



DYNA

ISSN: 0012-7353

Universidad Nacional de Colombia

Romero-Piedrahita, Carlos Alberto; Mejía-Calderón,  
Luz Adriana; Carranza-Sánchez, Yamid Alberto  
Estudio de sensibilidad del desempeño durante el calentamiento en vacío de  
un motor de combustión interna a cambios en su relación de compresión, el  
contenido de etanol en la mezcla combustible con gasolina y el material de la culata  
DYNA, vol. 85, núm. 204, 2018, Enero-Marzo, pp. 238-247  
Universidad Nacional de Colombia

DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67311>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49655628028>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UNCM  
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc  
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso  
abierto

# Sensitivity analysis of engine warm-up performance at idle conditions to the changes in compression ratio, ethanol content in gasoline fuel and cylinder head material

Carlos Alberto Romero-Piedrahita <sup>a</sup>, Luz Adriana Mejía-Calderón <sup>b</sup> & Yamid Alberto Carranza-Sánchez <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Tecnologías, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. [cromero@utp.edu.co](mailto:cromero@utp.edu.co), [yamid@utp.edu.co](mailto:yamid@utp.edu.co)

<sup>b</sup> Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. [adriamec@utp.edu.co](mailto:adriamec@utp.edu.co)

Received: August 28<sup>th</sup>, de 2017. Received in revised form: January 16<sup>th</sup>, 2018. Accepted: January 31<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

This paper presents the evaluation of the effects caused by variations of the compression ratio, the material of the cylinder head and the composition of the fuel on the engine speed, fuel consumption, warm-up time and emissions of an air-cooled spark ignited engine using an experimental design methodology. The objective of the work was to determine the sensitivity of the engine responses operating at idle conditions, as well as the optimal combination between the mentioned parameters. Of the three factors evaluated, the compression ratio is the factor that has exerted the largest influence on the performance of the engine at idle speed. The steady-state temperatures of the engine reduce with the increase in the compression ratio, with the higher conductivity of the material and with the higher ethanol content.

**Keywords:** combustion engine; compression ratio; ethanol-gasoline blends; material; warm-up.

# Estudio de sensibilidad del desempeño durante el calentamiento en vacío de un motor de combustión interna a cambios en su relación de compresión, el contenido de etanol en la mezcla combustible con gasolina y el material de la culata

## Resumen

En este trabajo se presenta la evaluación de los efectos causados por variaciones de la relación de compresión, el material de la culata y la composición del combustible sobre la velocidad del motor, el consumo de combustible, el tiempo de calentamiento y las emisiones de un motor de encendido por chispa enfriado por aire, bajo una metodología de diseño de experimentos. El objetivo del trabajo ha sido determinar la sensibilidad de las respuestas del motor operando en vacío, así como la combinación óptima entre los parámetros mencionados. De los tres factores evaluados bajo los límites de las pruebas realizadas, la relación de compresión es el factor que ha ejercido la mayor influencia sobre el desempeño del motor bajo el régimen de marcha en vacío. Las temperaturas de estado estacionario del motor bajan con el aumento de la relación de compresión, con la mayor conductividad del material y con el mayor contenido de etanol.

**Palabras clave:** calentamiento; material de culata; mezcla etanol-gasolina; motor de combustión; relación de compresión.

## 1. Introducción

Entre las medidas para reducir la alta dependencia de los combustibles fósiles y para reducir las emisiones de CO,

NOx, HC, material particulado, el perfeccionamiento de tecnologías para mejorar la eficiencia de los motores de combustión (aumento de la relación de compresión, reducción de las pérdidas de calor, sobrecarga, etc.) y la

**How to cite:** Romero-Piedrahita, C.A., Mejía-Calderón, L.A. and Carranza-Sánchez, Y.A., Estudio de sensibilidad del desempeño durante el calentamiento en vacío de un motor de combustión interna a cambios en su relación de compresión, el contenido de etanol en la mezcla combustible con gasolina y el material de la culata. DYNA, 85(204), pp. 238-247, March, 2018.

sustitución de la gasolina por combustibles alternativos, figuran entre las más aplicadas [1]. De los combustibles alternativos, el etanol es uno de los más ampliamente utilizados por su alto octanaje, alta velocidad de combustión y la menor producción de gases contaminantes [2-4].

En Colombia, los incentivos orientados a desarrollar la agroindustria, promover el empleo en las zonas rurales, junto con las regulaciones gubernamentales para diversificar las fuentes de energía y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, apuntalan el uso del etanol para ser mezclado con la gasolina. En marzo de 2009, el gobierno promulgó el decreto 1135, estipulando que a partir del 1 de enero de 2012 el 60% de todos los vehículos nuevos con motores de hasta 2 litros deberían estar provistos de tecnología de combustible flexible que les permitiera operar con una mezcla de combustible 85% de etanol y 15% de gasolina (E85).

La evaluación del desempeño de motores de automóviles de encendido provocado alimentados con mezclas de etanol-gasolina ha sido objeto de trabajo de muchos investigadores y entre ellos destacan Hsieh et al. [5], Gravalos *et al.* [6], Sarkar *et al.* [7], Yücesu *et al.* [8].

La Universidad Tecnológica de Pereira, en Colombia, realizó y publicó los resultados de un estudio sobre el efecto y el rendimiento de los combustibles mezclados con etanol al 20 por ciento en volumen en automóviles propulsados por motores de encendido por chispa usados en Colombia [9], bajo el proyecto denominado *Protocolo E-20*.

Una amplia revisión de las investigaciones relacionadas sobre la operación de motores alternativos con mezclas de gasolina-etanol, fue realizada por el grupo del profesor Mantilla et. al [10]. Los autores analizan la influencia sobre el desempeño y las emisiones de los motores encendidos por chispa, cuando la gasolina es reemplazada por mezclas de gasolina y etanol, y fundamentan la necesidad de explotar la mejora del octanaje de sus mezclas mediante la modificación de la cámara de combustión y el aumento de la relación de compresión. También explican las necesidades de ajustar el transcurso de la combustión requeridas por la mayor temperatura necesaria para que el combustible inicie su proceso de oxidación, porque los calores de vaporización de las mezclas gasolina-etanol son mayores que los de la gasolina sin mezclar. Adicionalmente, Mantilla et. al invitan a la realización de ensayos experimentales para encontrar las relaciones entre la velocidad de la llama, las propiedades del combustible, y los parámetros característicos del proceso de combustión, de desempeño y las emisiones. Un factor que debe agregarse al estudio de desempeño de los motores con mezclas gasolina-etanol, es el material de la cámara de combustión (propiedades térmicas y físicas del material de las superficies de contorno), que influyen en las propiedades de la capa térmica, la interacción de ésta con la masa de trabajo y de manera importante en los procesos de intercambio de calor (calentamiento/enfriamiento de las partes metálicas del motor y de la mezcla, pérdidas de calor) [11-14].

Pese al extenso trabajo de investigación disponible relacionado con la gama de mezclas combustibles de etanol-gasolina en motores de combustión, la mayoría de ellos se han realizado con motores de automoción, mientras que es menos abundante la información relacionada con la

influencia del etanol y sus mezclas con la gasolina sobre la operación de motores industriales y domésticos pequeños [15,19], motores cuyo número está aumentando, al tiempo que se procura la reducción del consumo de combustible y la limitación de las emisiones contaminantes en éstos.

Los motores pequeños tienen particularidades constructivas que los diferencian de los utilizados en automoción y son muy sensibles a las calibraciones de la mezcla aire-combustible. Estas diferencias y sensibilidades hacen suponer que los efectos producidos por la composición de las mezclas gasolina-etanol se manifiestan de manera especial en el desempeño y las emisiones de los motores pequeños [15, 16]. La mayoría de los motores de encendido provocado durante el calentamiento tras su puesta en marcha y también mientras funcionan en vacío, operan con mezclas ricas en combustible, por lo que la combustión es incompleta y son elevadas las emisiones de monóxido de carbono (CO) y de hidrocarburos sin quemar (HC) [20]. De ahí que, en la búsqueda de reducir las emisiones contaminantes, se busque reducir el tiempo de calentamiento de los motores, mediante diferentes estrategias en el sistema de gestión térmica de los motores y mediante las investigaciones en materiales para las partes, ante todo las que conforman la cámara de combustión [21-25]. La sensibilidad del motor a la composición del combustible depende también de su tiempo de operación en servicio: los depósitos acumulados en la cámara de combustión durante la operación de los motores, resultado de la acumulación de carbón, reducen la disipación de calor (los depósitos llegan a tener capacidad aislante cercana a la de algunos cerámicos como el óxido de zirconio) [16-18]; el desgaste del motor se refleja en el tiempo en la reducción de su relación de compresión efectiva.

Fundamentado en lo dicho, después del proyecto *Protocolo E-20*, se ha iniciado un nuevo estudio dirigido a la evaluación de la influencia de las mezclas de etanol en el rendimiento de los motores pequeños, considerando las variaciones de la relación de compresión (RC) y también los posibles efectos producidos por las propiedades de los materiales de la cámara de combustión. Se trata de un estudio a desarrollar en varias fases y la fase preliminar de ellas aquí presentada aborda, bajo una metodología de diseño de experimentos (DOE), la exploración de la sensibilidad del tiempo de calentamiento, el desempeño y las emisiones del motor operando en condiciones de ralentí, a los cambios en la composición del combustible, las propiedades térmicas de la culata y la RC.

Las propiedades térmicas de la culata y más ampliamente de todas las partes que cierran el volumen de los gases de trabajo en un motor, afectan los procesos de turbulencia, combustión, transferencia de calor *convectiva* entre los gases y las paredes del cilindro (influencia en procesos internos de turbulencia y combustión) y transferencia de calor *conductiva-convectiva* a través de los espesores de las paredes hacia el refrigerante y el ambiente (influencia en refrigeración y control de temperaturas de partes) [17]. Para simular la influencia integrada de dichas propiedades térmicas, se han considerado para la culata del motor dos materiales: aluminio y hierro fundido (la culata ha sido objeto de fabricación en el mismo marco del proyecto).

En el presente documento se describe inicialmente la

adecuación experimental para realizar los ensayos del motor en ralentí, posteriormente se describen las particularidades de los factores variados y seguidamente se explica la metodología de medición seguida. En la tercera parte del trabajo se analizan los resultados de los experimentos y en la parte final del documento se presentan las conclusiones.

## 2. Configuración experimental

El objetivo de este trabajo ha sido evaluar la influencia de las propiedades térmicas de la culata (empleando para su fabricación hierro fundido y aluminio), la RC y la composición del combustible sobre el tiempo de calentamiento del motor, su desempeño (expresado en la variación de las revoluciones y el consumo de combustible) y las emisiones en condiciones de ralentí, aplicando un Diseño de Experimentos (DOE). Además de proveer la alimentación con dos combustibles, los requisitos a cumplir por la instalación necesaria para realizar el estudio aquí presentado fueron varios. En primer lugar, el motor debía permitir el fácil desmontaje y montaje de las culatas de aluminio o de hierro fundido. En segundo lugar se tuvo que considerar una forma simple para cambiar la RC del motor. En tercer lugar, la instalación debía incorporar la instrumentación para medir la velocidad del motor, el consumo de combustible, las temperaturas y las emisiones.

**Motor de prueba.** El motor utilizado para realizar el trabajo experimental es un ROBIN EY 15D monocilíndrico de cuatro tiempos, de carburador, de válvulas en el bloque, culata de tipo L, con una cilindrada de 143 cm<sup>3</sup>, potencia nominal 1,6 kW a 3000 rpm, diámetro/carrera de 63/46 mm, bloque y culata originales de aluminio, RC nominal de 7,2. Es un motor, representativo del grupo de "motores utilitarios" (clasificación de la EPA –Agencia para la Protección Ambiental- para equipos no manuales). Es un motor pequeño muy usado en aplicaciones de campo y también en conjuntos de moto-bombas y compresores. El diseño de su culata es simple, fácil de reproducir y de instalar; dado el recorrido de admisión, la mezcla llega con poca velocidad al cilindro, la turbulencia es casi nula, la combustión es lenta y propensa a presentar detonación por la larga longitud de la llama; la relación área/volumen de la cámara es alta y determina relativamente grandes pérdidas de calor [26,27].

**Material de la culata.** Para simular la reducción de la transferencia de calor de las paredes del cilindro (reducción que en operación puede ser causada por la acumulación de depósitos en la cámara de combustión o por suciedad externa de las superficies del motor), se moldeó y fabricó una culata de hierro fundido, preservando la geometría del diseño original. La conductividad térmica de la fundición es menor que la del aluminio ( $K_{al} \approx 170 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,  $K_{hf} \approx 80,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ).

**Variación de la relación de compresión.** Se adecúa la variación de la RC adecuando una pequeña cámara (una forma de cilindro hueco) roscada en el alojamiento de la bujía. Esto hace posible aumentar el volumen de compresión y así la RC. La solución es similar a las cámaras de combustión dividida, no introduce partes móviles, no demanda grandes cambios en la culata y, en consecuencia, es más adaptable al motor base. Con el adaptador, la RC original

de 7,2 se reduce a 6,6. Es una reducción representativa de un motor desgastado por el uso (lo que, de paso, podría aprovecharse para valorar la influencia de las mezclas a medida que el motor se desgasta por el uso). Como el volumen de la *precámara adicionada* es relativamente pequeño en relación con el volumen de la cámara de combustión principal, constituye cerca de 9 %, se infiere que los pequeños efectos adicionales que pueden tenerse en el desarrollo de la combustión por el incremento de turbulencia, se compensarán con el pequeño también incremento de la transferencia de calor. En efecto, la variación de la relación área/volumen de la cámara de combustión es insignificante (la original es de 0,463 cm<sup>-1</sup>, mientras que en la modificada es de 0,465 cm<sup>-1</sup>). Un estudio experimental fundamental con mediciones en la cámara de combustión permitiría precisar estas incertidumbres.

**Combustibles de prueba.** Un motor es optimizado en fábrica para el combustible con el que presumiblemente operará. Sin embargo, en los motores pequeños industriales y estacionarios a los que se refiere esta investigación no se realizan, de forma general, modificaciones para aprovechar las ventajas del etanol en las mezclas etanol-gasolina. Aparte de esto, los servicios post-venta no prevén ajustes según el combustible dispuesto por el usuario. En general, los fabricantes de motores pequeños no asumen responsabilidades de garantía por la regularidad de operación de los motores alimentados con mezclas etanol-gasolina y los usuarios son los responsables de realizar los afinamientos, sin que se siga un instructivo recomendado y probado en algún banco de regulación. Son los técnicos de servicio quienes, con su experiencia más que con capacitación formal, realizan los afinamientos de motor cuando operan con combustible no previsto por el fabricante. Las mezclas etanol-gasolina utilizadas en este trabajo fueron E10 y E20. El "E" se refiere al etanol en volumen en la mezcla, y el "10" se refiere a 10 % de etanol, gasolina al 90%. Cuanto mayor sea el contenido de etanol en la mezcla, admitida al motor, mayor será el contenido de oxígeno en ella y, de no efectuarse las correcciones en el sistema de carburación, habrá cambios en la riqueza de la mezcla a medida que aumenta el contenido de etanol en el combustible. Para la preparación de las mezclas, se utilizó la gasolina comercial (provisita al laboratorio) junto con alcohol etílico de 99,7% de pureza [28]. Las mezclas se prepararon diariamente para minimizar cualquier posibilidad de cambio de contenido causado por evaporación o humedad atmosférica. Las propiedades de los combustibles utilizados se muestran en la Tabla 1.

**Equipo de medida.** El consumo de combustible se mide con una balanza LEXUS de 0,5 g de resolución y un embudo de 300 ml. Se toman muestras de gases de escape a la salida del motor y se miden las emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y HC con un analizador de gases QRO-401; la velocidad del motor se mide con un tacómetro de contacto TMRT de la serie SKF; las temperaturas del motor en el bloque y la culata se miden con un termómetro digital FLUKE 54 II y dos termopares tipo K. La presión de compresión del motor se mide con un medidor de compresión Milton. En la Fig. 1 se ilustra la configuración experimental.

Tabla 1.  
Propiedades de las mezclas etanol-gasolina

| Parámetro de calidad             | Método de ensayo | Unidad                    | Gas base | E10   | E20   |
|----------------------------------|------------------|---------------------------|----------|-------|-------|
| Contenido de etanol              | ASTM D5501       | % vol.                    | 7,7      | 12,3  | 22,3  |
| Rango de destilación             | ASTM D86         | 10 % evaporado            | °C       | 51,8  | 53,4  |
|                                  |                  | 50 % evaporado            | °C       | 87,9  | 69,1  |
|                                  |                  | 90 % evaporado            | °C       | 161,4 | 159,3 |
|                                  |                  | Punto final de ebullición | °C       | 217,3 | 201,2 |
| Contenido de agua                | ASTM E203        | % vol.                    | 0,061    | 0,087 | 0,136 |
| Presión de vapor Reid            | ASTM D323        | psi                       | 8,8      | 8,7   | 8,4   |
| Poder calorífico                 | ASTM D3338       | MJ/kg                     |          | 45,86 | 44,8  |
| Número de octano (investigativo) | ASTM D2699       | RON                       | 89       | 90,9  | 95    |

Fuente: Adaptado de [28]

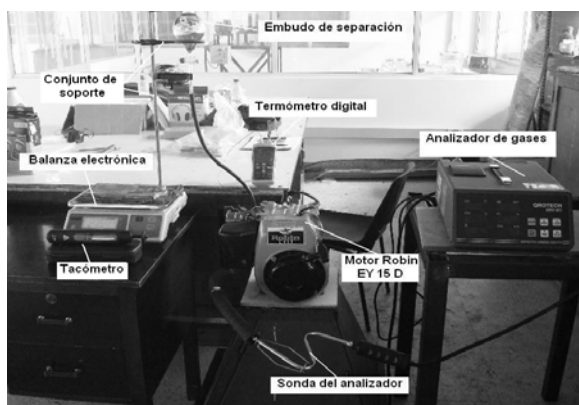


Figura 1. Configuración experimental.  
Fuente: Los autores.

Tabla 2.  
Diseño factorial del experimento

| Prueba N° | Material | RC, ε   | Mezcla de combustible |
|-----------|----------|---------|-----------------------|
| 1         | -1, Al   | 1, 6,6  | 1, E10                |
| 2         | -1, Al   | 1, 6,6  | -1, E20               |
| 3         | 1, FUND  | -1, 7,2 | 1, E10                |
| 4         | 1, FUND  | 1, 6,6  | 1, E10                |
| 5         | -1, Al   | -1, 7,2 | -1, E20               |
| 6         | 1, FUND  | -1, 7,2 | -1, E20               |
| 7         | 1, FUND  | 1, 6,6  | -1, E20               |
| 8         | -1, Al   | -1, 7,2 | 1, E10                |

Fuente: Los autores.

La evaluación del consumo de combustible se realiza con base en el ciclo de trabajo. El volumen total de combustible gastado se divide por el número total de ciclos que el motor completa durante la prueba. Así, para un ensayo cuya duración es de 47 minutos, a una velocidad de manivela de 1651,5 rpm, el motor monocilíndrico de cuatro tiempos ha completado 38810,25 ciclos, consumiendo 200 ml, con lo que el consumo de combustible es de 0,005153 ml/ciclo.

### 3. Diseño experimental

La instalación descrita se utiliza para investigar la influencia del material de la culata, la composición del combustible y la RC sobre el tiempo de calentamiento, el desempeño y las emisiones del motor. El desempeño del

motor se evalúa en función del consumo de combustible y de la variación (aumento o disminución) de las revoluciones del motor, ajustadas inicialmente para el motor base (sin afinamiento). El interés de evaluar el tiempo de calentamiento del motor reside en el hecho de que la temperatura del motor (interna y externa) influye sobre el proceso de combustión, la transferencia de calor interna y externa del motor, y en la formación de emisiones de HC y CO. La temperatura del motor tiene efectos significativos en el consumo de combustible. Especialmente, las pérdidas energéticas por transferencia de calor y las pérdidas mecánicas disminuyen a medida que el motor se calienta. Por tanto, estas pérdidas son particularmente elevadas a temperatura ambiente durante los primeros minutos después del arranque en frío del motor hasta que éste alcanza su estado térmico óptimo (temperatura del aceite cercana a 90 °C). En general, el calentamiento del motor es un período de sobreconsumo significativo de combustible [23,24,29].

Para la prueba de sensibilidad del comportamiento global del motor a los cambios en la conductividad de las paredes, la RC y la composición de la mezcla de etanol-gasolina, se eligió una metodología de *screening* (cribado). Para obtener el modelo empírico basado en experimentos factoriales, los parámetros operativos fueron codificados desde un bajo nivel de operación de -1 a un nivel de operación alto de +1. Todos los ensayos del motor (experimentos con sus réplicas) se hicieron sin realizar ajustes a los dispositivos controladores de mezcla en el carburador, ni al ángulo de avance del encendido (se trabajó con los ajustes recomendados para operación con gasolina regular), independientemente del cambio de los factores. En el diseño factorial completo se realizan ocho ensayos con ocho repeticiones para cada uno de ellos, como se describe en la Tabla 2.

### 4. Resultados y análisis

Después de procesar las respuestas de los 8 ensayos realizados para cada prueba, el resumen de los resultados se presenta en la Tabla 3. El análisis estadístico de los resultados del diseño de experimentos (DOE), explicado en esta sección, se realiza utilizando el programa computacional Statgraphics®, tomando cada variable de respuesta (consumo de combustible, variación de revoluciones, emisiones de escape y tiempo de calentamiento del motor en ralentí) en función de los factores (RC, material de la culata y composición del combustible). El análisis utiliza la tabla de análisis de varianza (ANOVA), el gráfico de Pareto, la media cuadrática y las superficies de respuesta. Se consideró un *p-valor* de 0,05 para la valoración de los factores estadísticamente significativos.

#### 4.1. Análisis de consumo de combustible

El análisis de varianza para el consumo de combustible se presenta en la Tabla 4. Los resultados muestran que no hubo diferencias significativas en ninguno de los factores estudiados, ni en sus interacciones. La importancia relativa de los factores sobre el consumo de combustible se puede seguir en el gráfico de Pareto de la Fig. 2, destacándose la RC.

Tabla 3.  
Resultados de las pruebas

| Prueba N° | Material | RC, $\varepsilon$ | Mezcla de combustible | Consumo de combustible, ml/ciclo | CO, % | CO <sub>2</sub> , % | HC, ppm | RPM, min <sup>-1</sup> |
|-----------|----------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|-------|---------------------|---------|------------------------|
| 1         | -1, Al   | 1, 6,6            | 1, E10                | 0,004976                         | 0,36  | 5,15                | 2844    | 1651,5                 |
| 2         | -1, Al   | 1, 6,6            | -1, E20               | 0,005243                         | 0,19  | 5,10                | 3353,67 | 1576,7                 |
| 3         | 1, FUND  | -1, 7,2           | 1, E10                | 0,004601                         | 4,44  | 10,87               | 1698,67 | 2079,8                 |
| 4         | 1, FUND  | 1, 6,6            | 1, E10                | 0,004628                         | 1,25  | 8,30                | 4603,50 | 1494,8                 |
| 5         | -1, Al   | -1, 7,2           | -1, E20               | 0,004225                         | 0,62  | 12,20               | 1882,67 | 1920,5                 |
| 6         | 1, FUND  | -1, 7,2           | -1, E20               | 0,004096                         | 1,79  | 11,57               | 2263,50 | 1931                   |
| 7         | 1, FUND  | 1, 6,6            | -1, E20               | 0,005022                         | 0,51  | 8,05                | 4714,67 | 1487,7                 |
| 8         | -1, Al   | -1, 7,2           | 1, E10                | 0,004061                         | 1,45  | 12,37               | 1564,17 | 2083                   |

Fuente: Los autores

Tabla 4.  
Análisis de varianza para el consumo de combustible

| Fuente      | Suma de Cuadrados | GdL | Cuadrado Medio       | Razón-F | Valor-P |
|-------------|-------------------|-----|----------------------|---------|---------|
| A:Material  | 3,10866e-9        | 1   | 3,10866e-9           | 0,04    | 0,8755  |
| B: CR       | 1,04264e-6        | 1   | 1,04264e-6           | 13,15   | 0,1713  |
| C:Mezcla    | 1,28721e-8        | 1   | 1,28721e-8           | 0,16    | 0,7561  |
| AB          | 1,20222e-7        | 1   | 1,20222e-7           | 1,52    | 0,4342  |
| AC          | 3,65446e-8        | 1   | 3,65446e-8           | 0,46    | 0,6203  |
| BC          | 1,25776e-7        | 1   | 1,25776e-7           | 1,59    | 0,4272  |
| Error total | 7,92617e-8        | 1   | 7,92617e-8           |         |         |
| Total       | 1,42042 e-6       | 7   | R-Square = 94,4199 % |         |         |

\*GdL = grados de libertad

Fuente: Los autores.

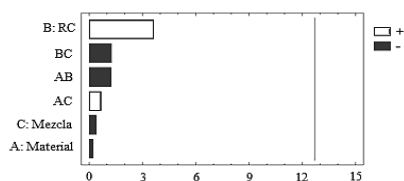


Figura 2. Diagrama de Pareto para consumo de combustible

Fuente: Los autores

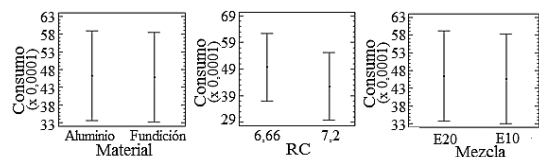


Figura 3. Gráficos de medias del consumo de combustible.

Fuente: Los autores.

En las gráficas de medias de la Fig. 3, con respecto al material de la culata y la composición del combustible, se observa que las medias correspondientes de consumo de combustible son muy cercanas. Para el factor de RC, hay una ligera diferencia en las medias de consumo.

La Fig. 4 muestra las superficies de respuesta de consumo de combustible para los dos materiales, variando la RC y la composición de combustible. El consumo máximo de combustible por ciclo (0,005243 ml/ciclo) corresponde a la culata de aluminio, RC de 6,6, y mezcla de combustible E20.

El consumo mínimo de combustible por ciclo (0,004061 ml/ciclo) tiene lugar con la culata de aluminio, RC de 7,2 y mezcla de combustible E10, traduciéndose en una reducción del 22,8% respecto al máximo consumo de combustible. A partir de la inclinación de la respuesta superficial en el plano frontal, puede decirse que hay una tendencia sólida en la influencia de la RC sobre el consumo de combustible del ciclo, que disminuye casi linealmente con el aumento de ésta.

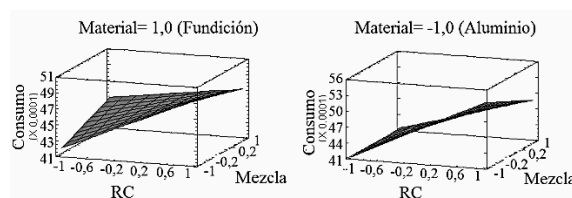


Figura 4. Superficie de respuesta para el consumo de combustible.

Fuente: Los autores.

Tabla 5.  
Análisis de varianza de la velocidad del motor

| Fuente      | Suma de Cuadrados | GdL | Cuadrado Medio       | Razón-F | Valor-P |
|-------------|-------------------|-----|----------------------|---------|---------|
| A:Material  | 7100,74           | 1   | 7100,74              | 19,48   | 0,1418  |
| B: CR       | 406649,0          | 1   | 406649,0             | 1115,63 | 0,0191  |
| C:Mezcla    | 19337,6           | 1   | 19337,6              | 53,05   | 0,0869  |
| AB          | 8001,13           | 1   | 8001,13              | 21,95   | 0,1339  |
| AC          | 827,024           | 1   | 827,024              | 2,27    | 0,3731  |
| BC          | 6574,6            | 1   | 6574,6               | 18,04   | 0,1472  |
| Error total | 364,5             | 1   | 364,5                |         |         |
| Total       | 448854,0          | 7   | R-Square = 99,9188 % |         |         |

Fuente: Los autores.

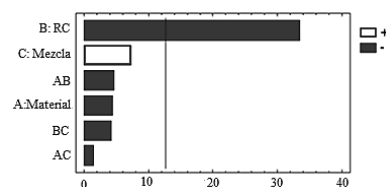


Figura 5. Diagrama de Pareto para la velocidad del motor.

Fuente: Los autores.

## 4.2. Análisis de afectación de la velocidad del motor

En la Tabla 5 se resume el análisis de varianza para la velocidad del motor. Las gráficas de Pareto de la Fig. 5, resumen y muestran la importancia relativa de cada factor sobre la velocidad.

Asumiendo que la potencia se gasta en vencer las pérdidas mecánicas, un aumento de revoluciones de ralentí indica una mayor conversión de la energía de combustible en energía mecánica. No hay diferencias significativas atribuibles al material de la culata, ni a la mezcla de combustible, aunque la velocidad del motor experimenta una diferencia estadísticamente significativa con la RC.

En la Fig. 6 se ilustran las medias de la velocidad del motor. Si bien es difícil detectar una diferencia significativa entre los materiales, la media de la velocidad es mayor con la

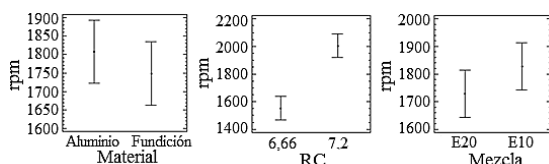


Figura 6. Gráficos de medias de la velocidad del motor.  
Fuente: Los autores.

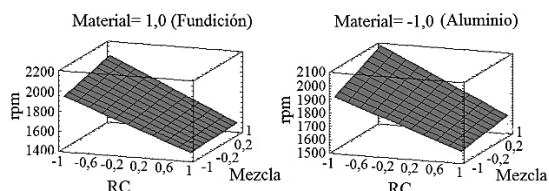


Figura 7. Superficies de respuesta de la velocidad del motor.  
Fuente: Los autores.

RC 7,2, dando un aumento de la velocidad del motor cercano al 22,5%. El contenido de etanol en la mezcla también influencia ligeramente, aunque menos que la RC. Es mayor, en general, la velocidad del motor para la mezcla de combustible E10 en comparación con E20, lo que puede ser parcialmente explicado por su mayor poder calorífico.

Las superficies de respuesta de la Fig. 7 permiten la interpretación visual de los efectos de los factores sobre la velocidad del motor en función de la RC y la composición del combustible para valores fijos del material. La velocidad del motor aumenta linealmente con el aumento de la RC y la reducción del contenido de etanol en el de combustible. La mayor velocidad del motor, 2089,75 rpm, tiene lugar para una combinación de material aluminio, RC de 7,2 y mezcla de combustible E10. La velocidad más baja, 1480,92 rpm, ocurre con una combinación de material de hierro fundido, RC de 6,6 y mezcla de combustible E20.

#### 4.3. Análisis de emisiones

De la revisión presentada por Orbital Engine Company [15] y de otras fuentes revisadas [5,7,8,10,19,30], se ve que un resultado de alimentar los motores con mezclas de etanol, bajo carga, es la reducción de las emisiones de CO y HC. Para ponderar los resultados de las emisiones en la presente investigación, debe considerarse que, a diferencia de los trabajos en la literatura, el motor aquí se ha ensayado en ralentí, con variación libre de la velocidad y de manera original (hasta donde los autores tienen conocimiento), combinando simultáneamente tres factores –RC, composición etanol-gasolina y material de la culata-. Adicionalmente como se anotó anteriormente, el motor ensayado no fue ajustado ni en mezcla aire/combustible, ni en avance de la chispa para simular el escenario real de operación en ralentí de un motor sin realización de afinado, dejando libre la variación de las revoluciones. Por esto último, los resultados de emisiones obtenidos en esta investigación pueden diferir de los obtenidos bajo carga en otras investigaciones en la literatura.

**Análisis de monóxido de carbono.** Del análisis de varianza que se muestra en la tabla 6 y del gráfico de Pareto

Tabla 6.  
Análisis de varianza para las emisiones de CO

| Fuente     | Suma de Cuadrados | GdL | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|------------|-------------------|-----|----------------|---------|---------|
| A:Material | 3,60461           | 1   | 3,60461        | 18,46   | 0,1456  |
| B: RC      | 4,48501           | 1   | 4,48501        | 22,96   | 0,1310  |
| C:Mezcla   | 2,40901           | 1   | 2,40901        | 12,33   | 0,1766  |
| AB         | 1,08781           | 1   | 1,08781        | 5,57    | 0,2552  |
| AC         | 0,714013          | 1   | 0,714013       | 3,66    | 0,3068  |
| BC         | 0,825612          | 1   | 0,825612       | 4,23    | 0,2882  |
| ErrorTotal | 0,195313          | 1   | 0,195313       |         |         |

Fuente: Los autores.

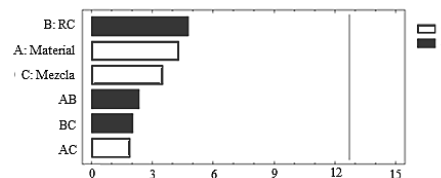


Figura 8. Diagrama de Pareto para las emisiones de CO.  
Fuentes: Los autores.

ilustrado en la Fig. 8, se deduce que las contribuciones de los tres factores estudiados son del mismo orden. Además, la influencia de las interacciones en la respuesta estudiada es comparable a la de los principales factores. Esto dificulta aislar la influencia de cada uno de los factores implicados.

En la Fig. 9 se ilustran las medias de las emisiones de CO. No es posible a partir de las imágenes detectar una diferencia significativa entre las medias de CO generados por los niveles bajos y altos de los factores estudiados.

Durante el funcionamiento del motor en el modo de ralentí, los descensos de temperatura y presión al paso de la mezcla etanol-gasolina/aire por el difusor y la mariposa de aceleración del carburador, y las variaciones reales de la RVP de la mezcla pueden reflejarse en mezclas imperfectas, o muy ricas o muy pobres, que no queman bien, generan irregularidades de las revoluciones y pueden generar niveles de CO mayores a los generados cuando el motor trabaja bajo carga. Efectivamente, explicaciones más detalladas de lo que puede pasar se derivan de los análisis de Mantilla [10], quien observa que “puede pasar que al llegar la mezcla al cilindro, si no se dispone de energía suficiente para mantener la mezcla en estado de vapor, lo cual sucede, va a volver rápidamente a un estado líquido”.

Las superficies de respuesta de las emisiones de CO como funciones de la RC y mezclas de combustible dejando fijo el factor material de culata, se muestran en la Fig. 10, donde la dependencia entre los niveles de emisiones de CO y el contenido de etanol en el combustible es lineal. A un nivel alto de la RC, cuanto mayor sea el contenido de etanol, menores serán los niveles de emisión de CO. Para el nivel bajo de la RC, la influencia del contenido de etanol no es definida cuando se usa la culata de aluminio. En general, a partir de las superficies de respuesta, se puede concluir que con la culata de hierro fundido los niveles de emisiones de CO son mayores que con la de aluminio. Esto podría atribuirse a la reducción de la transferencia de calor de la culata, que genera una reducción en la eficiencia volumétrica y, por consiguiente, en el contenido de aire de la mezcla.

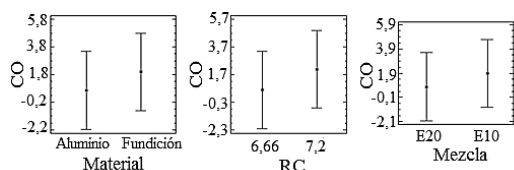


Figura 9. Gráfico de medias de las emisiones de CO.  
Fuente: Los autores.

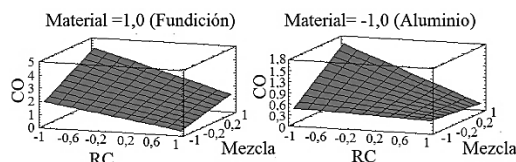


Figura 10. Superficies de respuesta de CO.  
Fuente: Los autores.

Tabla 7.

Análisis de varianza para emisiones CO<sub>2</sub>

| Fuente      | Suma de Cuadrados | GdL | Cuadrado Medio | Razón-F             | Valor-P |
|-------------|-------------------|-----|----------------|---------------------|---------|
| A:Material  | 1,97011           | 1   | 1,97011        | 13,77               | 0,1676  |
| B: RC       | 52,071            | 1   | 52,071         | 363,85              | 0,0333  |
| C:Mezcla    | 6,6125e-3         | 1   | 6,6125e-3      | 0,05                | 0,8652  |
| AB          | 8,46661           | 1   | 8,46661        | 59,16               | 0,0823  |
| AC          | 5,61125e-2        | 1   | 5,61125e-2     | 0,39                | 0,6439  |
| BC          | 8,61125e-2        | 1   | 8,61125e-2     | 0,60                | 0,5800  |
| Error total | 0,143112          | 1   | 0,143112       |                     |         |
| Total       | 69,7997           | 7   |                | R-Square = 99,7721% |         |

Fuente: Los autores.

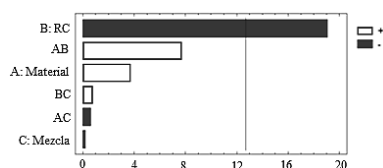


Figura 11. Diagrama de Pareto para emisiones CO<sub>2</sub>.  
Fuente: Los autores.

Los valores bajos de emisiones CO (0,203% en volumen) corresponden a la combinación de culata de aluminio, RC 6,6 y mezcla E10. Este resultado es inesperado, toda vez que las menores medias de emisiones de CO se dieron con mezcla E20. Esta aparente inconsistencia podría deberse a alguna variabilidad en el experimento porque el gráfico de medias de CO indica que la mezcla de combustible E20 produce menos emisiones de CO. La mayor cantidad de emisiones de CO (4,284%) se produce con la culata de hierro fundido, RC de 7,2 y mezcla E10.

**Análisis de dióxido de carbono.** A partir de la tabla de varianza, Tabla 7, y del diagrama de Pareto de la Fig. 11, se observa que el mayor efecto sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> se da con la RC, seguido del material de la culata y la interacción de estos dos factores.

Observando los diagramas de medias de la Fig. 12, se puede concluir que los valores altos de CO<sub>2</sub> son producidos con la mayor RC (un incremento cercano al 32% en las emisiones de CO<sub>2</sub>, para un cambio de 6,6 a 7,2). El incremento de emisiones de CO<sub>2</sub> se debe a una mejor combustión.

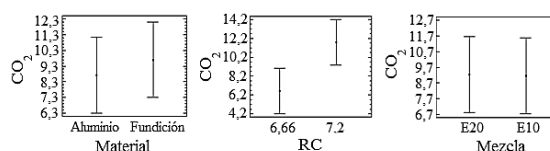


Figura 12. Gráficos de medias de emisiones CO<sub>2</sub>.  
Fuente: Los autores.

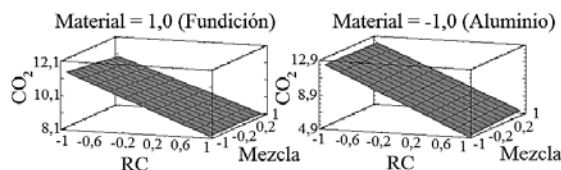


Figura 13. Superficie de respuesta de CO<sub>2</sub>.  
Fuente: Los autores.

Las mezclas E10 y E20 son prácticamente idénticas en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, emisiones medias bajo condiciones de ralentí y sin realizar cambios en el ajuste de calibración del motor. En estas condiciones, algunas propiedades del combustible, como la velocidad de llama laminar y temperatura de vaporización pueden imponerse a la energía contenida en el combustible, como el poder calorífico, para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

En la Fig. 13, las medias de las emisiones de CO<sub>2</sub> describen una marcada influencia lineal de la RC en las emisiones de CO<sub>2</sub>, con una mayor inclinación para el aluminio, lo que indica una mayor sensibilidad de las emisiones a los cambios en las propiedades térmicas de los materiales de la cámara de combustión. De igual manera ocurre para el CO, los valores más bajos de emisiones de CO<sub>2</sub> ocurren con la culata de aluminio.

Las menores emisiones de CO<sub>2</sub> (4,96% en volumen) bajo las condiciones de los experimentos llevados a cabo en este trabajo corresponden a la combinación de culata de aluminio, RC de 6,6 y mezcla E20. Las pruebas con mayores emisiones de CO<sub>2</sub> (12,34% en volumen) corresponden a la combinación de culata de aluminio, RC 7,2 y mezcla E20. La aparente contradicción entre las gráficas de medias y las superficies de respuesta en relación con el material de la culata es debida a que el rango de variación del CO<sub>2</sub> es mayor para el aluminio que para la fundición. Debido a esto, el análisis de medias entrega valores de CO<sub>2</sub> mayores para la fundición con respecto al aluminio.

**Análisis de emisiones de hidrocarburos.** El análisis de varianza para hidrocarburos se presenta en la Tabla 8. Se observan diferencias significativas en el factor de RC, seguido por el factor de material de la culata y la interacción de estos dos factores. El diagrama de Pareto de la Fig. 14, confirma la fuerte influencia de la RC en las emisiones de HC. A diferencia del diagrama de Pareto para el CO<sub>2</sub>, la composición de la mezcla ejerce cierta influencia en los niveles de emisiones HC no quemadas. Incrementando el contenido de etanol en la mezcla, las emisiones de HC se disminuyen considerablemente en condiciones de ralentí.

En la Fig. 15 se ilustra la gráfica de medias de las emisiones de HC. El incremento de la RC se traduce en una reducción de las emisiones HC. Las medias de HC son menores para relación de 7,2, lo cual se explica por el mejoramiento del proceso de combustión, la reducción del área de intersticios y del volumen de la cámara de combustión.

Tabla 8.

Análisis de varianza de emisiones de hidrocarburos

| Fuente      | Suma de Cuadrados | GdL | Cuadrado Medio | Razón-F              | Valor-P |
|-------------|-------------------|-----|----------------|----------------------|---------|
| A:Material  | 1,6524e6          | 1   | 1,6524e6       | 31,79                | 0,1117  |
| B: CR       | 8,21509e6         | 1   | 8,21509e6      | 158,06               | 0,0505  |
| C:Mezcla    | 2,82816e5         | 1   | 2,82816e5      | 5,44                 | 0,2578  |
| AB          | 8,48364e5         | 1   | 8,48364e5      | 16,32                | 0,1545  |
| AC          | 2,89446e3         | 1   | 2,89446e3      | 0,06                 | 0,8525  |
| BC          | 8,61263e3         | 1   | 8,61263e3      | 0,17                 | 0,7539  |
| Error total | 5,19757e4         | 1   | 5,19757e4      |                      |         |
| Total       | 1,10622e7         | 7   |                | R-Square = 99,5301 % |         |

Fuente: Los autores.

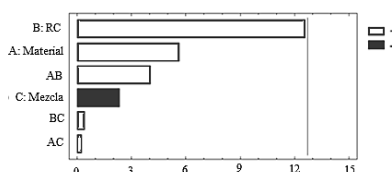


Figura 14. Diagrama de Pareto para emisiones HC

Fuente: Los autores.

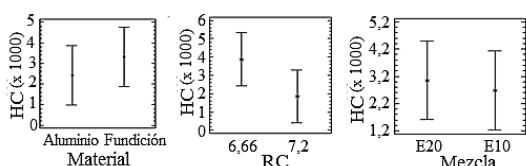


Figura 15. Gráficos de medias para las emisiones de hidrocarburos.

Fuente: Los autores.

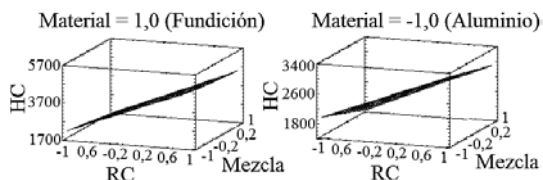


Figura 16. Superficie de respuesta para las emisiones HC.

Fuente: Los autores.

Con la culata de aluminio las emisiones de HC son menores que usando la culata de fundición. La media de emisiones de hidrocarburos es ligeramente superior para la mezcla E20. Es difícil concluir sobre el efecto de la interacción de la RC y material de culata en las emisiones de HC, aunque una explicación podría darse a partir de las particularidades de la combustión y la limpieza del volumen adicional de la precámara creada para reducir la RC, donde se posiciona la bujía de encendido (efectivamente, el tipo de trabajo no contempla la valoración de las alteraciones del proceso de combustión causadas por la precámara).

En la Fig. 16 se presenta la superficie de respuesta de las emisiones de HC en función de la RC y el material de la culata. Se observa que las pendientes de las emisiones de HC en función de la RC son más pronunciadas para la culata de fundición que para la de aluminio. La menor cantidad de emisiones HC (1438,57 ppm) se obtienen con una combinación de factores de culata de aluminio, mayor RC (7,2) y mezcla E20. La mayor cantidad de emisiones HC (4795,27 ppm) corresponde a la interacción de culata de fundición, menor RC y mezcla E20.

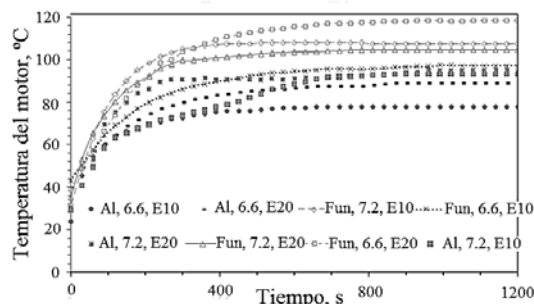


Figura 17. Histórico de temperaturas del motor durante el calentamiento.

Fuente: Los autores.

Tabla 9.

Tiempo requerido para alcanzar la temperatura objetivo de motor.

| Número de prueba   | Tiempo, $t_{75^{\circ}\text{C}}$ , min |
|--------------------|--|
| 1 (Al, 6,6, E10)   | 6                                      |
| 2 (Al, 6,6, E20)   | 3,65                                   |
| 3 (FUND, 7,2, E10) | 1,5                                    |
| 4 (FUND, 6,6, E10) | 2,85                                   |
| 5 (Al, 7,2, E20)   | 1,9                                    |
| 6 (FUND, 7,2, E20) | 2,1                                    |
| 7 (FUND, 6,6, E20) | 1,7                                    |
| 8 (Al, 7,2, E10)   | 5,4                                    |

Fuente: Los autores.

Tabla 10.

Análisis de varianza del tiempo de calentamiento del motor.

|             | Suma de Cuadrados | GdL | Cuadrado Medio | Razón-F              | Valor-P |
|-------------|-------------------|-----|----------------|----------------------|---------|
| A:Material  | 1,36125           | 1   | 1,36125        | 1,29                 | 0,4590  |
| B: CR       | 5,12              | 1   | 5,12           | 4,87                 | 0,2708  |
| C:Mezcla    | 9,68              | 1   | 9,68           | 9,21                 | 0,2027  |
| AB          | 0,045             | 1   | 0,045          | 0,04                 | 0,8701  |
| AC          | 0,0245            | 1   | 0,0245         | 0,23                 | 0,7137  |
| BC          | 3,51125           | 1   | 3,51125        | 3,34                 | 0,3187  |
| Error total | 1,05125           | 1   | 1,05125        |                      |         |
| Total       | 21,0137           | 7   |                | R-Square = 94,9973 % |         |

Fuente: Los autores.

#### 4.4. Análisis del calentamiento

Las curvas de variación de la temperatura del motor durante el periodo de calentamiento operando en vacío, después del arranque del motor, son presentadas en la Fig. 17. En la Tabla 9, se muestra el periodo de calentamiento del motor, definido aquí como el tiempo requerido para alcanzar una temperatura de 75°C.

Es importante señalar las elevadas temperaturas de culata alcanzadas en las pruebas correspondientes a la culata de hierro fundido en combinación con el valor más alto de la RC. Como es de esperar, la temperatura en estado estacionario es menor para los ensayos con culata de aluminio. Con la culata de fundición y RC baja, el aumento del contenido de etanol tiene un efecto muy grande, superando el sobrecalentamiento relativo los 20 °C.

En la Tabla 10 se tiene el análisis de varianza para el calentamiento del motor.

Aunque no hay una diferencia significativa del efecto de los factores sobre el calentamiento del motor, sí puede observarse que el material de la culata tiene una mayor influencia, seguido de la mezcla de combustible. El diagrama de Pareto de la Fig. 18 confirma la importancia del material de la culata en el calentamiento del motor.

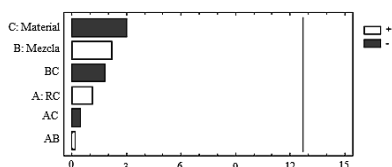


Figura 18. Diagrama de Pareto para el tiempo de calentamiento del motor.  
Fuente: Los autores.

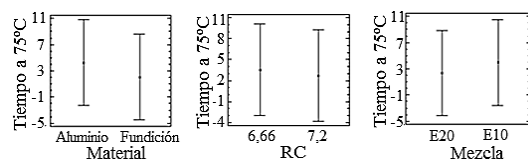


Figura 19. Gráficos de medias para el tiempo de calentamiento del motor.  
Fuente: Los autores.

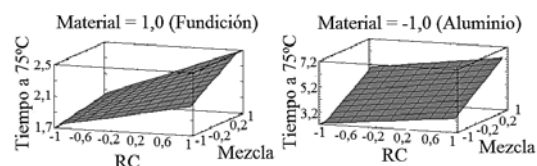


Figure 20. Superficie de respuesta del tiempo de calentamiento del motor.  
Fuente: Los autores.

En la Fig. 19, se muestran los diagramas de medias del tiempo de calentamiento. A partir de ellos, se puede observar que la temperatura de calentamiento de 75°C se alcanza primero en el motor con culata de hierro fundido y luego en el de aluminio. En ambos casos, la presencia de etanol y el incremento de la RC mejoran la combustión y el tiempo de calentamiento del motor disminuye. Las temperaturas de estado estacionario del motor bajan con el aumento de la RC, con la mayor conductividad del material y con el mayor contenido de etanol. Las diferencias de temperatura de estado estacionario con el cambio de E10 a E20 son mayores cuando el material es de mayor conductividad térmica.

En la Fig. 20 se tienen las superficies de respuesta del tiempo de calentamiento. El calentamiento más lento se realiza con la combinación de culata de aluminio, menor RC y mezcla E10. El motor tiene el calentamiento más rápido, 1,7375 min, con la culata de fundición, RC 7,2 y mezcla combustible E20.

## 5. Conclusiones

En el presente artículo se ha presentado la exploración de la influencia combinada de la RC, el material de la culata y el contenido de etanol en la gasolina sobre el desempeño de un motor mono-cilíndrico comercial pequeño, siguiendo una metodología de diseño de experimentos. Los ensayos se han realizado sin carga y la valoración del desempeño se ha hecho a través de las revoluciones del cigüeñal, tomado como indicador de variación de la potencia asumiendo constantes las pérdidas mecánicas, el consumo volumétrico de combustible por ciclo, las emisiones en los gases de escape y el tiempo de calentamiento hasta alcanzar la temperatura de 75 °C en las superficies de la culata.

Tabla 11.

Optimización de las variables de respuesta

| Variable de respuesta                      |        | Material | Relación de compresión | Mezcla | Valor   |
|--|--------|----------|------------------------|--------|---------|
| Consumo de combustible por ciclo, ml/ciclo | Mínimo | Aluminio | 7,2                    | E20    | 0,00412 |
| Velocidad de motor, rpm                    | Máximo | Aluminio | 7,2                    | E10    | 2089,75 |
| CO, %                                      | Mínimo | Aluminio | 6,6                    | E10    | 0,20375 |
| CO <sub>2</sub> , %                        | Máximo | Aluminio | 7,2                    | E20    | 12,3338 |
| HC, ppm                                    | Mínimo | Aluminio | 7,2                    | E10    | 1483,57 |

Fuente: Los autores.

Las combinaciones óptimas de los factores para el motor estudiado, bajo condiciones de operación en ralentí se resumen en la Tabla 11. Las propiedades térmicas del aluminio y la mayor RC favorecen el desempeño del motor y la reducción de las emisiones.

En general, en las condiciones de los ensayos (operación en ralentí del motor sin afinamiento de relación aire/combustible, ni de avance de encendido) y dentro de los niveles de los factores, las mezclas de combustible E10 y E20 tuvieron un comportamiento muy similar en lo que respecta a las emisiones, confirmando los resultados encontrados por otros investigadores [5,7,8,10,19,30].

A iguales condiciones de operación, las revoluciones del motor son mayores cuando su culata es de fundición, que cuando es de aluminio. El tiempo requerido por el motor para alcanzar una temperatura de operación estable es menor cuando se opera con culata de fundición.

Se evidencia que la RC es el factor que más influye en cada una de las tres respuestas estudiadas. El incremento en la RC reduce el consumo de combustible, siendo mayor esta reducción cuando se opera con E20.

La velocidad del motor se ve reducida cuando el motor opera con una menor RC. Adicionalmente, el motor presenta mayor velocidad de giro cuando se alimenta con E10, siendo este incremento más notable cuando se emplea la culata fabricada en aluminio.

Las emisiones de CO se reducen a medida que la RC aumenta. Por su parte, una reducción en el contenido de etanol del combustible muestra, en general, un incremento en las emisiones de CO.

La propuesta hecha en este trabajo, de evaluar la influencia en el desempeño del motor del cambio de material de la culata, estimando el consumo cíclico de combustible y tiempo de calentamiento es, a juicio de los autores, una iniciativa original en nuestro medio. Se pondera la fabricación de una parte importante del motor como la culata y el tiempo de calentamiento como parámetro de calidad importante. En una fase posterior del trabajo se estudiará el comportamiento bajo carga del motor, bajo las combinaciones de los factores estudiados con afinamiento del motor para cada mezcla.

## Referencias

- [1] Holmborn, J., Alternative fuels for internal combustion engines. A literature review on fuel properties to guide future fuel candidates for

- internal combustion engines. Institutionen för Maskinkonstruktion. Skolan för industriell teknik och management. KTH. March 2015.
- [2] Kojima, M. and Johnson, T., Potential for biofuels for transport in developing countries. UNDP/World Bank Energy Sector Management Assistance Programme (ESMAP), 2005.
- [3] Hammond A., Alcohol: A Brazilian answer to the energy crisis. Science, New series, 195(4278), pp. 564-566, 1977.
- [4] Bayraktar, H., Experimental and theoretical investigation of using gasoline-ethanol blends in spark-ignition engines. Renewable Energy, 30, pp.1733-1747, 2005. DOI: 10.1016/j.renene.2005.01.006.
- [5] Hsieh, W., Chen, R., Wu, T. and Lin, T. Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels. Atmospheric Environment. 36(3), pp. 403-410, 2002, DOI: 10.1016/S1352-2310(01)00508-8.
- [6] Gravalos, I., Moshou, D., Gialamas, T., Xyradakis, P., Kateris, D., and Tsiropoulos., Z., Performance and emission characteristics of spark ignition engine fuelled with ethanol and methanol gasoline blended fuels, Environmental Sciences, Alternative Fuel, 2011, DOI: 10.5772/23176.
- [7] Sarkar, A. Chowdhuri, A. Bhowal, A.J. and Mandal, B.K., The performance and emission characteristics of si engine running on different ethanol-gasoline blends. International Journal of Scientific and Engineering Research, 3(6), pp. 1-6, 2012.
- [8] Yücesu, H.S., Topgül, T., Cinar, C. and Okur, M., Effect of ethanol-gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in different compression ratios. Applied Thermal Engineer, 26(17-18), pp. 2272-2278, 2006. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.03.006.
- [9] Ríos, L.C., Quirama, L.F. y Gaviria, L.G., Informe ejecutivo: Determinación del impacto producido por el uso del E20 en el parque automotor colombiano. Universidad Tecnológica de Pereira, Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos y Potencia Mecánica, Pereira, Colombia, 2013.
- [10] Mantilla, J., Modelado de la combustión en mezclas gasolina-etanol en motores de combustión interna, PhD. Thesis. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia, 2010,
- [11] Frank, R.M. and Heywood, J.B., The effect of piston temperature on hydrocarbon emissions from a spark-ignited direct-injection engine. SAE Technical Paper, 910558, 1991. DOI: 10.4271/910558.
- [12] Kaplan, J. and Heywood, J., Modeling the spark ignition engine warm-up process to predict component temperatures and hydrocarbon emissions. SAE Technical Paper, 910302, 1991. DOI: 10.4271/910302
- [13] Monteiro-Sales, L.C. and Sodré, J.R., Cold start emissions of an ethanol-fuelled engine with heated intake air and fuel. Fuel, 95(1), pp. 122-125, 2012. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.11.067.
- [14] Shayler, P.J., Chik, J.P. and Ma, T., Correlation of engine heat transfer for head rejection and warm-up modelling. SAE Technical Paper, 971851, 1997. DOI: 10.4271/971851.
- [15] Orbital Engine Company, A literature review based assessment on the impacts of a 10% and 20% ethanol gasoline fuel blend on non-automotive engines, Report to Environment Australia, 2002.
- [16] Kalghatgi, G.T., McDonald, C.R. and Hopwood. A.B., An experimental study of combustion chamber deposits and their effects in a spark-ignition engine. SAE Technical Paper, 950680, 1995. DOI: 10.4271/950680.
- [17] Jaichandar, S. and Tamilporai, P., Low heat rejection engines – An overview. SAE Technical Paper, 2003-01-0405, 2003. DOI: 10.4271/2003-01-0405.
- [18] Kamo, R., Assanis, D.N. and Bryzik, W., Thin thermal barrier coatings for engines. SAE Technical Paper, 890143, 1983. DOI: 10.4271/890143.
- [19] Waytulonis, R., Kittelson, D. and Zarling, D., Report to the Minnesota Department of Commerce. E20 effects in small non-road SI engines. A literature and information search. University of Minnesota, Center for Diesel Research, 2008.
- [20] Romero, C., Contribución al conocimiento del comportamiento térmico y la gestión térmica de los motores de combustión interna alternativos. Ph.D. Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Spain, 2009.
- [21] Degrauwe, B., Contribution to the thermal management of DI diesel engines. Ph.D. Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Spain, 2006.
- [22] Torregrosa, A.J., Olmeda, P., Martin, J. and Degrauwe, B., Experiments on the influence of inlet charge and coolant temperature on performance and emissions of a DI diesel engine. Experimental Thermal and Fluid Science, 30(7), pp. 633-641, 2006. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2006.01.002.
- [23] Torregrosa, A.J., Broatch, A., Olmeda, P. and Romero, C., Assessment of the influence of different cooling system configurations on engine warm-up, emissions and fuel consumption. International Journal of Automotive Technology, 9(4), pp. 447-458, 2008. DOI: 10.1007/s12239-008-0054-1
- [24] Romero, C., Torregrosa, A., Olmeda, P. and Martin, J., Energy balance during the warm-up of a diesel engine. SAE Technical Paper, 2014-01-0676, 2014. DOI: 10.4271/2014-01-0676.
- [25] Romero, C., Torregrosa, A.J., Olmeda, P. and Martín, J., A tool for predicting the thermal performance of a diesel engine. Heat Transfer Engineering, 32(10), pp. 891-904, 2011. DOI: 10.1080/01457632.2011.548639.
- [26] Obert, E.F., Motores de combustión, interna análisis y aplicaciones, CECSA, 26a edición, México, 2000.
- [27] Bascunana, J.L., Divided combustion chamber gasoline engines. A review for emissions and efficiency. Journal of the Air Pollution Control Association, 24(7), pp. 674-679, 1974. DOI: 10.1080/00022470.1974.10469956.
- [28] ECOPETROL. Certificado de análisis biogasolinas, protocolo E20. Empresa Colombiana de Petróleos - Ecopetrol, 2011.
- [29] Trapy J.D. and Damiral P., An investigation of lubricating system warm-up for the improvement of cold start efficiency and emissions of SI automotive engines. SAE Technical Paper, 902089, 1990. DOI: 10.4271/902089
- [30] Lin, W., Chang, Y. and Hsieh, Y., Effect of ethanol gasoline blends on small engine generator energy efficiency and exhaust emission. Journal of the Air & Waste Management Association, 60(2), pp. 142-148, 2010. DOI: 10.3155/1047-3min289.60.2.142

**C.A. Romero-Piedrahita**, es Ing. automovilista y MSc. del Instituto Politécnico de Bielorrusia graduado en 1986, Esp. en Instrumentación Física de la Universidad Tecnológica de Pereira en 1992, MSc. en Motores de Combustión Interna del Centro de Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, España, en 2007, Dr. en Sistemas Propulsivos de Medios de Transporte de la Universidad Politécnica de Valencia, España, en 2009. Actualmente vinculado como profesor de la Facultad de Tecnología de la Universidad Tecnológica de Pereira. Sus áreas de investigación incluyen Máquinas de Combustión Interna, Diseño de automóviles y Diseño de Máquinas.  
ORCID: 0000-0001-5647-1918

**L.A. Mejía-Calderón**, es Ing. Mecánica por la Universidad Tecnológica de Pereira en 1999, MSc. en Sistemas Automáticos de Producción por la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, en 2005, MSc. en Ingeniería Mecánica en 2009 y Dra. en Ingeniería por la Universidad Politécnica de Valencia, España, en 2016. Actualmente trabaja como docente de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Sus áreas de investigación incluyen modelado y simulación de sistemas multicuerpo, teoría de máquinas y mecanismos y robótica.  
ORCID: 0000-0003-3008-2476

**Y.A. Carranza-Sánchez**, es Ing. Mecánico en 1998 por la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, MSc. en Ingeniería Mecánica en la Universidad de los Andes, Colombia en 2000. En 2017 recibió el título de DSc. en la Universidad de São Paulo, Brasil. Actualmente es profesor de la Facultad de Tecnologías de la Universidad Tecnológica de Pereira. Sus áreas de interés son las ciencias térmicas y de los fluidos.  
ORCID: 0000-0001-6144-9037