 | 0,00 | 1 |
| | 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 2 Designación de configuraciones

| Número configuración | Designación | Factores y niveles | | |
|----------------------|-------------|--------------------|-------------------|-------------------------|
| | | Tipo de regulador | Tipo de mezclador | Ubicación del mezclador |
| 1 | C1 | 2 | 1 | 2 |
| 2 | C2 | 2 | 1 | 1 |
| 3 | C3 | 2 | 2 | 2 |
| 4 | C4 | 2 | 2 | 1 |
| 5 | C5 | 1 | 1 | 2 |
| 6 | C6 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | C7 | 1 | 2 | 2 |
| 8 | C8 | 1 | 2 | 1 |

- Consumo de combustible
- η_v (rendimiento volumétrico)
- Dosado relativo

Las variables consideradas para evaluar el desempeño ambiental fueron:

- Concentración en volumen de CO (%)
- Concentración en volumen de CH₄ (%)

Para cada configuración se determinaron los valores de las variables señaladas con el motor funcionando en cada uno de los regímenes mostrados en la tabla 1.

Se eligió la realización únicamente de dos réplicas debido a que cada medición en el motor se realizaba después de esperar un tiempo considerable de estabilización. De esta manera, las combinaciones posibles de los niveles y los factores ($2 \times 2 \times 2 \times 5 = 40$) fueron cuarenta y utilizando dos réplicas ($40 \times 2 = 80$), fueron en total ochenta corridas.

La evaluación del efecto que los factores tienen sobre cada una de las variables de caracterización (tres mecánicas y dos ambientales) se realizó empleando diseños experimentales multifactor basados en el análisis de varianza (tabla Anova) para cada variable dependiente (o de caracterización).

Además de determinar los factores que tienen efecto significativo sobre la variable dependiente, se presentan aquí los gráficos de las medias con sus intervalos de confianza para poder visualizar cómo interactúan los factores (tipo de mezclador, tipo de regulador, ubicación del mezclador y régimen de funcionamiento del motor) sobre las variables de caracterización (consumo de combustible, rendimiento volumétrico, dosado relativo, %CO y %CH₄).

La validación de los supuestos estadísticos se realizó con la ayuda de la figura de los residuos contra orden de aparición de los datos (*row number*), lo que permitió verificar la no existencia de tendencias de autocorrelación. La gráfica de residuos contra predichos permitió verificar la no existencia de indicios de heteroscedasticidad. También se realizó una verificación del supuesto de normalidad con la ayuda de: los estimados de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de Anderson-Darling [7].

Montaje experimental y equipos utilizados

Para lograr los objetivos propuestos en el diseño experimental, se hizo el montaje del motor en un banco de ensayos, el cual fue debidamente instrumentado para la obtención de las variables de desempeño seleccionadas.

En la figura 1 se aprecia el motor montado en banco de ensayos con su instrumentación.

En la tabla 3 se muestran las especificaciones técnicas del motor de ensayos empleado.

En la tabla 4 se describen con detalle los instrumentos y equipos de medición empleados y sus principales características.

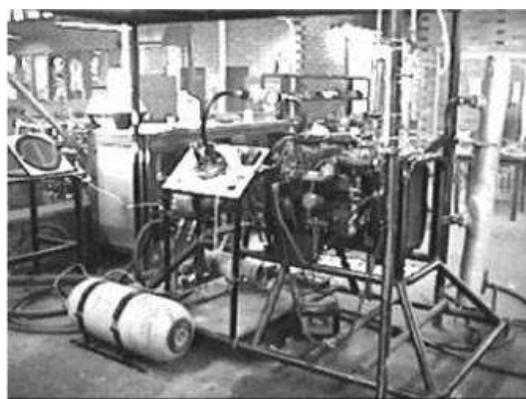


Figura 1 Montaje experimental del motor de ensayos

Resultados

En el desarrollo de la fase experimental, se presentó inestabilidad en el motor de ensayos trabajando con las configuraciones C1 y C5, lo que imposibilitó obtener valores de las variables en los diferentes modos de operación.

En la tabla 5 se muestran los valores obtenidos de las variables en la fase experimental.

Tabla 3 Especificaciones del motor Toyota Hilux

| | |
|---------------------|----------------------------|
| Referencia | 22R |
| Número de cilindros | 4 en línea |
| Cilindrada | 2.367 cm ³ |
| Alimentación | Carburador |
| Encendido | Convencional |
| Punto nominal | 75 kW y 185 Nm a 4.800 rpm |

Tabla 4 Instrumentación empleada en los ensayos

| | |
|---------------------------------|--|
| Freno dinamométrico | Marca: Go-Power System. 1978 d 512 Par máximo: 750 lb-ft Máxima potencia: 700 hp Resolución indicadora de par: 5 N-m |
| Medidor flujo de aire | Marca: Go-Power System Rangos: 10-3.400 lb/h Toberas de diámetros 0,5, 0,75, 1,183, 1,75, 2,75 y 4,5" |
| Medidor de flujo de combustible | Recipiente volumétrico Resolución de medida: 50 mL Rango de medida: hasta 550 mL |
| Variador electrónico de avance | Marca: BRC Modelo: Pegasus Italy |
| Regulador de presión (1) (2) | Marca: BRC DGM 50282 Regulador 1 Rango cilindrada/potencia: 1.000-3.000 cm ³ /100 kW Regulador 2 Rango cilindrada/potencia: 3.000-6 000 cm ³ /140 kW |

Tabla 4 (continuación)

| | |
|------------------------------|--|
| Medidor de flujo de gas | Marca: Elster. Tipo:turbina; qmin: 2 m ³ /h; qmax: 25 m ³ /hL; pmax: 4 bar; modelo: DM 25; resolución: 0,01 m ³ |
| Analizador de gases (Maihak) | <p>Marca: Ulnor 610</p> <p>Tecnología: infrarrojo no dispersivo</p> <p>Tipo de medida: en base seca</p> <p>CO 160 ppm; resolución 0,06% del CO absoluto,</p> <p>CO₂ 100 ppm 0,5% del CO₂ absoluto,</p> <p>CH₄ 470 ppm 2 ppm</p> <p>O₂ 10% vol. 0,1% de O₂ absoluto o 5% de la lectura</p> |
| Termocuplas | <p>Tipo: K</p> <p>Dimensiones: diámetro x longitud</p> <p>3,2 x 100 mm</p> <p>5 x 100 mm</p> <p>5 x 50 mm</p> <p>3,2 x 50 mm</p> |
| Mezclador (1) | <p>Diámetro de entrada de aire: 34 mm</p> <p>Apertura en la descarga de gas: 0,5-1 mm</p> <p>Material: aluminio</p> |
| Mezclador (2) | <p>Diámetro entrada de aire: 39 mm</p> <p>Apertura en la descarga de gas: 0,5-1 mm</p> <p>Material: aluminio</p> |
| Selector de termocuplas | <p>Marca: Shimaden</p> <p>Serie: KR16</p> <p>6 canales</p> |
| Indicador de temperatura | <p>Marca: Shimaden</p> <p>Serie: SD 15</p> |

Con el listado de datos de la tabla 5, se obtiene la tabla Anova para todas las variables (tabla 6).

La tabla Anova muestra cuál de los factores de variación tiene influencia significativa en la variación de las variables de desempeño (valor $P < 0,05$).

Se observa que el cambio en el diámetro del venturi del mezclador sólo tiene influencia significa-

tiva en las emisiones de CH₄, el tipo de regulador influye considerablemente en el consumo de combustible, el dosado relativo y las emisiones de CO; la ubicación del mezclador afecta el consumo de combustible y las emisiones de CO.

El régimen de funcionamiento influyó significativamente en la respuesta de todas las variables de desempeño.

Tabla 5 Resultados para análisis estadístico

| <i>Configuración</i> | <i>Modo</i> | <i>Consumo de combustible (g/s)</i> | <i>Rendimiento volumétrico (η_v)</i> | <i>Dosado relativo</i> | <i>%CO</i> | <i>%CH₄</i> |
|----------------------|-------------|-------------------------------------|--|------------------------|------------|------------------------|
| C2 | 1 | 0,30 | 0,15 | 1,64 | 1,36 | 2,62 |
| | 2 | 0,54 | 0,13 | 1,86 | 1,97 | 1,24 |
| | 3 | 1,67 | 0,29 | 2,14 | 5,59 | 1,61 |
| | 4 | 2,78 | 0,40 | 2,11 | 5,96 | 2,37 |
| | 5 | 3,42 | 0,46 | 2,08 | 5,91 | 2,20 |
| | 1 | 0,30 | 0,15 | 1,64 | 1,85 | 1,09 |
| | 2 | 0,64 | 0,15 | 2,01 | 3,15 | 0,86 |
| | 3 | 1,35 | 0,25 | 2,03 | 2,56 | 0,50 |
| | 4 | 2,08 | 0,33 | 1,96 | 5,39 | 1,02 |
| | 5 | 2,91 | 0,37 | 2,18 | 6,35 | 0,52 |
| C4 | 1 | 0,15 | 0,19 | 0,66 | 0,02 | 1,61 |
| | 2 | 0,75 | 0,21 | 1,63 | 1,81 | 0,28 |
| | 3 | 1,34 | 0,26 | 1,90 | 3,12 | 0,29 |
| | 4 | 1,93 | 0,31 | 1,93 | 3,94 | 0,71 |
| | 5 | 2,49 | 0,37 | 1,86 | 3,78 | 0,34 |
| | 1 | 0,15 | 0,19 | 0,67 | 0,02 | 0,95 |
| | 2 | 0,81 | 0,21 | 1,76 | 2,01 | 0,28 |
| | 3 | 1,20 | 0,25 | 1,79 | 2,95 | 0,70 |
| | 4 | 1,84 | 0,30 | 1,89 | 3,46 | 0,33 |
| | 5 | 2,49 | 0,37 | 1,88 | 3,81 | 0,72 |
| C3 | 1 | 0,24 | 0,22 | 0,90 | 0,02 | 1,49 |
| | 2 | 0,62 | 0,21 | 1,36 | 2,61 | 0,26 |
| | 3 | 1,08 | 0,27 | 1,50 | 3,32 | 0,33 |
| | 4 | 1,51 | 0,30 | 1,52 | 3,57 | 0,28 |
| | 5 | 2,04 | 0,39 | 1,46 | 3,78 | 0,22 |
| | 1 | 0,10 | 0,19 | 0,46 | 0,04 | 0,59 |
| | 2 | 0,53 | 0,19 | 1,27 | 1,83 | 0,58 |
| | 3 | 1,01 | 0,26 | 1,45 | 3,03 | 0,25 |
| | 4 | 1,45 | 0,29 | 1,50 | 3,32 | 0,22 |
| | 5 | 1,89 | 0,35 | 1,50 | 2,17 | 0,52 |
| C7 | 1 | 0,19 | 0,22 | 0,73 | 0,05 | 1,08 |
| | 2 | 0,45 | 0,17 | 1,22 | 0,4 | 0,84 |
| | 3 | 0,76 | 0,20 | 1,38 | 0,45 | 0,34 |
| | 4 | 1,19 | 0,24 | 1,48 | 1,46 | 0,64 |
| | 5 | 1,80 | 0,33 | 1,51 | 2,4 | 1,08 |
| | 1 | 0,13 | 0,22 | 0,50 | 0,06 | 0,81 |
| | 2 | 0,56 | 0,18 | 1,41 | 0,71 | 0,56 |

Tabla 5 (continuación)

| | | | | | | |
|----|---|------|------|------|------|------|
| | 3 | 0,75 | 0,20 | 1,36 | 0,15 | 0,30 |
| | 4 | 1,21 | 0,25 | 1,48 | 1,27 | 0,64 |
| | 5 | 1,72 | 0,33 | 1,46 | 2,24 | 0,26 |
| C8 | 1 | 0,05 | 0,22 | 0,18 | 0,11 | 0,93 |
| | 2 | 0,53 | 0,19 | 1,28 | 1,35 | 0,45 |
| | 3 | 1,05 | 0,25 | 1,54 | 4,2 | 0,48 |
| | 4 | 1,74 | 0,34 | 1,58 | 5,81 | 0,95 |
| | 5 | 2,71 | 0,47 | 1,61 | 5,85 | 1,64 |
| | 1 | 0,09 | 0,22 | 0,34 | 0,07 | 0,67 |
| | 2 | 0,36 | 0,16 | 1,03 | 0,09 | 0,66 |
| | 3 | 0,92 | 0,23 | 1,51 | 3 | 0,49 |
| | 4 | 1,80 | 0,31 | 1,77 | 5,43 | 1,31 |
| | 5 | 2,53 | 0,40 | 1,78 | 6,25 | 0,75 |
| C6 | 1 | 0,15 | 0,24 | 0,50 | 0,12 | 1,58 |
| | 2 | 0,40 | 0,17 | 1,06 | 0,05 | 0,45 |
| | 3 | 0,57 | 0,15 | 1,36 | 0,07 | 0,38 |
| | 4 | 1,13 | 0,20 | 1,74 | 3,29 | 0,61 |
| | 5 | 2,58 | 0,40 | 1,83 | 6,39 | 1,72 |
| | 1 | 0,19 | 0,24 | 0,64 | 0,1 | 1,83 |
| | 2 | 0,37 | 0,17 | 0,99 | 0,07 | 0,48 |
| | 3 | 0,67 | 0,16 | 1,53 | 0,06 | 0,28 |
| | 4 | 1,11 | 0,20 | 1,71 | 2,96 | 0,44 |
| | 5 | 2,08 | 0,31 | 1,89 | 5,71 | 0,73 |

Tabla 6 Análisis de varianza (tabla Anova) para variables de desempeño

| Variable | Factores de variación | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | Mezclador | | Potencia | | Regulador | | Ubicación | |
| | Relación F | Valor P | Relación F | Valor P | Relación F | Valor P | Relación F | Valor P |
| Consumo de combustible | 0,030 | 0,853 | 118,950 | 0,000 | 20,380 | 0,000 | 10,310 | 0,002 |
| Rendimiento volumétrico | 3,800 | 0,056 | 45,070 | 0,000 | 3,940 | 0,052 | 2,550 | 0,116 |
| Dosado relativo | 3,930 | 0,052 | 12,920 | 0,000 | 6,350 | 0,014 | 0,910 | 0,344 |
| %CO | 0,060 | 0,812 | 24,720 | 0,000 | 9,250 | 0,003 | 9,980 | 0,002 |
| %CH ₄ | 7,460 | 0,008 | 5,210 | 0,001 | 0,200 | 0,657 | 1,230 | 0,271 |

Las gráficas de medias e intervalos de confianza evidencian el comportamiento de las variables con los factores de variación (véanse figuras 2-6).

de autocorrelación. La figura 8 de residuos contra predichos permite verificar la no existencia de indicios de heteroscedasticidad. Se presentan las gráficas para el CO y para el dosado relativo.

Validación de los supuestos estadísticos

La figura 7, de los residuos contra *row number*, permite verificar la no existencia de tendencias

La figura 7 no muestra patrones de comportamiento en los residuales, es decir, no se tienen indicios de problemas de autocorrelación ni heteroscedasticidad para el CO.

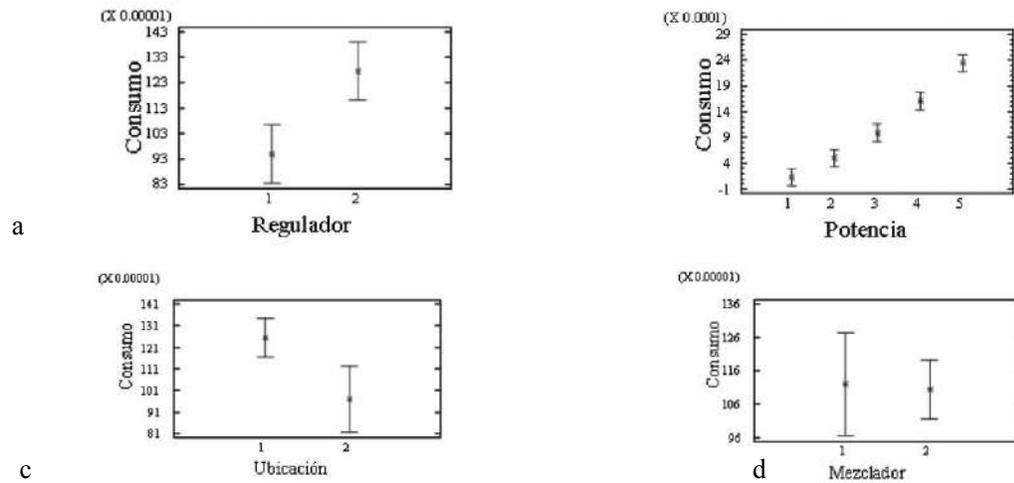


Figura 2 Medias e intervalos de confianza para el consumo de combustible a.) regulador, b.) potencia, c.) ubicación y d.) mezclador

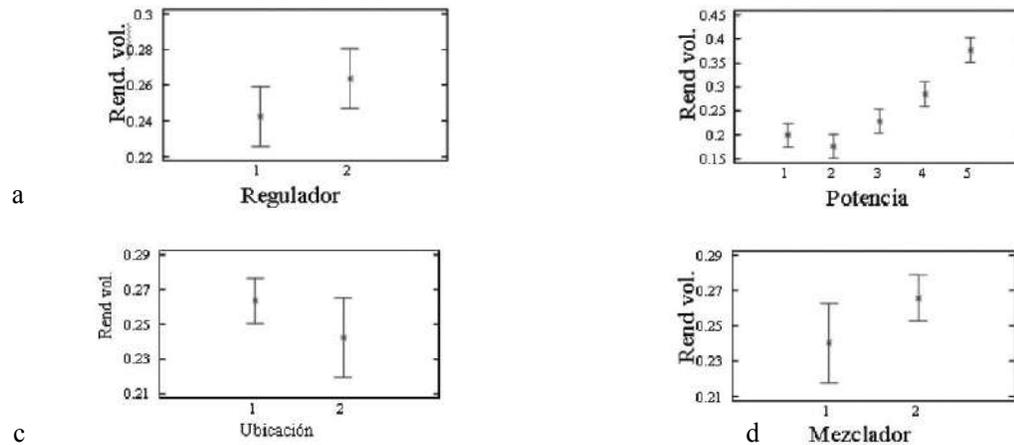


Figura 3 Medias e intervalos de confianza para el rendimiento volumétrico: a.) regulador, b.) potencia, c.) ubicación y d.) mezclador

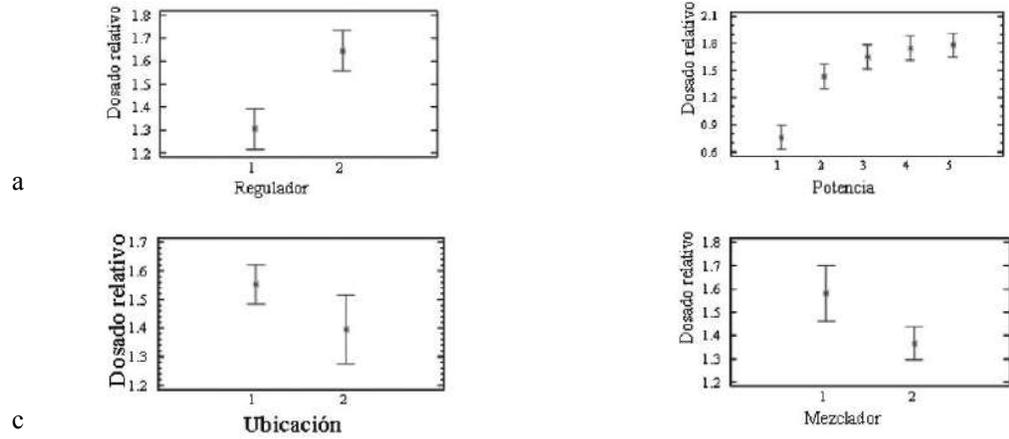


Figura 4 Medias e intervalos de confianza para el dosado relativo: a.) regulador, b.) potencia, c.) ubicación y d.) mezclador

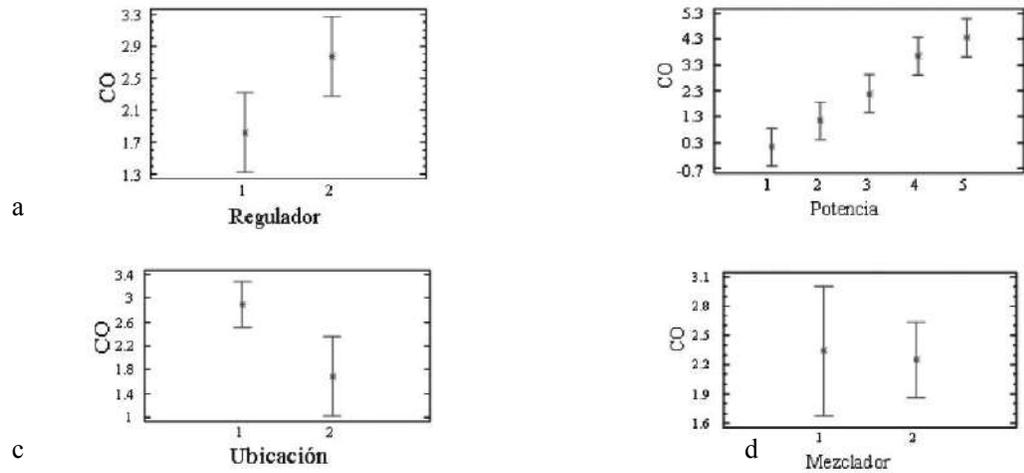


Figura 5 Medias e intervalos de confianza (95%) para el CO a.) regulador, b.) potencia, c.) ubicación y d.) mezclador

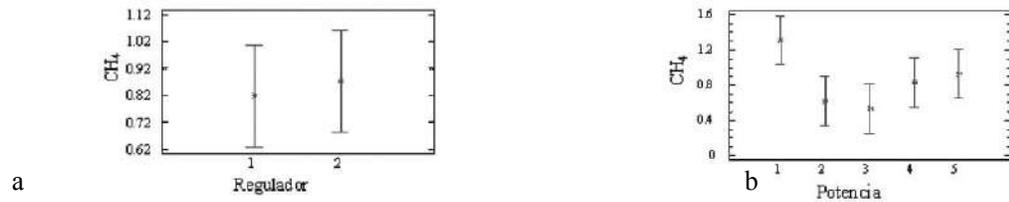
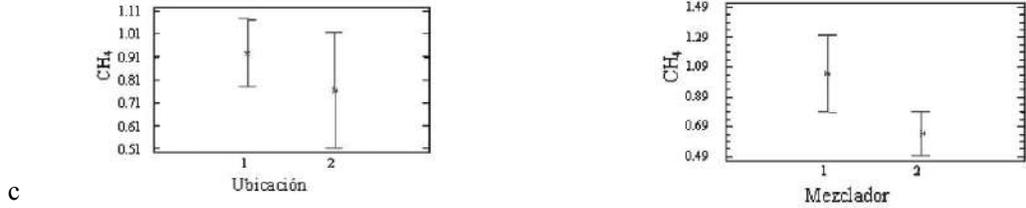


Figura 6 Medias e intervalos de confianza (95%) para el CH₄ a.) regulador, b.) potencia, c.) ubicación y d.) mezclador



c

Figura 6 (continuación)

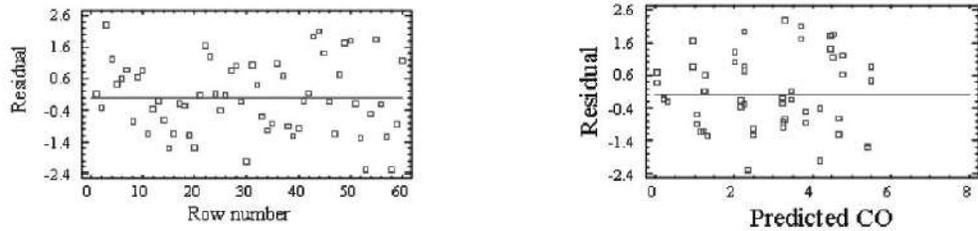


Figura 7 Gráficas de residuales para el CO

La figura 8 muestra marcados patrones de comportamiento en los residuales, es decir, se tienen indicios de problemas de autocorrelación y heteroscedasticidad. Debido a que no se pueden validar los supuestos estadísticos de normalidad y varianza constante para el dosado relativo, no hay soporte estadístico para concluir acerca del comportamiento de dicha variable con los factores de variación.

La validación de los supuestos para el consumo de combustible, el rendimiento volumétrico y las emisiones de CH_4 se realizó en forma similar al CO.

Para la prueba de normalidad se utilizó el estadístico de *Kolmogorov-Smirnov*.

La tabla 7 muestra los resultados para el CO.

Este estadístico permite no rechazar la idea de que los residuales provienen de una distribución normal, con un 90% de confiabilidad.

Para el consumo de combustible se validó la normalidad con la ayuda de una transformación a la variable respuesta. Para las demás variables se procedió en forma similar que para el CO.

Discusión

A continuación se describen los principales efectos observados con cada componente:

El mezclador

En este trabajo se comparó el efecto del tamaño del venturi sobre el desempeño del motor para las

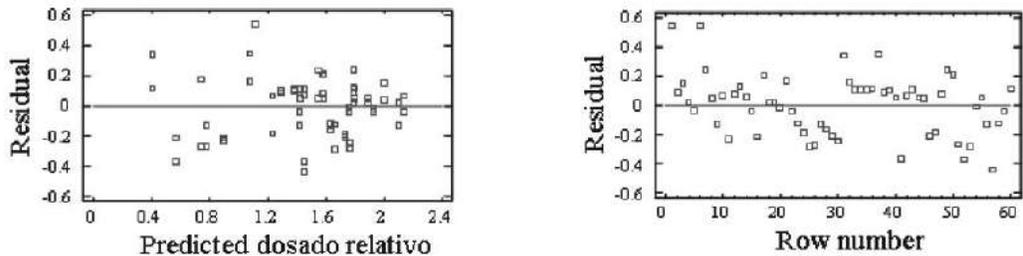


Figura 8 Gráficas de residuales para el dosado relativo

Tabla 7 Estadístico de prueba de normalidad para el CO

| <i>Estadístico de prueba</i> | <i>Valor</i> | <i>Forma modificada</i> | <i>Valor P</i> |
|------------------------------|--------------|-------------------------|----------------|
| Kolmogorov-Smirnov D | 0,0763252 | 0,598824 | ≥ 0,10* |

diferentes configuraciones, no respecto al motor original; por eso se explica que éste no tuviera efecto significativo respecto al rendimiento volumétrico (véanse tabla 6 y figura 3d), adicionalmente se midieron puntos de operación en los que el rendimiento volumétrico se ve poco afectado (1.000-3.000 rpm; 0-55 Nm).

El cambio de mezclador mostró influencia sobre la cantidad de CH₄ en los productos (véanse tabla 6 y figura 6d). En este experimento, el mezclador 2 se comportó mejor debido a que se obtuvo menor cantidad de CH₄ (0,49-0,79%). El cambio de mezclador no mostró efecto significativo en ninguna otra variable de desempeño, esto puede obedecer a que el cambio de diámetro en el mezclador fue pequeño (5 mm) para lograr condiciones adecuadas de funcionamiento del motor.

El regulador

El tipo de regulador mostró efectos significativos sobre las emisiones de CO y sobre el consumo de combustible (véanse tabla 6 y figuras 5a, 2a). El regulador 1 produjo menor cantidad de CO (1,3-2,3%) y menor consumo de combustible (0,83-1,08 g/s) con un funcionamiento fiable del motor. El rango de utilización del regulador 1 (1.000-3.000 cm³, 100 kW) estuvo acorde con las características del motor (2.300 cm³, 75 kW), mientras que el regulador 2 excedió dichas características (3.000-6.000 cm³, 140 kW); aunque con ambos reguladores el motor funcionó en forma estable, una mala selección de este componente influye negativamente en el desempeño mecánico-ambiental del motor.

Ubicación del mezclador

La ubicación del mezclador tiene efectos significativos en la producción de CO y el consumo de combustible (véanse tabla 6 y figuras 5c, 2c).

Durante la experimentación fue necesario estabilizar el funcionamiento del motor con diferentes aperturas de descarga de gas en el mezclador para las dos ubicaciones utilizadas. Así, para la ubicación 1 se estabilizó con una apertura de 1 mm y para la ubicación 2 con una apertura de 0,5 mm. Al ubicar el mezclador en el carburador (ubicación 2) se obtuvo mejor desempeño ambiental y mecánico debido a que fueron menores las emisiones de CO (1-2,4%) y hubo menor consumo de combustible (0,81-1,11 g/s), resultado de tener una apertura en la descarga de gas más pequeña, que permite una regulación adecuada de la mezcla combustible-aire.

Régimen de funcionamiento del motor (potencia)

El régimen de funcionamiento del motor tiene efecto significativo en las emisiones de CO y CH₄, en el consumo de combustible y en el rendimiento volumétrico (véanse tabla 6 y figuras 5b, 6b, 2b y 3b). A mayor exigencia (mayor potencia o mayor carga) el motor mejora el rendimiento volumétrico, aumenta el consumo de combustible y aumenta las emisiones de CO. Respecto a las emisiones de CH₄ el motor presenta menores emisiones para regímenes de funcionamiento intermedios. Esta conclusión es válida para los puntos de funcionamiento del motor seleccionados.

Para mantener una homogeneidad y concordancia con el análisis hecho a las variables utilizadas en este estudio, no se incluye en la discusión de los resultados al dosado relativo, debido a que no se validaron los supuestos de no autocorrelación y homoscedasticidad.

Conclusiones

La correcta selección y regulación de cada uno de los elementos que conforman el kit de

conversión a gas para obtener un buen desempeño mecánico y ambiental en el motor no está determinada únicamente por el funcionamiento estable de éste. Se deben medir los parámetros de desempeño mecánico-ambiental para obtener mejores resultados.

Selección del kit más apropiado para este motor

En la tabla 8 se presenta la configuración más apropiada desde el punto de vista de mínimas emisiones de CO y CH₄ y de mejores prestaciones del motor, es decir, mínimo consumo y mejor rendimiento volumétrico.

Configuraciones de mal funcionamiento

En la tabla 9 se presentan las configuraciones en las que el motor operó de forma inestable. Durante la experimentación se presentaron dos configuraciones que no permitieron el adecuado

Tabla 8 Configuración óptima

| Configuración | Factores |
|----------------------|---|
| C7 | Mezclador 2 Ubicación 2 Regulador 1 |

funcionamiento del motor (C1 y C5). Estas dos configuraciones tienen en común el mezclador pequeño ubicado en el carburador.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al Comité para el Desarrollo de la Investigación, CODI, de la Universidad de Antioquia, por la financiación de este proyecto, igualmente expresan su gratitud a la empresa GNV Motor por facilitar los componentes del kit de conversión y el personal técnico de apoyo para la ejecución de los ensayos.

Tabla 9 Operación inestable del motor

| Configuración | Regulador | Mezclador | Ubicación |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| C1 | 2 | 1 | 2 |
| C5 | 1 | 1 | 2 |

Referencias

- Gutiérrez, Jaime *et al.* *Análisis mecánico y ambiental de motores de combustión interna alternativos convencionales convertidos a funcionamiento bicomcombustible gasolina motor (G. M.) gas natural comprimido (GNC)*. Medellín. 2000.
- Agudelo, John R. *et al.* "Estudio experimental del gas natural en un motor de encendido provocado". En: *Revista Energética*. N.º 27. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 2002.
- 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*. Universidad del Norte. 2002.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). *Informe Ejecutivo Prueba Piloto Gas Natural Vehicular*. Bogotá. 1998.
- Muñoz, M. y F. Payri. *Motores de combustión interna alternativos*. Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid. 1983.
- Lapuerta, M. *et al.* "Fuel formulation effects on passenger car diesel engine particulate emissions and composition". En: *SAE paper*. N.º 2000-01-1850. 2000.
- Montgomery, Douglas. *Diseño y Análisis de Experimentos*. México. Grupo Editorial Iberoamérica. 1991.
- Maxwell, T. y J. Jones. *Alternative Fuels. Emissions, Economics and Performance*. SAE int. 1994.
- Agudelo, John R. y Ricardo Mejía. "Desarrollo de un modelo para el dimensionamiento de mezcladores aire-gas natural". En: *Revista Facultad de Ingeniería*. N.º 26. Universidad de Antioquia. 2002.