

ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN POR FALLAS EN UN MOTOR DIESEL UTILIZANDO TERMOGRAFÍA

Cristian García^{1*}, José Molina², José Segnini⁴, Mary Vergara^{2,3}, Néstor Rivera¹

¹Universidad Politécnica Salesiana, Ingeniería Automotriz, Grupo en Ingeniería de Transporte

²Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Grupo de Diseño y Modelado de Máquinas. DIMMA

³Universidad Nacional de Loja, Facultad De La Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables. Carrera de Ingeniería en Mecánica Automotriz.

⁴Pontificia Universidad Católica de Ecuador. Sede Ibarra. Escuela de Diseño. Grupo de Investigación en Diseño Sustentable. GIDISUS

*Autor para correspondencia: e-mail: cgarcia@ups.edu.ec

Recibido: 2018/10/24

Aprobado: 2018/12/12

DOI: <https://doi.org/10.26621/XV19.2018.12.A05.PUCESI.2550.6684>

RESUMEN

La legislación sobre emisiones de vehículos es cada vez más estricta en un esfuerzo por minimizar el impacto de motores de combustión interna sobre el medio ambiente. Dichas emisiones cambian drásticamente cuando existen fallas, por lo que esta investigación se centra en definir las relaciones que existen entre los datos que representan las condiciones de falla en un motor diésel, turboalimentado a través de análisis termográfico, considerando la cantidad de partículas y opacidad. Se han realizado 45 tipos de fallas asociadas a la apertura de la válvula de recirculación de gases de escape (EGR) y restricción en el escape con diferentes velocidades del motor. A estos datos, se les han analizado: la media con su desviación típica, la raíz de la media cuadrática (RMS), la significancia y la correlación, para determinar cuáles variables son representativas del comportamiento del motor y sus emisiones. Los resultados obtenidos muestran que, los parámetros estadísticos más relevantes que caracterizan las fallas inducidas son: los valores máximos y mínimos de temperatura, la media y el RMS. También se observa que, si se aumenta la apertura de la EGR y las revoluciones por minuto o disminuye el área de restricción en el escape, aumenta la contaminación por la emisión de gases.

Palabras clave: Motor de combustión interna, fallas, contaminación, termografía.

ABSTRACT

Vehicle emissions legislation is becoming stricter as it aims to minimize the impact of internal combustion engines on the environment. These emissions change drastically when there are faults. This research focuses on defining the relationships between data that represent the failure conditions in a turbocharged diesel engine through thermographic analysis, considering the quantity of particles and opacity. There have been 45 types of failures associated with the opening of the exhaust gas recirculation valve (EGR) and restriction in the exhaust with different engine speeds. To these data, we have analyzed the mean with its standard deviation, the root mean square (RMS), statistical significance and correlation to

determine which variables are strongly correlated. The results obtained show that the most relevant statistical parameters that characterize the induced faults are: the maximum and minimum values of temperature, the mean and the RMS. It is also observed that, if the opening of the EGR and increased the revolutions per minute or the restriction area in the exhaust decreases, the pollution increases.

Keywords: Internal combustion engine, faults, pollution, thermography.

INTRODUCCIÓN

El rápido aumento en el número de vehículos, el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación del medio ambiente, el efecto invernadero y todos los efectos adversos sobre la salud humana, requiere tanto la reducción de combustibles fósiles como las emisiones contaminantes, generadas por los motores de combustión interna, como se detalla en Arkadiusz y Jasiulewicz (2014); por esto, las actitudes en el siglo XXI han cambiado radicalmente pues se deben considerar la seguridad energética y la calidad del aire en las ciudades. Para el caso de los motores diésel, el problema de las emisiones necesita de procedimientos posteriores en sus sistemas: como el postratamiento de gases de escape, nuevos sistemas de combustión y mejoras en el control de todas las variables que afectan el funcionamiento de este sistema complejo, como los descritos en Rodríguez, (2014).

En esta dirección, las fallas en motores influyen de manera contundente en estas emisiones; por esto, es de vital importancia detectar los posibles fallos con la finalidad de controlar dicha emisión a través de una excelente condición del motor. Así, las investigaciones y desarrollos tecnológicos se centran, en parte, a definir fallas en motores con estudio de técnicas de mantenimiento basado en condición. Algunas de las técnicas más comúnmente utilizadas son el análisis de las vibraciones que considera el Análisis de Frecuencia, Orden, Tiempo-Frecuencia, Espectro, Ondas y el análisis basado en Modelos, como se presenta en (Van Tung y Bo-Suk, 2012; Liu, Feng y Si, 2012; The IMS Center, 2014; National Instruments, 2016). Otra técnica de interés es la termografía que, con un análisis detallado, permite la identificación de desgaste de elementos, los cuales disminuyen la eficiencia, debido a una emisión característica de calor, producida por los sistemas cuando están defectuosos, como se desprende de Mantilla y Tapia (2015), Monieta, (2018), presenta una visión general del uso de la termografía infrarroja para el diagnóstico, principalmente de pistones de motores de combustión en interno. En esta investigación, se han desarrollado 45 experimentos de fallas simuladas, para las cuales se han tomado como variables de salida firmas termográficas, donde los resultados muestran que el análisis de dichas variables es similar cuando se estudia la raíz de la media cuadrática (RMS), valores medios, máximos y mínimos, de acuerdo al cambio de las RPM, restricción del múltiple y apertura de la válvula EGR; mientras que la contaminación aumenta si se aumenta la apertura de la EGR y las revoluciones por minuto (RPM) o disminuye el área de restricción en el escape.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación definió el área de estudio tomando en el colector de escape en la zona de unión con el turbocompresor, como se observa en la figura 1. Esta región opera bajo condiciones elevadas de temperatura, las cuales son mayores a la de los elementos cercanos.

Lo anterior permite prevenir errores de radiación reflejada por componentes o elementos próximos a la región de estudio. Se puede establecer que las variaciones de temperatura observadas brindan una respuesta significativa para el análisis de las condiciones óptimas de operación y emisión, como se presenta en (Mantilla y Tapia, 2015).



Figura 1. Región del múltiple seleccionado como objeto de medición. Fuente: (Mantilla y Tapia, 2015, p.35).

Para realizar el experimento, se plantea realizar cambios en la apertura de la válvula de recirculación de gases de escape (EGR) y en la restricción del escape, tomando mediciones para termografía, partículas (P) y opacidad (K), con diferentes condiciones de funcionamiento en un motor de encendido por compresión, ubicado en una cámara semianecoica. Los experimentos se realizan en un banco de prueba de un motor de combustión interna, con un sistema de inyección directa (CRDi) de cuatro tiempos, con cuatro cilindros en línea, tipo Hyundai Santa Fé 2.0, cuyas características se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones del motor

Descripción	Características
Número de cilindros	4
Cilindrada	1991cm ³
Calibre	83mm
Carrera	92mm
Relación de compresión	17.7 : 1
Orden de inyección	1-3-4-2
Torque / rpm	421Nm/1800
Potencia Máxima	110.45

El ambiente para el muestreo se caracterizó por presentar una temperatura del refrigerante de 87 a 93 °C, Temperatura Ambiente de 19 a 25 °C, humedad relativa de 60 a 90 %, presión Atmosférica de 103 a 104 KPa. Se plantea un diseño experimental con superficie de respuesta Box-Behnken, en el cual se toman tres réplicas de las muestras con una corrida base de 15 y un total de 45 tratamientos. En la tabla 2 se detallan los factores y los niveles que afectan a las firmas termográficas P y K.

Tabla 2. Factores y Niveles del diseño experimental

Factores	Niveles			Unidades
	Bajo	Medio	Alto	
% de Apertura de EGR	0	50	100	%
RPM	820	1660	2500	RPM
	1,00	3,46	4,80	cm (diámetro)
Restricción del escape	0,78	9,44	18,10	cm ² (área)

El nivel de concentración de partículas y de opacidad en los gases de escape se midió utilizando el equipo de la serie MAHA®; mientras que para la recolección de las firmas térmicas se empleó la cámara Testo 882, cuya descripción se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Características de la Cámara Testo 882.

Propiedad	Valores
Campo visual / distancia mínima de enfoque	Objetivo estándar: 32°x23°/0.2m (0.66 ft)
Sensibilidad térmica (NETD)	<60 mk a 30°C (86 °F)
Resolución geométrica	Objetivo estándar: 1.7 mrad
Frecuencia de imagen	33 Hz dentro de la UE, 9 Hz fuera de la UE
Enfoque	Manual + motorizado
Tipo de detector	FPA 320x240 pixeles, a-Si
Rango espectral	8-4 μm

Fuente: (Testo SE y Co. KGaA)

Con la realización de todos los ensayos referentes al diseño experimental seleccionado, se obtuvieron las muestras del diseño experimental correspondientes a opacidad, material particulado y muestras termográficas. Dicha obtención fue posible a través de la clasificación y selección de las muestras térmicas representativas del diseño establecido, las cuales se encontraban almacenadas en bancos de información. Un proceso similar fue realizado para las firmas térmicas, propias de las condiciones de operación, sin ningún nivel de intervención sobre la recirculación de gases de escape o en el área de escape, para las diferentes RPM del motor.

Procedimiento de análisis de las firmas térmicas

A fin de estimar las variables térmicas y estadísticas, se diseñó un procedimiento de análisis de las firmas térmicas, basado en un modelo que estima características energéticas a partir de los principios de transferencia de calor.

La primera etapa consiste en la selección y almacenamiento del grupo muestral, que fue procesado. De esta forma, en cada una de las imágenes termográficas, se deben seleccionar dos poblaciones; lo cual se realiza a través del software Testo. Las primeras dos muestras corresponden a todos los puntos de temperatura ubicados a lo largo de dos rectas que unen los puntos definidos sobre el múltiple de escape, identificados con los nombres M1, M2 y M3, tal como se muestra en la figura 2. La selección de dichos puntos como base de dichos segmentos responde a la homogeneidad térmica definida por (Mantilla y Tapia, 2015) en los alrededores de las zonas que los contienen; homogeneidad la cual transforma a dichas zonas en zonas de referencia.

El segundo grupo está integrado por todos los valores de temperatura del múltiple de escape observados en la imagen; siendo estos datos seleccionados por el usuario, a través del software TESTO IRSoft. Cabe destacar que la dirección y sentido de las rectas debe ser tal, que garantice que el rango de temperaturas registrado en las mismas, sea el mismo que el contenido en la superficie seleccionada. De esta forma, las rectas son muestras representativas de las temperaturas de la superficie y permiten estudiar fenómenos de transferencia de energía asociados a la superficie de la múltiple escogida.

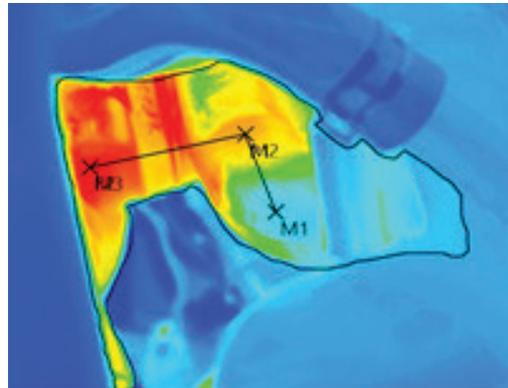


Figura 2. Firma termográfica en el múltiple

Una vez definidas las dos poblaciones muestrales, se procedió a almacenar estos datos en una matriz, para generar una interfaz adecuada para su análisis en programas estadísticos desde el programa de la cámara termográfica. Ambos grupos de datos son exportados en forma de matrices de datos a hojas de cálculo, identificadas de acuerdo al ensayo al que representan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinación del grupo muestral

Para obtener un resultado global por separado, primero se realizó un análisis de los resultados de termografía, donde se divide en tres intervalos correspondientes a diferentes zonas para análisis: una principal, que corresponde a toda la superficie del múltiple y otras secundarias, que corresponden a rectas tomadas del mapa termográfico: M2-M1, M2-M3 y M3-M1 para las 45 fallas, como se observa, a modo de ejemplo, en la figura 1 y con una cantidad de datos mostradas en la tabla 4.

La idea, con el estudio de las zonas fue conocer la región del múltiple de escape en la que el diseño experimental definido, describirá con el mayor nivel de ajuste y significancia posible, al fenómeno de estudio y, por lo tanto, determinará la conveniencia o no de ciertas zonas del múltiple; con el fin de realizar análisis cuantitativos y cualitativos de los resultados obtenidos, del proceso de análisis de firmas termográficas y del análisis de los resultados obtenidos a partir del mismo. Dicho proceso de selección, utilizó los valores de los coeficientes de determinación o de ajuste de los modelos de regresión matemáticos, obtenidos para cada variable de salida de un grupo muestral definido. A tal fin, se seleccionó al grupo muestral que presentó la mayor cantidad de variables de salida a los máximos niveles de coeficiente de determinación, de entre varios grupos muestrales definidos y estudiados sobre el múltiple.

Tabla 4. Cantidad de datos según el grupo y tipo de muestra.

Cantidad de datos de temperatura por tipo de muestra según grupo muestral				
Tipo de Muestra	Data 01	Data02	Data03	Data04
Superficie seleccionada	16977	4567	1858	242
Recta M2-M1	44	35	27	14
Recta M3-M2	84	43	31	17
Ambas Rectas (M3-M1)	128	78	58	31

La naturaleza de este proceso fue completamente exploratoria pues inicialmente no se contaba con investigaciones previas o conocimientos que permitieran seleccionar la sección o región mencionada. Para satisfacer este requerimiento, la investigación inició con el análisis de un primer grupo muestral, denominado Data01, el cual estaba conformado por un área contentiva de toda la región, del múltiple de escape observada en la firma y de dos rectas cualesquiera ubicadas dentro de dicha área, continuas entre sí y cuyos rangos de temperatura fueran aproximados al rango de temperatura existente en el área que las contenía; tal como se muestra en la figura 3.

Con la aplicación del procedimiento de análisis de firmas y de resultados emanados del mismo, se obtuvieron los niveles de ajuste descritos en la tabla 5 para la Data01. A partir del cual se observó que los mayores niveles de ajustes, de la mayoría de las variables de salida, se obtienen al estudiar toda la superficie seleccionada con ciertas excepciones de algunas variables térmicas, las cuales mejoran sus niveles de ajuste en las regiones circundantes de las rectas definidas en dicho grupo muestral. Los máximos niveles de los coeficientes de ajuste obtenidos en este primer grupo muestral, condujeron a la búsqueda de otras regiones que permitieran la obtención de modelos matemáticos de regresión, con mayores niveles de ajustes; a fin de que los análisis y estudios posteriores fueran los más significativos posibles, según el diseño experimental planteado. Debido a ello, un nuevo filtrado fue necesario para lo cual, se seleccionó un nuevo grupo muestral denominado Data02, que representa una sección específica del grupo muestral anterior, ubicado según se muestra en la figura 3.

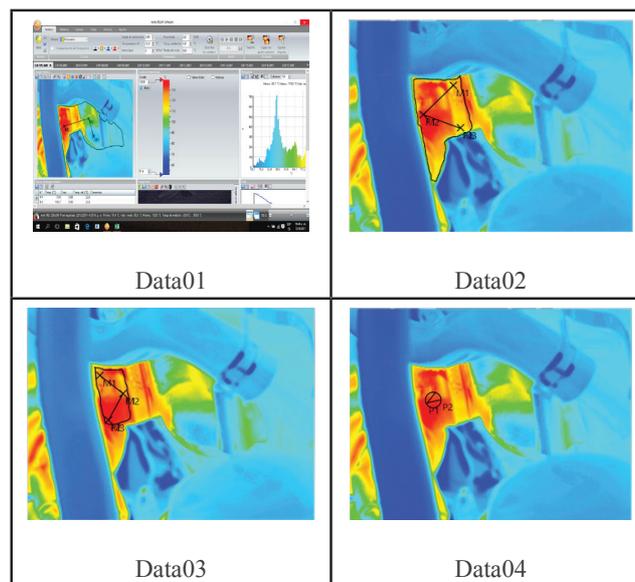


Figura 3. Grupos muestrales estudiados

La selección de esta ubicación buscó disminuir posibles efectos de ruido, debido al amplio rango de los valores muestrales de las temperaturas observadas en el primer grupo muestral y al mismo tiempo mantener la mayor cantidad de puntos muestrales posibles; razón por la cual su ubicación corresponde con la indicada en la figura 2. Los resultados para este grupo muestral se pueden observar en la tabla 5, en donde se ve un incremento general en los niveles de ajuste de todas las variables de salida. Por tal razón, se concluye que, a menores rangos de temperaturas del grupo muestral seleccionado, se observaron incrementos en los valores de los coeficientes de determinación de los modelos de regresión, obtenidos para todas las variables térmicas formuladas, sin importar el tamaño de los datos. Estas conclusiones fueron respaldadas por los resultados de dos nuevos grupos denominados Data03 y Data04, los cuales fueron estudiados en el mismo orden de su numeración; en donde los resultados del primero establecieron las características del siguiente.

La selección del grupo muestral Data03 tomó como punto de partida los resultados obtenidos del grupo Data02, de los cuales se establecieron los siguientes criterios:

- El grupo muestral debe estar definido por un área y dos rectas contiguas, del mayor tamaño posible, ubicadas en una zona que presente la menor variación de temperatura entre sus puntos muestrales y cuyas rectas presenten un rango de temperaturas similar al rango de la muestra del área definida.

- Si se obtiene un incremento apreciable en los coeficientes de significancia, respecto al grupo precedente y/o la cantidad de variables con mayores niveles de significancia aumenta, se debe formular un nuevo grupo muestral con un área de menor tamaño, ubicada dentro de la sección del grupo muestral precedente.

En caso de que las nuevas regiones de estudio, no concuerden con la geometría del múltiple de escape, se utiliza un círculo para delimitar el área de estudio.

La aplicación experimental de estos criterios condujo a definir las características del grupo Data04, el cual obtuvo los mayores niveles de ajuste entre todos los grupos estudiados, tal como se observa en la tabla 5. Sin embargo, no se formuló un nuevo grupo muestral, pues el rango de temperatura para esa misma región, no presenta mayores cambios que los ya presenciados.

Parámetros estadísticos y su correlación

Para analizar los datos de temperatura en la superficie del múltiple, primero se han determinado los parámetros estadísticos de los mapas termográficos, según: media, varianza, desviación estándar, mediana, RMS, factor de curtosis, factor de cresta, potencia intervalo de frecuencia y se ha medido el particulado, la opacidad y la temperatura.

Tabla 5. Coeficientes de determinación máximos y su ubicación en la muestra para los grupos muestrales

	Niveles máximos de ajuste (R2) de los modelos obtenidos para las variables del D.E							
	Data 01		Data 02		Data 03		Data 04	
Variables de Salida del Diseño	Valor Máx. (%)	Muestra	Valor Máx. (%)	Muestra	Valor Máx. (%)	Muestra	Valor Máx. (%)	Muestra
T. Media	53,59	Superficie	58,32	M2-M1	61,4	M2-M1	62	M2-M1
Varianza	61,3	Superficie	63,16	Superficie	58,4	M3-M1	47,8	Superficie
Desviación STD	62,46	Superficie	70,88	M3-M2	63,6	M2-M1	51	Superficie
T. Mediana	51,98	M3-M2	58,68	M2-M1	62,5	M2-M1	62	M2-M1
T. Máx.	61,15	Superficie	61,55	M2-M1	62,2	M2-M1	62,5	M2-M1
T. Min.	50,43	M3-M1	51,57	M3-M2	57,7	M3-M2	61,8	Superficie
RMS	54,54	Superficie	58,49	M2-M1	61,4	M2-M1	62	M2-M1
Curtosis	45	Superficie	71,6	M3-M2	51	Superficie	54	Superficie
Asimetría	37	M2-M1	69,5	M3-M2	51	Superficie	48	M3-M1
P	83,88	Superficie	83,88	Superficie	83,8	Superficie	83,8	Superficie
K	84	Superficie	84	Superficie	84	Superficie	84	Superficie

Un ejemplo de estos datos, para 15 fallas de las 45 (tratamientos) se presentan en la tabla 6. De forma análoga, se han calculado los parámetros estadísticos para las rectas M2-M1 y M2-M3. Los subconjuntos de datos para termografía, dados por las rectas, busca verificar si analizando menor cantidad de datos, la respuesta sigue siendo análoga y la desviación por cambios de temperatura es lo más pequeña posible.

Tabla 6. Datos para 15 fallas

Tipo de Falla	Variables de Respuestas procesadas por el modelo de análisis termográfico (Superficie)							Variables de Respuestas Emisiones	
	T. Media (C°)	Varianza	Desviación STD	T. Mediana (°C)	RMS	Curto-sis	Asimetría	Partic.	K (Ctte Opacidad)
1	105,8698	305,4859	17,4782	100,5000	107,3028	1,9407	0,4243	31,87	0,139
2	103,1825	239,0065	15,4598	99,9000	104,3342	1,8770	0,2775	35,07	0,151
3	126,3402	515,1685	22,6973	125,4000	128,3627	2,0745	0,1968	68,71	0,269
4	134,5278	817,4708	28,5914	137,9500	137,5323	1,6730	0,0314	90,98	0,334
5	102,6864	315,4178	17,7600	98,1000	104,2108	1,9763	0,4405	41,6	0,176
6	117,5269	499,7604	22,3553	116,3000	119,6341	1,7123	0,0835	1520	3,765
7	146,9091	995,6673	31,5542	147,9000	150,2594	1,9009	0,0618	85,62	0,321
8	156,6165	1.142,2913	33,7978	156,5000	160,2215	1,7382	0,0725	169,5	0,535
9	110,0325	328,2442	18,1175	106,6000	111,5141	1,8037	0,3081	25,24	0,112
10	114,3433	353,2462	18,7948	111,5000	115,8776	2,1091	0,3316	1520	3,765
11	139,9190	1.024,7769	32,0121	139,6000	143,5341	1,9706	0,1986	63,35	0,253
12	149,5868	2.055,3021	45,3354	137,2000	156,3054	2,0005	0,5728	208,9	0,629
13	115,0592	395,2381	19,8806	111,2000	116,7640	1,8197	0,3274	22,52	0,101
14	110,8430	370,0074	19,2356	107,4000	112,4996	1,8687	0,3171	24,38	0,109
15	113,7271	449,0763	21,1914	108,6000	115,6845	1,8413	0,4140	16,49	0,076

Se aplica la correlación de Pearson y los resultados obtenidos, que llevan al siguiente análisis:

Los datos tomados de la recta que corresponden a una población menor, presentan resultados de correlación con variables similares.

La opacidad tiene una correlación de .005, lo que significa que al abrir la EGR la opacidad aumenta. El área de restricción está directamente relacionada con la media de la amplitud de temperatura e inversamente con el particulado y la opacidad.

El particulado y opacidad están relacionadas con un nivel de 0.001 positivamente. La opacidad está relacionada con cinco de los parámetros mientras que el particulado está relacionado con tres.

Tabla 7. Resultados de Correlación

	Temp_ Media	Varian za	Des- v i a - c i ó n _std	Media na	Máxi mo	Mini mo	RMS	Cur tosis	Parti- culado	Constan- te opaci- dad
Correlación de Pearson	1	,892**	,938**	,989**	,976**	,808**	,999**	-0,201	-0,009	0,006
Sig. (bilateral)		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,186	0,954	0,969
N	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Correlación de Pearson	,892**	1	,988**	,829**	,954**	,715**	,906**	-0,022	-0,069	-0,055
Sig. (bilateral)	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,888	0,651	0,718
N	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Correlación de Pearson	,938**	,988**	1	,888**	,983**	,734**	,949**	-0,071	-0,085	-0,071
Sig. (bilateral)	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,643	0,578	0,645
N	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Correlación de Pearson	,989**	,829**	,888**	1	,941**	,802**	,985**	-0,265	0,024	0,039
Sig. (bilateral)	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,078	0,876	0,801
N	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Correlación de Pearson	,976**	,954**	,983**	,941**	1	,757**	,982**	-0,049	-0,048	-0,033
Sig. (bilateral)	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,751	0,753	0,831
N	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Correlación de Pearson	,808**	,715**	,734**	,802**	,757**	1	,806**	-,348*	0,098	0,108
Sig. (bilateral)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,019	0,523	0,480
N	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Correlación de Pearson	,999**	,906**	,949**	,985**	,982**	,806**	1	-0,190	-0,014	0,000
Sig. (bilateral)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,212	0,925	0,998
N	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Correlación de Pearson	-0,201	-0,022	-0,071	-0,265	-0,049	-,348*	-0,190	1	0,077	0,079
Sig. (bilateral)	0,186	0,888	0,643	0,078	0,751	0,019	0,212		0,614	0,604
N	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Correlación de Pearson	-0,009	-0,069	-0,085	0,024	-0,048	0,098	-0,014	0,077	1	1,000**
Sig. (bilateral)	0,954	0,651	0,578	0,876	0,753	0,523	0,925	0,614		0,000
N	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Correlación de Pearson	,006	-,055	-,071	,039	-,033	,108	,000	,079	1,000**	1
Sig. (bilateral)	,969	,718	,645	,801	,831	,480	,998	,604	,000	
N	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45

** Representan las correlaciones más significativas

La media de la temperatura medida para la termografía presenta una correlación directa del nivel 0.001 con las RMS.

La media de la temperatura presenta una correlación directa del nivel 0.005 con RPM; mientras que con el área de restricción es directa con un nivel de 0.001.

Los valores máximos de las temperaturas medidas para la termografía presenta una correlación directa del nivel 0.001 con RMS; además los valores mínimos de temperatura presentan una correlación idéntica y la correlación entre ellas es de 99%.

CONCLUSIONES

El análisis de los resultados experimentales de este trabajo de investigación permite llegar a las siguientes conclusiones, relacionadas con los efectos de las fallas, simuladas a través de cambios en la EGR, RPM y restricción en el múltiple, donde se midió el cambio de temperatura:

La contaminación producida por el motor es mayor cuando aumentan las RPM ya que el particulado y la opacidad aumentan de igual manera, ocurre con el flujo másico y la presión del múltiple, de acuerdo con las firmas de temperatura.

La contaminación también aumenta si se abre la EGR, ya que la opacidad aumenta; mientras que disminuye si aumenta el área de restricción en el múltiple

Si se aumenta área de restricción, la temperatura media aumenta y la contaminación disminuye

Las mayores magnitudes K y P se pueden definir de acuerdo con la dispersión de datos establecida por la varianza, ya que, con la menor dispersión de éstos, se establecen mayores cantidades de contaminación y viceversa.

Los parámetros estadísticos obtenidos para el análisis termográfico presentan correlaciones similares, por lo tanto, no es necesario utilizar una gran cantidad de ellos.

Agradecimiento

La presente investigación agradece a la Universidad Politécnica Salesiana con sede Cuenca y a su grupo de investigación GIIT, por permitirnos utilizar sus datos para el desarrollo de la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arkadiusz R., y Malgorzata J. (2014). Diagnostics Systems as a Tool to Reduce and Monitor Gas Emissions from Combustion Engines, In: Golinska, P. (ed.) Environmental Issues in Automotive Industry, 95–128.
- Liu, X., Feng, F. y Si, A. (2012). Condition Based Monitoring, Diagnosis and Maintenance On Operating Equipments of a Hydraulic Generator Unit. IOP Publishing, 24th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. 15(4), 1755-1315.
- Mantilla L., Christian A., Tapia J., Carlos R. (2015). Estudio de los efectos de la apertura de la válvula EGR en la combustión de un motor de encendido por compresión CRDI, mediante el uso de termografía infrarroja. (Tesis de Grado). Universidad Politecnica Salesiana, Quito, Ecuador.
- Monieta, J. (2018). The use of thermography in the diagnosis of ship piston internal combustion engines. In MATEC Web of Conferences, 182, p. 01027. EDP Sciences.
- Rodriguez, B. (2014). Modelling and Observation of Exhaust Gas Concentrations for Diesel Engine Control. (Springer Theses). Universitat Politècnica de València, Spain. Switzerland
- The IMS Center University of Cincinnati. (2014). Development of Smart Prognostics Agents (WATCHDOG AGENT®). National Science Foundation (NSF) Industry y University Cooperative Research Center for Intelligent Maintenance Systems. Recuperado de <http://www.imscenter.net/frontpage/Resources/WD.pdf> National Instruments (2016).
- Vibration Analysis and Signal Processing in LabVIEW. National Instruments. Recuperado de <http://www.ni.com/white-paper/9230/en/>
- Van Tran, T. y Bo-Suk, Y. (2012). An Intelligent Condition-Based Maintenance Platform for Rotating Machinery. Expert Systems with Applications. Elsevier, 39(3). 2977-2988.