

Efectos de la apertura de la válvula EGR en un motor de encendido por compresión, mediante termografía infrarroja

Effects of the opening of the EGR valve in a compression ignition engine through infrared thermography

Andrea Karina Bermeo Naula¹, Néstor Diego Rivera Campoverde², Doménica Jaqueline Flores Romero³, Juan Carlos Tapia Romero⁴, Christian Alfredo Mantilla León⁵

Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca-Grupo de Investigación de Ingeniería del Transporte, Calle Vieja 1230 y Elia Llut
Correspondencia Autores: abermeon@ups.edu.ec¹, nrivera@ups.edu.ec², dfloresr@est.ups.edu.ec³, jtapia@est.ups.edu.ec⁴, cmantilla@est.ups.edu.ec⁵.

Recibido: octubre 2017, **Publicado:** diciembre 2017

Resumen— El presente trabajo muestra efectos de la apertura de la válvula EGR en la combustión de un MEC (motor encendido por compresión) CRDI (common rail direct injection), por medio de imágenes termográficas, cuando el motor se encuentra en un estado óptimo de funcionamiento y en un estado simulado en el que se comanda la válvula EGR y se restringe parcialmente el área del escape. También detalla la importancia de la válvula EGR (exhaust gas recirculation) en el marco ambiental, así como su funcionamiento y su intervención conjuntamente con el MEC. Se describe el equipo con el que se realiza la investigación, los factores que influyen en las mediciones y el programa de la cámara termográfica para visualizar los espectros termográficos. Para el diseño experimental se utilizó el software Minitab®, el cual permite examinar la relación entre una variable de respuesta y un conjunto de variables, identificando el “grupo vital” de factores controlables y así poder optimizar la respuesta.

Palabras Clave— *Válvula EGR, MEC, CRDI Diseño experimental.*

Abstract— The present work shows effects of the opening of the EGR valve (exhaust gas recirculation) in the combustion of a MEC (compression ignition engine) CRDI (Common Rail direct injection), by means of thermographic images, when the engine is in an optimal state of operation and in a simulated state in which the EGR valve is commanded and the area of the exhaust is partially restricted. It also details the importance of the EGR valve (exhaust gas recirculation) in the environmental framework, as well as its operation and its intervention in conjunction with the MEC. It describes the equipment with which the research is carried out, the factors that influence the measurements and the program of the IRSOFT® thermal imager to visualize the thermographic spectra. For the experimental design, Minitab® software was used to examine the relationship between a response variable and a set of variables, identifying the "vital group" of controllable factors and thus to optimize the response

Keywords— *Valve EGR, MEC, CRDI, Experimental design.*

I. INTRODUCCIÓN

Los cambios de temperatura en un mecanismo pueden ser síntomas de anomalías en el funcionamiento del mismo, es por ello que el estudio de estos cambios resulta de gran importancia en procesos de análisis

predictivos con el fin de evitar posteriores fallos. Una de las técnicas para predecir ciertos fallos es mediante la realización de análisis termográficos, para lo cual hacemos uso de ciertos instrumentos de medición, siendo la cámara termográfica Testo 882 la empleada en nuestro análisis, la misma que nos proporcionará la información necesaria en cuanto a las muestras determinadas. Mediante la utilización de firmas térmicas se establecerá la detección de fallos, en la que se estima una comparación de las diferencias térmicas con imágenes patrón obtenidas con relación al funcionamiento del motor en condiciones normales. Los puntos de análisis, constituyen la zona en la que se determina la lectura de las temperaturas, siendo estos los indicios de estudio al presentarse una variación en la magnitud de este parámetro. Considerando todos los factores que intervienen y afectan de manera directa e indirecta en la investigación se emplea una herramienta de análisis estadístico que permita plantear y desarrollar el experimento para obtener validez en los resultados

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el proceso de investigación se utiliza un motor de encendido por compresión CRDI 2.0 Hyundai que presenta las características mostradas en la tabla 1.

TABLA 1
Características del motor CRDI Hyundai.

Número de cilindros	4 en línea
Calibre*Carrera	83*92 mm
Cilindrada	2000(1991 cm ³)
Orden de encendido	1-3-4-2
Relación de compresión	17.7:1
Potencia Máxima	110.45 kW
Torque/rpm	421 m/1800

A. Proceso de medición y área seleccionada como objeto de medición

Para lograr una correcta obtención de firmas térmicas es necesario contar con un equipo adecuado que permita

calibrar datos de medición en tiempo real, así como seleccionar el área apropiada para la obtención de muestras. Para la toma de muestras se utiliza el proceso mostrado en la figura 1.



Fig 1. Ejecución del experimento

Área seleccionada como objeto de medición. El área seleccionada del motor para llevar a cabo el análisis se encuentra ubicada en el colector de escape, este elemento está fabricado de fundición de hierro con estructura perlítica, se establece esta sección debido a que el colector de escape trabaja bajo condiciones elevadas de temperatura, mayores a los elementos más cercanos, debido a esto durante la medición no se generen errores de radiaciones reflejadas por otros elementos. Las variaciones de temperatura que se producen en los gases de escape brindan una respuesta alta, ideal para el análisis.

Para el análisis del experimento se definen 3 puntos específicos, como objetos de estudio en el área seleccionada, tales puntos se pueden apreciar en la figura 2. Se establece los tres puntos M1, M2 Y M3 como muestras de análisis debido a que se observan zonas estables de mayor relevancia para la investigación.

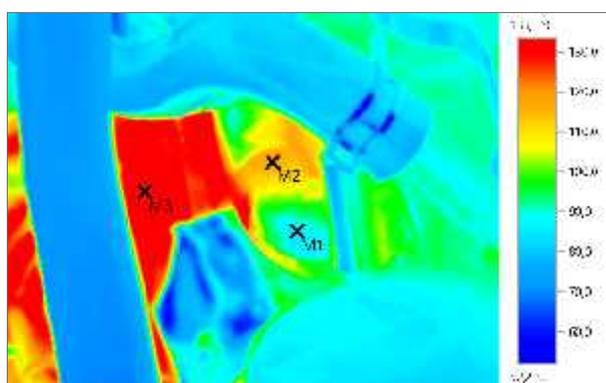


Fig 1. Espectrograma del área de estudio.

Parámetros a considerar para la medición. Previo a la toma de muestras mediante la cámara termográfica Testo 882, es necesario establecer ciertos parámetros que aporten con la obtención de una muestra precisa. Para ello se ha considerado los siguientes: Factores no

controlables. Se debe tomar en cuenta ciertas condiciones que no podemos controlar, pero que afectan de manera directa al muestreo, la cámara termográfica Testo 882 permite en su configuración la calibración de ciertos parámetros que reducen el error en la determinación de firmas térmicas.

Temperatura ambiente. La cámara termográfica permite introducir el valor de temperatura ambiente, con el fin de que ésta pueda calcular con precisión la temperatura del objeto. La temperatura ambiente en la que se desarrolla el experimento oscila entre 20°C y 27°C.

Presión Atmosférica. Tenemos que considerar que la presión atmosférica depende del sitio en el que vamos a efectuar las muestras, ya que afecta de manera directa a la temperatura del lugar, teniendo que recalibrar parámetros en la cámara termográfica, ya que cuanto mayor presión atmosférica del aire, mayor capacidad de absorber energía tendrá.

Humedad Relativa. La humedad relativa del aire es un parámetro que varía incluso durante períodos del día, por lo tanto, dicho parámetro no podemos controlar durante la obtención de muestras, sin embargo la cámara termográfica calcula el valor de humedad de cada punto de medición usando la temperatura ambiente y la humedad ambiente, este instrumento de medición termográfico presenta en la configuración la opción de calibrar la humedad actual presente en el aire.

El rango de la humedad relativa durante el periodo de la toma de espectrogramas se estableció entre 60% a 90% (Buchwald, Lautrich, & Maiwald, 2006).

Factores controlables. El análisis termográfico se realiza teniendo en cuenta ciertos parámetros que se relacionan con el régimen de funcionamiento del motor, entre los que tenemos la apertura de la válvula EGR y la restricción de la salida de gases de escape.

Régimen de rpm del motor. Para la toma de muestras se establece 3 regímenes de funcionamiento del motor: 820, 1660 y 2500 RPM, los mismos que fueron regulados de forma manual, mediante el mecanismo con el que cuenta el pedal del acelerador.

Apertura de la válvula EGR. Mediante la plataforma electrónica Arduino, se controla la variación de la apertura de la válvula EGR, comandada mediante la programación realizada en el software Matlab.

Para la cual se estableció 3 niveles de apertura: 0% 50% y 100%.

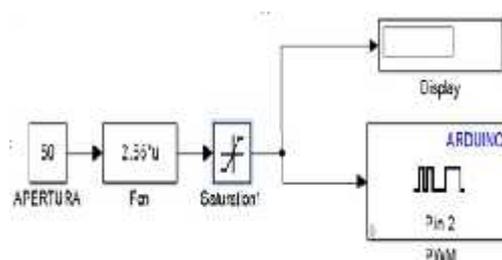


Fig 3. Circuito que comanda la válvula EGR.

Diámetro del Escape. Se realizan pruebas con el tubo de escape en condiciones normales, luego se restringe

parcialmente la zona de salidas de gases combustionados en el tubo de escape con dos medidas diferentes, esto con el fin de simular la obstrucción parcial del catalizador. Para lo que se establece los siguientes diámetros: 5cm, 3.61cm, 1cm.

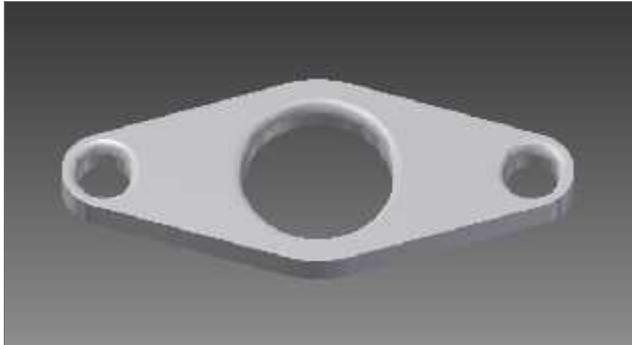


Fig. 2: Empaque que restringe el escape.

Para una mejor interpretación de las gráficas obtenidas al realizar el análisis en el software Minitab®, se transforman las áreas en datos porcentuales de restricción, los mismos que se presentan en la tabla 2.

Tabla II
Datos de la restricción del escape. Fuente: Los Autores

RESTRICCIÓN ESCAPE	
Área (cm ²)	%
19,63	0
10,21	48
0,79	96

B. Desarrollo del diseño experimental

Para el desarrollo del diseño experimental se utiliza el programa Minitab® que permite realizar diseños de superficies de respuesta. Identificados los factores de control con sus respectivos niveles, el programa proporciona un cierto número de combinaciones de las variables que permiten obtener muestras que optimicen y validen nuestra variable de interés.

Tomadas cada una de las muestras termográficas según el orden de las combinaciones que arrojó el programa, da como resultado la imagen térmica y muestras de gases de escape en cada una de las pruebas.

Posteriormente se utiliza el software IRSOFT, mediante el cual se realizan el análisis de las firmas térmicas, obteniendo de éste las temperaturas de los tres puntos M1, M2 Y M3 así como también utilizando el analizador de gases para obtener la constante de opacidad y la concentración de material particulado.

III. RESULTADOS

En la Figura 5, se compara los cambios en las medias de nivel para determinar cuáles variables categóricas influyen más en la respuesta.

%EGR (): se observa que la variación de de 0 a 50 influye en una disminución de la Temp.M1 de alrededor de 0,05°C y a partir de una apertura de 50

hasta 100 se produce un incremento en la Temp.M1 de 0,08°C a 0,15°C aproximadamente.

RPM (n): Se tiene un incremento en la Temp.M1 conforme aumente el número de n desde 820 a 1660, presentándose un decrecimiento de la Temp.M1 desde 1660 a 2500n.

RESTRICCIÓN ESCAPE (): Existe una mínima disminución de la Temp.M1 cuando es 0, sin embargo, al incrementar la restricción del escape de 48% a 96%, la Temp.M1 incrementa drásticamente.

IV. Puesto a que los efectos de interacción no son significativos, se puede decir que la magnitud del efecto de es mayor que las demás variables.

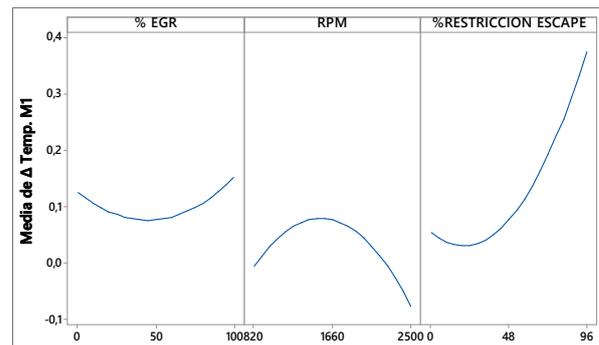


Fig. 3. Efectos principales para Temp. M1.

La región (zona gris) donde la Temp.M2 permanece constante, constatando así que a una apertura de 50 y 20 se presenta el punto estacionario de la respuesta Temp.M2 como se observa en la figura 6.

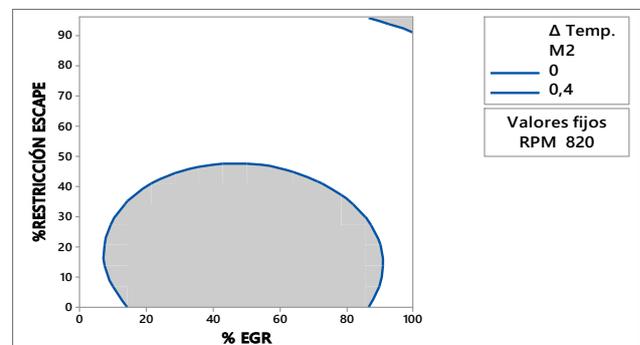


Fig 4. Contorno de Temp.M2.

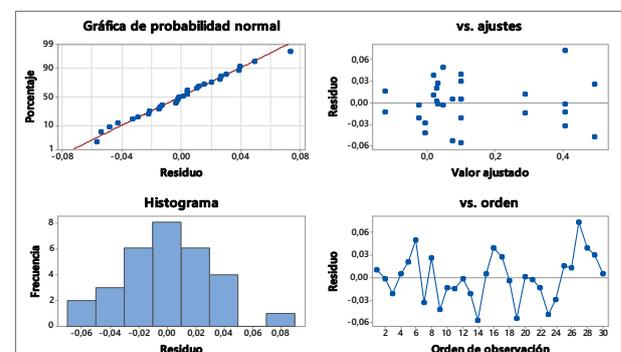


Fig. 5. Residuos para Temp.M3.

Las muestras alrededor de cero en la gráfica de residuos versus los valores ajustados se encuentran

distribuidas de forma aleatoria por lo que descartamos existencia de valores de varianza no constante, términos de orden más altos faltantes, pero se considera valores atípicos como se presenta en la figura 7. La dispersión aleatoria en la distribución de puntos alrededor de cero en la gráfica de residuos versus orden, muestra que no se evidencia relación en la distribución de los términos de error.

Se evalúa las interacciones de los factores que afectan la respuesta. Mediante los datos obtenidos en el análisis de varianza establecemos que los valores de $p=0,959$ para n el cual no es menor que $0,05$ por lo que no existe interacción entre las variables que afectan el P, mientras que las interacciones n^* y n^{**} presentan un valor de $p=0,001$, las mismas que son menor a $0,05$, estableciendo así la existencia de una interacción entre estas dos variables respectivamente como se muestra en la figura 8.

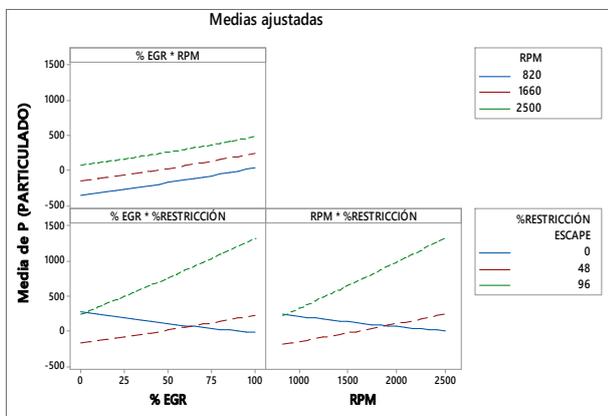


Fig 6. Interacción para P.

En la figura 9 se observa la optimización de la constante de opacidad (k) y material particulado (P) en relación con las muestras de temperatura M1, M2 y M3.

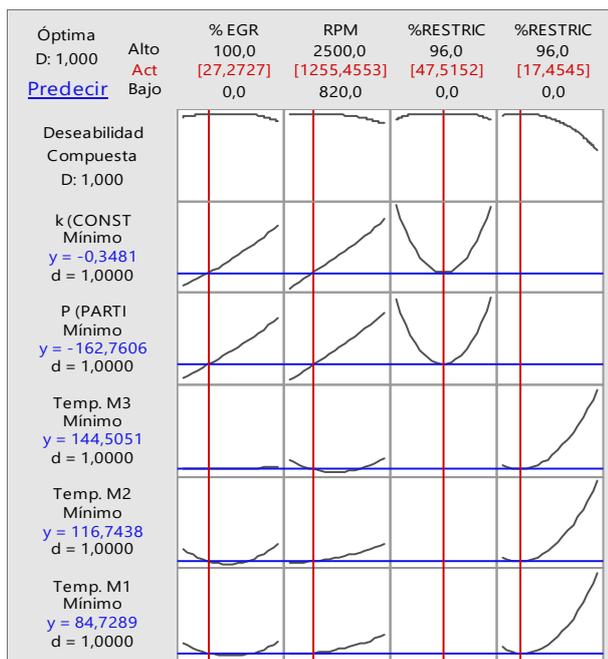


Fig 7. Optimización. Fuente: Los Autores

V. CONCLUSIONES

- Ñ El colector de escape es el lugar idóneo para tomar muestras de espectros termográficos, debido a que la energía radiada por elementos vecinos no influye mayormente en su temperatura.
- Ñ Los efectos de interacción no son significativos para las respuestas de las Temp.M1, Temp.M2, Temp.M1 y Temp.M2 lo que permite determinar que el efecto más influyente en las variables de respuesta es el porcentaje de Restricción de Escape.
- Ñ En las variables de respuesta de la Temp.M3 y Temp.M3 no se identifica cual es el factor con mayor significancia en las respuestas, debido a la interacción existente entre las variables, sin embargo, el mayor efecto se produce entre la interacción de RPM vs Restricción de Escape.
- Ñ Mediante el análisis de varianza se obtiene que el factor de RPM para las variables de respuesta de las Temp.M1, Temp.M2, Temp.M1 y Temp.M2 presenta un efecto lineal, por lo cual se establece los regímenes de 820 RPM y 2500RPM para la obtención de las gráficas de contorno y superficie.
- Ñ La respuesta de Temp.M3, a diferencia de las demás variables de respuesta presenta un comportamiento tipo silla, con su punto máximo a un régimen de 1600 RPM y una Restricción de Escape de 96%, mientras que exhibe su valor mínimo a un régimen de 2400RPM y un 10% de restricción de escape.
- Ñ Al presentarse un régimen de 1255,45 RPM, un porcentaje de 27,27 de EGR y una restricción del escape de 47,51 obtenemos una optimización en la disminución de material particulado y constante de opacidad, produciendo así una menor contaminación, mientras que la temperatura de funcionamiento del motor permanece estable en su punto más bajo.

REFERENCIAS

- [1] Aguirre, V., & Ortiz, B. (2014). *Elaboración de un módulo didáctico del sistema common rail del motor mazda BT 50 WL-C 2.5 CRDi diesel*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- [2] Audelo, M. (2012). *Implementación de un Banco de Pruebas para la Unidad de Control Electrónico de Vehículos con Sistemas de Inyección Electrónica para la Escuela de Ingeniería Automotriz*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- [3] Buchwald, R., Lautrich, G., & Maiwald. (2006). Boost and EGR System for the Highly Premixed Diesel Combustion. *SAE 2006 Congress & Exhibición*, 14.
- [4] Cabrera, P. (2013). *Aplicación de la medida de NOx para el control de motores diesel sobrealimentados*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [5] Hyundai, i. (12 de Agosto de 2017). *Hyundai Motor Islas Canarias*. Obtenido de <http://www2.hyundai.com/ic/es/Showroom/SUV/ix35/PIP/index.html>
- [6] Martínez, G. (2009). *Estudio de los efectos de la post inyección sobre el proceso de combustión y la formación de hollín en motores diesel*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

[7] Pla, B. (2009). *Análisis del proceso de la recirculación de los gases de escape de baja presión en motores Diesel sobrealimentados*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

[8] Reifarth, S. (2010). *EGR-Systems for Diesel Engines*. Royal Institute of Technology.

[9] Shrawan, S., & Sinha, S. K. (2004). Effect of EGR on the exhaust gas temperature and exhaust opacity in compression ignition engines. *Sadhana*, 275-284.

[10] Soler, A., & Lujan, M. (2010). *Investigación específica sobre sistemas de EGR y*