Análisis termográfico de un motor de encendido provocado, inducido a fallas mediante la aplicación de diseño de experimentos (DoE)

Rubén Carrion-Jaura*, Jairo Castillo-Calderón, Diego Díaz-Sinche, Bryan Briceño-Martínez

Universidad Nacional de Loja, Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, Ciudad Universitaria Guillermo Falconí, Loja, Ecuador. (correo-e: ruben.carrion@unl.edu.ec; jdcastillo@unl.edu.ec; diego.v.diaz@unl.edu.ec; bryan.briceño@unl.edu.ec).

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia.

Recibido Jun. 18, 2021; Aceptado Ago. 16, 2021; Versión final Oct. 19, 2021, Publicado Feb. 2022

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo realizar un análisis termográfico a un motor de encendido provocado, al inducirle fallas controladas no detectadas por el OBD II (Sistema de Diagnóstico a Bordo de Segunda Generación), mediante diseño de experimentos (DoE). Se aplica un diseño factorial completo de dos niveles y dos factores. La unidad experimental es un vehículo Hyundai Accent que se somete a ocho tratamientos en un banco dinamómetro. Los resultados muestran una variación de temperatura de 18.78 °C y NOx de 291 ppm al intervenir sobre la bujía, 18.98 °C y NOx de 20 ppm al incidir sobre el filtro de aire, y 55 °C y NOx de 25 ppm frente a un efecto combinado. Se concluye que la media cuadrática (RMS) de los datos presentes en una imagen térmica es la característica que mejor permite evaluar el efecto de los factores o fallas sobre el vehículo, al presentar un mejor ajuste y menor desviación estándar.

Palabras clave: diseño; experimentos; emisiones contaminantes; fallas inducidas; motor; termografía

Thermographic analysis by design of experiments (DoE) of a fault-induced spark-ignition engine

Abstract

The main objective of this research study is to perform a thermographic analysis of a spark ignition engine by inducing controlled failures not detected by OBD II (Second Generation On-Board Diagnostic System) and by using a design of experiments (DoE). A full factorial design of two levels and two factors is applied. The experimental unit is a Hyundai Accent vehicle that is subjected to eight treatments in a dynamometric bench. The results show a temperature variation of 18.78 °C and a NOx of 291 ppm when altering the spark plug and 18.98 °C and a NOx of 20 ppm when modifying air filters. The results of combining both failures simultaneously are 55 °C and a NOx of 25 ppm. It is concluded that the quadratic mean (RMS) of a thermographic profile is the feature that best serves to assess vehicle failure factors and consequences since it provides an improved adjustment and a reduced standard deviation.

Keywords: experimental design; pollutant emissions; induced failures; engine; thermography

INTRODUCCIÓN

La termografía infrarroja es una de algunas metodologías de diagnóstico aplicadas actualmente en varios tipos de la industria e investigación (Osornio et al., 2019). La termografía infrarroja es la ciencia que detecta la energía infrarroja emitida desde un objeto, convierte a temperatura aparente y muestra un resultado como una imagen infrarroja. Literalmente, la termografía infrarroja (IRT) significa "más allá del rojo" (infrarrojo) "imagen de temperatura" (termografía). Esta tecnología se puede utilizar para detectar los llamados defectos invisibles de una manera no destructiva. En comparación con las áreas tradicionales en aplicaciones la tecnología infrarroja es utilizada en el campo medicinal (Lahiri et al., 2012), sistemas energéticos, y la construcción. Otras aplicaciones del diagnóstico en la termografía infrarroja se pueden encontrar en el área de vehículos no tripulados, cuyas cámaras termográficas se utilizan para inspeccionar líneas eléctricas (Matikainen et al., 2016), tuberías, edificios, etc. La termografía también ha encontrado recientemente una aplicación en el diseño de aviones furtivos (Baranwal y Mahulikar, 2016) y motores turborreactores (Andoga et al., 2019).

Las fallas intempestivas de los equipos industriales a menudo resultan en pérdida de producción, mayores costos operativos, clientes insatisfechos y pérdida de beneficios (Suguna et al., 2017). Una importante organización industrial de ingeniería y seguros reveló recientemente que más del 30% de sus pérdidas totales fueron resultado de problemas eléctricos y mecánicos. La temperatura es uno de los indicadores más comunes de la salud estructural de los equipos y componentes. Los sistemas eléctricos y mecánicos pueden tener problemas sin previo aviso. Sin embargo, la falla del equipo es frecuentemente precedida por un período considerable de aumento del calor en los diversos componentes del sistema. Si el aumento del calor se detecta a tiempo, el estado se puede corregir antes de que el equipo eléctrico falle (Osornio et al., 2019).

En el campo de las aplicaciones mecánicas, (IRT) ha demostrado ser una herramienta importante, tanto para el diagnóstico de fallas como complemento a otras técnicas de detección de fallas, ideal en la evaluación de daños por fatiga en materiales (Tong et al., 2017). La termografía IR ha demostrado ser una técnica útil en una amplia variedad de aplicaciones. En el sector de la automoción se utilizó para medir la temperatura del disco de freno (Valkovski et al., 2020), para estudiar la evaporación del combustible, llamas y flujo de escape (Chimenti et al., 2004), pero sólo algunas aplicaciones se han preocupado de los procesos que se producen dentro del motor. El conocimiento del proceso de combustión es la principal manera de estudiar la formación de emisiones contaminantes y su contribución a el escape del motor.

Prexisten algunas investigaciones sobre simulación de fallas en componentes del vehículo que tiene como factor común la medición de gases. En (Lee et al., 2002) se estudia el daño que puede sufrir un catalizador de tres vías (TWC) debido a fallos de encendido y concentraciones de mezclas ricas y pobres. En (Zareei y Kakaee, 2013) se varía el tiempo de encendido para evaluar la afectación en las emisiones de escape y el rendimiento de un motor a gasolina. Existen fallas intempestivas que no son detectadas por el sistema de Diagnóstico a Bordo de segunda generación (OBD II), las cuales con el paso del tiempo disminuye las prestaciones del motor e incrementan el nivel de contaminación. Con el propósito de caracterizar los efectos que provocan, se recurre por ejemplo en (Toma et al., 2019) a incitar fallas en el sistema de alimentación sobre el inyector, provocando de esta forma el aumento considerable del nivel de emisiones.

El propósito de este estudio determinar los parámetros más representativos térmicos como de emisiones contaminantes producto de las fallas insipientes no detectadas por el sistema OBDII, por lo cual se intervienen, sobre la luz o separación entre los electrodos de la bujía y la saturación del filtro de aire, es decir, cuando se encuentre obstruido o en el periodo de sustitución, estos dos factores se han seleccionado mediante la ejecución de un análisis jerárquico, por lo que inicialmente se estimaron ocho fallas típicas que suelen aparecer en los vehículos. Se inició con la comparación binaria utilizando una escala numérica para determinar su importancia, además se realiza un análisis de sensibilidad para evitar que los juicios emitidos por el evaluador puedan alterar los resultados, por lo tanto, se realiza el cálculo de la razón de consistencia considerándose aceptable por debajo de 0.1 (Castillo et al., 2021). El diseño factorial propuesto involucra estos dos factores con lo cual se proponen 8 corridas experimentales y se obtiene modelos matemáticos para cada una, graficas de ajustes como de residuos, que al ser evaluadas permiten seleccionar los parámetros sobre los cuales los factores presentan mayor significancia en la respuesta

METODOLOGÍA

En esta sección realiza una descripción de los equipos utilizados, la preparación de la unidad experimental como el procesamiento que se dará a los datos obtenidos una vez realizadas las diferentes corridas experimentales, así como el diseño experimental.

Descripción del motor

La unidad experimental utilizada fue un motor de Otto de 4 tiempos de un cilindraje de 1.4 litros perteneciente a un vehículo Hyundai Accent 2019, el cual es considerado un vehículo liviano según la categoría M de la clasificación vehicular que establece el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). La utilización de este

tipo de vehículo se debe a que posee la mayor frecuencia de matriculación de acuerdo con el registro estadístico de transporte del Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos (INEC).

Descripción de la cámara termográfica

La adquisición de imágenes se realiza a través de una cámara infrarroja IR marca testo 882, que posee un rango espectral de onda larga en micrómetros, 8 μm a 14 μm , ideal para diagnosticar el estado de una maquinaria acorde a la norma ISO 1834-2:2019. Una sensibilidad térmica de 50 mK a 30 °C a través de un detector térmico microbolométrico que permite un contraste térmico significativo acorde a la norma ISO 18251-1:2017. Posee un campo de visión amplia de tipo gran angular de 32° $\times$ 23° con una distancia mínima de enfoque de 0.2 m, una resolución geométrica u objeto más pequeño identificable de 1.7 mrad, lo que permite determinar la temperatura de un objeto con dimensiones mínimas de 5.1 mm de diámetro a un metro de distancia. De igual forma posee una resolución alta de 76800 puntos de medición de temperatura con un detector de 320 x 240 píxeles con una Tecnología Super Resolución que permite obtener una salida de imagen real de 640 x 480 píxeles, una tasa de frecuencia de 33 Hz, que es un valor típico para cámara de escaneado con un único detector, y un rango de temperatura de trabajo que va de los -20 °C a los 550 °C, siendo ideal para trabajar en el sistema de escape que puede alcanzar temperaturas superiores a los 400°C en los motores otto para el correcto funcionamiento del catalizador de oxidación.

El colector de escape en los vehículos a gasolina se encuentra sometido a altas temperaturas por lo que su emisividad será elevada, además son fabricados de fundición de hierro cuya superficie externa se encuentra no pulida, a menudo se considera una emisividad de $\epsilon=0.9$ para objetos opacos (Möllmann y Vollmer, 2013), de igual forma un metal sufre rápidamente oxidación cambiando la emisividad que puede llegar a rondar los $\epsilon=0.95$, esto se debe a que la emisividad aumenta con la rugosidad siempre y cuando la temperatura sea lo suficientemente alta (Valkovski et al., 2020). La mezcla de temperatura, oxidación y rugosidad en el colector de escape permite obtener una $\epsilon=0.98$, valor derivado a través del procedimiento de obtención de emisividad descrito en la norma ISO 18434-1, en la que se utiliza un termómetro de contacto para su estimación. No se determina la temperatura aparente debido a la poca compensación que ofrece sobre los resultados finales por lo que se considera a esta como un valor constante de 20 °C.

Por otro lado, se debe ajustar el rango de la cámara I.R, en el cual se va a trabajar, se considerará un valor entre 200 °C a 550 °C, para evitar que el detector de la cámara se sature. De igual forma el contraste térmico se ajustará en el mismo rango, para evitar que información relevante quede camuflada por su entorno. Se utilizará una paleta de colores de hierro debido a que el contraste térmico es bajo pese a que existe una elevada temperatura en la zona de análisis, además este tipo de paleta proporciona una buena relación entre la sensibilidad térmica y definición espacial. El posicionamiento de la cámara con respecto al objeto será estático y siempre la misma, se lo realizará a una distancia de 0.5 m y como máximo a 30 grados con respecto al eje perpendicular del objeto, evitando un cambio excesivo en el valor de emisividad en caso de excederla sin que supere el 5 % como se demuestra en (Lino et al., 2003).

Preparación del vehículo para la realización de pruebas

Las pruebas experimentales se realizaron mediante la utilización de un banco dinamométrico modelo MAHA LPS 3000 para cada tratamiento y para la estimación de gases contaminantes un analizador BRAIN BEE AGS-688 así como la norma técnica ecuatoriana (NTE) INEN 2204 para su comparación, se analizará únicamente NO_x, CO, HC, O₂. Para las capturas de los termogramas la unidad experimental se revoluciona a 2000 min⁻¹ con una tolerancia de ± 10 min⁻¹, como se expone en un estudio anterior (Castillo et al., 2021). Para estabilizar térmicamente el vehículo, se procede a alcanzar una velocidad de 60 km/h en marcha directa con una carga de 85% y se lo retiene en estas condiciones al menos durante 15 min, luego de esto se procederá a tomar 3 capturas térmicas durante intervalos de 5 segundos. Entre prueba y prueba se dejará reposar el vehículo durante 15 minutos para evitar que las condiciones anteriores de trabajo influyan en el resultado de cada prueba.

Procesamiento de imágenes térmicas

Para el análisis del área del colector se consideran como puntos de interés aquellos que poseen la mayor temperatura como se realizan estudios en (Valkovski et al., 2020) y (Dimitrov y Damyanov, 2019), ya que contribuyen en mayor medida a la temperatura efectiva (Golzke et al., 2016). En este trabajo se basa en la teoría de la propia radiación del cuerpo conocida como la Ley de Planck, esta teoría es muy útil para cuerpos negros idealizados, pero cuando la emisividad de un cuerpo es apropiada se puede aplicar a cuerpos reales (Andoga et al., 2019). A más del criterio de mayor temperatura, la selección de la zona de estudio se realiza considerando la homogeneidad térmica de las zonas transformándola en zonas de referencia, la selección y análisis de la zona se lo realiza a través software TESTO IR como se aprecia en la figura 1. El termograma por sí solo no basta para poder caracterizar un efecto, sino que es necesario el uso de herramientas adicionales que permitan evaluar la información recogida (Madrigal et al., 2018).

Fig. 1: Selección de la zona de estudio a través del software TESTO IR.

La zona seleccionada es la misma para todos los termogramas, procurando que no exista una diferencia de temperatura ni una diferencia de datos en promedio mayor del 10 % siendo alrededor de 200 puntos térmicos que intervienen en cada análisis, esto se puede apreciar en el histograma en la figura 2. Para cada tratamiento se estiman una serie de características térmicas, entre ellas: la media que representa el reparto equitativo de los datos; la varianza que representa la variabilidad de los datos con respecto a la media; desviación estándar mide cuánto se dispersan los datos en torno a la media; media cuadrática (RMS) para determinar la media de datos que toman valores negativos como positivos; curtosis para determinar la forma de la distribución; asimetría para determinar la desviación con respecto a la tendencia central; coeficiente de variación para analizar la desviación con respecto a la media y entre sí; la mediana para poder establecer el valor central, así como la temperatura mínima, temperatura máxima que permitirá establecer el rango del conjunto de temperaturas examinadas en la región de estudio. Por medio del estudio de estas variables se intenta plantear una alternativa al estudio de emisiones, al obtener modelos matemáticos y niveles de correlación de estas respecto a los factores de estudio.

Fig. 2: Histograma de distribución de temperatura en la zona seleccionada

Diseño Experimental

Se utiliza un diseño factorial completo 2k, que permite estudiar las relaciones existentes entre las respuestas y sus factores críticos como interacciones. Una ventaja de usar este modelo es que se puede aleatorizar el orden de las corridas experimentales permitiendo aumentar la probabilidad de que el supuesto de independencia de los errores se cumpla. Además, en el caso que el modelo sea adecuado, permite estimar las condiciones óptimas para una respuesta deseada o para predecir futuras situaciones.

Los factores o variables de estudio se estimaron a partir de un proceso de análisis jerárquico propuesto por el matemático Thomas L. Saaty en la década de los 70 (Martínez y Rodríguez, 2007). Se evaluaron tres niveles; la meta u objetivo, los criterios y alternativas, posteriormente aplicando matrices de comparación pareadas, se comparan uno a uno los elementos de cada nivel estableciendo una estimación binaria para determinar la importancia relativa entre cada uno de ellos usando la escala numérica Saaty (Cheng y Li, 2001), hasta llegar a la meta deseada. Se evaluó la consistencia de los juicios en cada nivel a través del cálculo de la razón de consistencia, siendo aceptable cuando es menor a 0.1 (Castillo et al., 2021). Los resultados obtenidos de la metodología empleada dieron como principales fallos incipientes no detectados por el sistema OBD II, al filtro de aire y electrodo de bujía en orden jerárquico con un nivel de inconsistencia de 0.09, la obtención de las fallas se detalla en NTE (Norma Técnica Ecuatoriana) INEN 2204.

Los factores o variables de estudio se estimaron a partir de un proceso de análisis jerárquico propuesto por el matemático Thomas L. Saaty en la década de los 70 (Martínez y Rodríguez, 2007). Se evaluaron tres niveles; la meta u objetivo, los criterios y alternativas, posteriormente aplicando matrices de comparación pareadas, se comparan uno a uno los elementos de cada nivel estableciendo una estimación binaria para determinar la importancia relativa entre cada uno de ellos usando la escala numérica Saaty (Cheng y Li, 2001), hasta llegar a la meta deseada. Se evaluó la consistencia de los juicios en cada nivel a través del cálculo de la razón de consistencia, siendo aceptable cuando es menor a 0.1 (Castillo et al., 2021). Los resultados obtenidos de la metodología empleada dieron como principales fallos incipientes no detectados por el sistema OBD II, al filtro de aire y electrodo de bujía en orden jerárquico con un nivel de inconsistencia de 0.09, la obtención de las fallas se detalla en NTE (Norma Técnica Ecuatoriana) INEN 2204.

Los valores de los niveles de las variables cuantitativas se estiman, para el caso del filtro de aire su saturación varía entre 0 y 6 gramos, es decir considerando un filtro nuevo y uno que necesita un cambio, ya que el vehículo ha recorrido 18000 km. Un filtro de aire sucio puede disminuir la eficiencia de la combustión y por ende induce un cambio en la temperatura de salida de los gases (Huang et al., 2019). Para la bujía se estimaron valores de separación de los electrodos en torno a 1.0 mm correspondiente a una bujía nueva y uno 1.13 mm, considerando que los electrodos de la bujía ya se encuentran desgastados, la separación de los electrodos afecta la duración de la chispa y el rendimiento del motor (Quader y Dasch, 1992). En la tabla 1, se puede apreciar los factores y niveles mencionados.

Tabla 1: Factores y niveles de las variables del diseño factorial

<i>Factores o variables de estudio</i>	<i>Nivel Bajo (-)</i>	<i>Nivel Alto (+)</i>
[A] Saturación Filtro de aire (g)	0	6
[B] Separación de los Electrodos de bujía (mm)	1	1.13

El diseño factorial completo a utilizar corresponde a uno tipo 2^k aleatorizado y con una réplica, por lo que se analizarán 8 tratamientos o corridas experimentales. Las repeticiones de un determinado tratamiento no deben efectuarse inmediatamente después de haberse realizado este, de ahí la importancia de la aleatorización que además permite repartir homogéneamente las pequeñas diferencias provocadas por los equipos, las repeticiones permiten distinguir que parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y cual a los factores (Pulido y Graw, 2015). En la tabla 2, se pueden observar los diferentes tratamientos a realizar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El fin último de la investigación es caracterizar los efectos que producen las fallas o factores sobre las salidas y las razones subyacentes para establecer posibles correlaciones entre las características térmicas antes indicadas y gases contaminantes. Para ello se estudia los niveles de interacción, significancia y ajuste de los modelos matemáticos obtenidos.

Efecto de los factores

Los resultados de las corridas experimentales se visualizan en la tabla 3, en esta tabla solo se indican algunas de las características térmicas analizadas, sin embargo, se muestran todos los gases contaminantes, así como sus unidades respectivas. A través del programa Minitab 17, el cual es un software estadístico se procede a obtener los modelos matemáticos de las variables de salida. A fin de establecer un orden de significancia se utilizará el diagrama de Pareto, diagramas de residuo como la interacción de sus factores a través de la evaluación de sus gráficas y el valor P, para cada relación.

Tabla 2: Tratamientos del Diseño Factorial

<i>Corridas Experimentales (Aleatorizadas)</i>		<i>Factores o variables de estudio</i>	
<i>Orden de ejecución</i>	<i>Orden de Diseño</i>	<i>Saturación del Filtro de aire (g) [A]</i>	<i>Separación de los electrodos de bujía (mm) [B]</i>
1	8	6	1.13
2	7	0	1.13
3	2	6	1.00
4	4	6	1.13
5	6	6	1.00
6	1	0	1.00
7	3	0	1.13
8	5	0	1.00

Tabla 3: Salidas del diseño experimental

<i>Corridas Experimentales (Aleatorizadas)</i>		<i>Características térmicas</i>			<i>Gases contaminantes</i>			
<i>Orden de ejecución</i>	<i>Orden de Diseño</i>	<i>T. media (°C)</i>	<i>Rms (°C)</i>	<i>Asimetría</i>	<i>CO2 (% vol.)</i>	<i>HC (ppm)</i>	<i>O2 (% Vol.)</i>	<i>NOx (ppm)</i>
1	8	418.66	421.87	0.491	11.5	169	0.39	138
2	7	524.79	525.15	-0.013	12.2	147	0.37	463
3	2	454.85	457.40	0.496	12.6	169	0.21	132
4	4	440.08	442.82	0.641	12.7	115	0.11	101
5	6	476.88	478.23	0.620	11.5	188	0.17	143
6	1	495.86	497.10	0.107	11.9	133	0.00	163
7	3	518.77	519.26	-0.169	12.1	183	0.13	538
8	5	499.99	500.72	0.074	12.0	148	0.11	172

Características térmicas y gases más representativos

Para analizar los factores que más contribuyen a la variabilidad de las respuestas obtenidas se utiliza el gráfico de Pareto que se lo puede obtener mediante un análisis ANOVA y el diagnostico de errores residuales, permitiendo evaluar el efecto de cada término del modelo matemático predictivo. En la figura 3 se muestra el diagrama de Pareto obtenido para la mediana de datos de temperatura, en él se visualizan que los factores más influyentes en la respuesta de salida corresponden al filtro de aire y la interacción entre el filtro de aire con el electrodo de bujía al encontrarse más lejos de la recta (Ahumada et al., 2016).

Se considera estadísticamente significativos aquellos factores y sus interacciones que sobrepasen la línea de significancia que se visualiza de color rojo en la figura 3a, con un valor-t límite = 2.776 que presenta 4 grados de libertad, el valor-t es definido como la magnitud del efecto dividido para el error estándar, este valor es dependiente de valor de significancia o nivel de riesgo aceptable (α), que para nuestro estudio es de 0.05. La grafica de Pareto muestra el valor absoluto de los efectos por lo que, no indica que factor aumenta en mayor o menor medida la respuesta de salida. Para estimar la magnitud de los efectos se usa la gráfica de efectos estandarizados que ilustra la magnitud y dirección que produce sobre la respuesta, en la figura 3b, se observa que el filtro de aire interviene en la respuesta de salida en mayor medida que la interacción entre los factores.

La investigación realizada por (Sabry y Asharf, 2020) en motores Diesel, determina que los filtros de aire cargado de polvo son responsables de un incremento de gases contaminantes emanados al ambiente, como de la temperatura de los gases de escape, encontrando diferencia de temperaturas entre un filtro nuevo estándar y uno cargado de polvo en 17 °C, siendo la menor temperatura cuando se usa el estándar. Por lo que se corrobora que el filtro de aire incide en la respuesta de salida de nuestro estudio. En la tabla 3, al analizarse la media de temperatura entre las corridas 3 y 5 así como en la 6 y 8 correspondientes al uso de un filtro saturado y uno nuevo, se encuentra una diferencia mínima de 18.98 °C, muy próximo al valor obtenido

en el estudio antes mencionado. Si bien el filtro de aire saturado provoca disminución de temperatura en un motor Otto con respecto a uno Diesel, se justifica este efecto principalmente al enriquecimiento de la mezcla que ayuda a la refrigeración de la cámara de combustión.

Los diagramas de residuos permiten examinar la calidad del ajuste del modelo resultante de cada variable, a través del cumplimiento de condiciones de cuadrados mínimos ordinarios, que de cumplirse producirán estimaciones no sesgadas. En la gráfica de probabilidad normal de residuos los datos deben distribuirse alrededor de la línea recta, de esta forma se descartan la existencia de asimetría como de valores atípicos (Salehi et al., 2020) como se aprecia en la figura 4. El histograma verifica si los residuos son asimétricos a través de una comparación con la distribución de la campana de Gauss, en la figura 4 el histograma presenta una distribución normal simétrica alrededor de cero por lo que cumple este supuesto.

Fig. 3: a) Gráfica de Pareto, $\alpha = 0.05$ y b) Efecto normal estandarizado para la mediana de los datos de temperatura

La gráfica de residuos versus ajustes verifica que los residuos están aleatoriamente distribuidos alrededor de cero sin patrones reconocibles y presenten una varianza constante. La gráfica de residuos vs orden muestra si son independientes unos de otro, al no visualizarse ningún patrón o tendencia en el tiempo, si existieran, los residuos estuvieran correlacionados y no mostrarían independencia (García et al., 2018; Zafer, 2016) en su estudio para determinar el motor más adecuado para un sistema mecatrónico, analiza la gráfica de errores de su estudio factorial, siendo los resultados similares a los expuestos en esta investigación, validando su modelo. Las gráficas de efectos principales e interacciones, como el valor-P, son utilizadas para caracterizar el grado de influencia de cada factor y de los efectos cruzados sobre el modelo, al analizar las gráficas lo que se busca es que posean la mayor pendiente pues demuestran un mayor grado de interacción. En la figura 5, se muestra una alta interacción de los factores con la respuesta del modelo ya que poseen una elevada pendiente el filtro de aire y el efecto cruzado del filtro de aire con el electrodo de bujía, no ocurre así para la bujía, pues la pendiente es mínima lo que indica que no existe interacción considerable con el modelo.

Al analizar valor-P de los efectos e interacciones no se debe sobrepasar el nivel de riesgo aceptable ($\alpha=0.05$). Si el Valor-P es $\leq \alpha$, se puede concluir que la asociación entre la variable de repuesta y el termino es estadísticamente significativo, un valor-P superior indicaría que el término está afectando directamente la confianza de la respuesta medida, de ser así, se puede prescindir de estos factores reacondicionando el modelo disminuyendo el error (Salehi et al., 2020). En la tabla 4 se puede observar que para la media del conjunto de datos obtenidos para cada termograma todos los elementos son significantes exceptuando aquel producido por electrodo de bujía.

Finalmente se determina que también el modelo matemático se ajusta a los datos para lo cual se considera; la desviación estándar (S) siendo más beneficiosa mientras más bajo es su valor, el coeficiente de determinación (R-sq) que indica cual es el ajuste del modelo a los datos siendo mejor cuanto más cercano es a 100%, el coeficiente de determinación predictor o R-sq (pred) que indica que también el modelo predice nuevas observaciones y revela si el modelo esta sobre ajustado mientras mayor diferencia exista con el R-sq. No se considera el coeficiente de determinación ajustado o R-sq (adj) ya que no se comparan modelos con diferente número de predictores, sin embargo, hay que tener cuidado con el R-sq ya que tiende a aumentar a mayor número de predictores. En la tabla 5, se muestra el ajuste que posee el modelo matemático de la mediana de los datos, observamos que existe una diferencia considerable, aunque no exagerada entre R-sq y el R-sq (pred), por lo que podemos decir que existe un sobreajuste del modelo por lo que las predicciones no serán del todo correctas. De igual forma se observa que el valor S si bien parece alto no lo es al compararlo con otros modelos del estudio que presentan valores de 423 °C.

Fig. 4: Gráficas de residuos para la Mediana, a) Probabilidad normal, b) Ajustes, c) Histograma, d) Orden

Fig. 5: Gráfica de efectos principales a) y b) e interacciones de factores c) para la mediana de los datos de temperatura

Tabla 4: Valor-P y factores significativos para la mediana de temperatura

Fuente	Grados de libertad	Valor- P	Valor-P≤0.05
Modelo	3	0.006	Significante
Linear	2	0.005	Significante
Saturación de Filtro de aire	1	0.002	Significante
Electrodo de bujía	1	0.580	-
Interacción doble	1	0.032	Significante
Saturación de filtro de aire y electrodo de bujía	1	0.032	Significante

Por medio de la utilización del diagrama de Pareto, curva normal de los efectos estandarizados, gráfico de errores, estudio de interacciones como efectos, valor-p y estudio de nivel de ajuste, se obtiene la tabla 6, en la cual se muestran las características térmicas y de gases sobre la que los factores tienen mayor significancia, los cuales adquieren un valor de estimación adimensional más bajo de entroncarse más alejado de la curva normal o más bajo con respecto del nivel de riesgo, al ser el valor P lo más cercano a cero. Se puede observar a partir de la tabla 6, que la asimetría de los datos térmicos de los termogramas presenta la menor desviación estándar como el mayor ajuste del modelo, sin embargo, únicamente es sensible para el nivel de saturación del filtro de aire, por lo que dentro de las características térmicas se considerara a la temperatura media y media cuadrática en donde los factores estudiados presentan la mayor significancia, pese a poseer una mayor desviación y menor ajuste.

Tabla 5: Ajuste del modelo matemático de la mediana de datos de temperatura

Modelo	S (°C)	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
Full factorial	14.06	94.23%	89.9%	76.91%

Dentro de los gases contaminantes los NOx son los más representativos, los cuales poseen un gran ajuste, sin embargo, la desviación estándar supero casi tres veces la de las características térmicas. García (2018), al analizar las fallas de un motor Diesel que aplica termografía en un múltiple de escape obtiene como resultado no solo temperatura media y media cuadrática como variables representativas, sino que incluye a la temperatura máxima como mínima y en el caso de los gases contaminantes por material particulado y opacidad, sin embargo, las correlaciones que obtuvieron son diferentes a las de este estudio, en especial para los gases contaminantes. Por otro lado, el NOx está estrechamente relacionado con los factores de estudio es así, como Tawfik (2017), en su investigación sobre el impacto de la separación de los electrodos de la bujía sobre la propagación de la llama, determina que existe un incremento considerable de los NOx al poseer una separación entre 1-1.4 mm, siendo para el caso de nuestro estudio de 1.13 mm que si bien no es una apertura considerable incide en su incremento, de igual forma en Zafer (2016) determina que el filtro saturado generaba mayores NOx para diferentes potencias.

Además, Tawfik (2017), obtuvo que, con una separación de electrodos inferiores a 1 mm, existe una pérdida de potencia y disminución de temperatura, sin embargo, estimo que la presión interna del cilindro como la velocidad de la tasa de liberación de calor y la fracción de masa quemada aumentan con el incremento de la separación de los electrodos y por ende el incremento de temperatura a medida que llegaba a los 1.4 mm. Esto se corrobora al analizar la tabla 3 y comparar las corridas 6 y 8 en la cual la separación entre los electrodos es de 1 mm contra la corrida 2 y 7 pertenecientes a una separación de 1.13 mm, en donde se estima un incremento de temperatura entorno a los 18.78 °C, cuyo efecto es aceptable debido al leve incremento entre la separación de los electrodos.

Tabla 6: Características térmicas y de gases con mayor dependencia

	Factores		Interacciones		Ajuste			
	F		F*B		S (°C)	R-sq %	R-sq (adj)%	R-sq (pred)%
	Pareto	Efecto	Efecto	Valor P				
Temperatura media	1	1	2	2	11.1	95.0	91.4	80.3
Media cuadrática o rms	1	1	2	2	10.7	95.2	91.5	80.8
Asimetría	1	1	-	-	0.08	95.5	92.1	81.9
NOx	1	1	2	2	29.9	98.1	96.8	92.7

A través del coeficiente de Pearson se estimó posibles relaciones y asociaciones entre las variables de salida dentro de las cuales las características térmicas presentaban coeficientes superiores a 0.85, esto es de esperarse ya que provienen del mismo conjunto de datos, pese a ello no se obtuvo un coeficiente muy bajo al relacionarlos con los NOx en donde se obtuvo un valor mínimo de 0.75, siendo aceptable ya que para la generación de NOx debe existir una alta temperatura. Los modelos matemáticos obtenidos que permiten caracterizar las fallas en función de una respuesta de salida son pertenecientes a la temperatura media en la ecuación 1, media cuadrática en la ecuación 2 y NOx en la ecuación 3.

$$T_MEDIA = 314.5 + 72.0 \cdot A + 183.5 \cdot B - 77.4 \cdot A \cdot B \quad (1)$$

$$RMS = 319.7 + 70.2 A + 179.2 B - 75.3 A \cdot B \quad (2)$$

$$NOx = -2394 + 445 \cdot A + 2562 \cdot B - 450.0 \cdot A \cdot B \quad (3)$$

Al estudiar el modelo matemático de los NOx a través de la figura 6, se obtiene que con un filtro de aire bueno y con una mayor separación de los electrodos de bujía la cantidad de NOx se incrementa, por otro lado, un filtro de aire parcialmente tapado y una bujía en buen estado producen la menor cantidad de NOx, por lo que a través del estudio de este gas de escape se podría predecir las fallas presentes en el vehículo.

Fig. 6: Superficie de respuesta de los NOx

Al compararlo con los resultados presentes en Tawfik (2017), como en Sabry (2020), observamos diferencias en cuanto a los argumentos planteados con los resultados obtenidos, esto se debe a que en estos estudios se han evaluado los efectos individuales de la bujía como del filtro de aire, por otro lado, el efecto combinado provoca una diferencia mínima de temperatura de 55 °C y una disminución de 25 ppm de NOx, producto de una combustión deficiente. Si se analiza la gráfica normal de efectos estandarizados como se ve en la figura 7, se puede observar que tanto los efectos de los factores como el de las interacciones son significativas, en algunos casos opuestos y en un rango muy cercado entre sí, de ahí que se obtenga la respuesta de la figura 6.

Fig. 7: Gráfica normal de efectos estandarizados para NOx, $\alpha = 0.05$

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones: 1) La media cuadrática o RMS de los datos presentes en una imagen térmica es la característica que mejor permite evaluar el efecto de los factores o fallas sobre el vehículo, al presentar un mejor ajuste y menor desviación estándar. De igual forma la correlación de Pearson es alta con respecto al resto de variables por lo que bastaría con enfocarse en su estudio e inferir en el resto de las características térmicas. 2) Al analizar los gases de escape no se obtuvo parámetros representativos a exceptuar por el NOx, es posible que esto se deba a que su generación no se encuentre directamente relacionada con la temperatura sino más bien por el tipo de mezcla aire combustible presente en la cámara de combustión que es un factor sobre el cual no se intervino. 3) Gran parte de los parámetros térmicos estudiados presentan una alta correlación, por lo que sería suficiente intervenir sobre los más representativos para obtener un elevado grado de incidencia sobre las otras variables, lo que simplificaría el estudio.

REFERENCIAS

- Ahumada, L., Verdeza, A., Bula, A.J., y Lombana, J., Optimización de las condiciones de operación de la Micro-gasificación de biomasa para producción de gas de síntesis, <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642016000300017>, Información Tecnológica, 27(3), 179-188 (2016)
- Andoga, R., Főző, L., y otros cinco autores, Intelligent thermal imaging-based diagnostics of turbojet engines, <https://doi.org/10.3390/app9112253>, Applied Sciences Switzerland, 9(11), 22-53 (2019)
- Baranwal, N., y Mahulikar, S., Infrared signature of aircraft engine with choked converging nozzle, <https://doi.org/10.2514/1.T4641>, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 30(4), 854–862 (2016)
- Castillo, J.D., Díaz, D.V., Carrión, R.D., y Rivera, D.N., Influence of failures not detected by the on-board diagnostic system on the performance and pollutant emissions of a spark ignition engine, https://doi.org/10.1007/978-3-030-68080-0_29, Artificial Intelligence, Computer and Software Engineering Advances. Proc. 15th Multidisciplinary International Congress on Science and Technology, 1326, 389–403 (2021)
- Chimenti, M., Di Natali, C., y otros cuatro autores, An IR image processing approach for characterising combustion instability, <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2004.03.007>, Infrared Physics and Technology, 46(1-2), 41–47 (2004)
- Cheng, E., y Li, H., Information priority-setting for better resource allocation using analytic hierarchy process, <https://doi.org/10.1108/09685220110388827>, Information Management and Computer Security, 9 (2), 61–70 (2001)
- Dimitrov, K., y Damyanov, I., Thermographic analysis of tires during chassis dynamometer test, <https://doi.org/10.1109/TELECOM48729.2019.8994901>, Proc. 27th National Conference with International Participation: The Ways to Connect the Future, TELECOM 2019 - Proceedings, 27–30 (2019)
- García, C., Molina, J., y otros tres autores, Análisis de la contaminación por fallas en un motor diesel utilizando termografía, <https://doi.org/10.26621/xv19.2018.12.a05.pucesi.2550.6684>, Axioma, 2(19), 48–57 (2018)
- Golzke, H., Leick, P., y Dreizler, A., Differential infrared thermography of gasoline direct injection sprays, <https://doi.org/10.1080/17686733.2015.1084725>, Quantitative InfraRed Thermography Journal, 13, 50–69 (2015)
- Huang, Y., Yin, E., y otros siete autores, Impact of potential engine malfunctions on fuel consumption and gaseous emissions of a euro vi diesel truck, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.076>, Energy Conversion and Management, 184(1), 521–529 (2019)
- Lahiri, B., Bagavathiappan, S., Jayakumar, T., y Philip, J., Medical applications of infrared thermography: a review, <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2012.03.007>, Infrared Physics and Technology, 55(4), 221–235 (2012)
- Lee, S., Bae, C., Lee, Y., y Han, T., Effects of engine operating conditions on catalytic converter temperature in an si engine, <https://doi.org/10.4271/2002-01-1677>, SAE Technical Papers, 1677, (2002)
- Lino, A., Tsukamoto, K., y Kusakabe, M., Estimation of radiant temperature and emissivity of automobile's surface using infrared thermography, Proc. SICE Annual Conference, 1, 441–446 (2003)
- Madrigal, J.A., Cabello, J.J., Sagastume, A., y Balbis, M., Evaluación de la climatización en locales comerciales, integrando técnicas de termografía, simulación y modelado por elementos finitos, <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000400179>, Información Tecnológica, 29(4), 179-188 (2018)
- Matikainen, L., Lehtomäki, M., y otros 6 autores, Remote sensing methods for power line corridor surveys, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.04.011>, Photogrammetry and Remote Sensing, 119, 10–31 (2016)
- Möhlmann, K., y Vollmer, M., Fourier transform infrared spectroscopy in physics laboratory courses, <https://doi.org/10.1088/0143-0807/34/6/S123>, European Journal of Physics, 34(6), 123-137 (2013)
- Martínez, E., Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una pyme, Anuario Jurídico y Económico Escurialense, 40, 523–542 (2007)
- Osornio, R., Antonino, J., y Romero, R., Recent industrial applications of infrared thermography: a review, <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2884738>, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15(2), 615-625 (2019)

- Quader, A., y Dasch, C., Park plug fouling: a quick engine test, SAE Transactions, 101, 39-49 (1992)
- Sabry, A., y Ashraf, E., Parametric study on vehicle fuel economy and optimization criteria of the pleated air filter designs to improve the performance of an i.c diesel engine: experimental and cfd approaches, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116680>, Separation and Purification Technology, 241, (2020)
- Salehi, M., Noordermeer, J., Reuvekamp, L., y Blume, A., Parameter optimization for a laboratory friction tester to predict tire abs braking distance using design of experiments, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108879>, Materials and Design, 194, (2020)
- Suguna, M., Mansoor, S., y Sanofer, I., Fault localisation of electrical equipments using thermal imaging technique, <https://doi.org/10.1109/ICETT.2016.7873778>, Proc. IEEE International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT), 1-3 (2016)
- Tong, X., Chen, X., y otros 3 autores, Excitation of thermal dissipation of solid propellants during the fatigue process, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.088>, Materials and Design, 128, 47-55 (2017)
- Toma, M., Micu, D., y Andreescu, C., Influences of engine faults on pollutant emission, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.249>, Procedia Manufacturing, 32, 529-536 (2019)
- Tawfik, B., XiuChao, B., y Hongming, X., Impact of spark plug gap on flame kernel propagation and engine performance, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.059>, Applied Energy, 191, 311-327 (2017)
- Valkovski, T., Damyanov, I., y Dimitrov, K., Thermographic analysis of disk brake system during chassis dynamometer test, <https://doi.org/10.1109/HiTech51434.2020.9363983>, Proc. 3rd International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech), 1-4 (2020)
- Zareei, J., y Kakaee, A., Study and the effects of ignition timing on gasoline engine performance and emissions, <https://doi.org/10.1007/s12544-013-0099-8>, European Transport Research Review, 5(2), 109-116 (2013)
- Zafer, I., Murat, Ş., y Zafer, K., Motor selection in mechatronic systems using 2k doe method, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.482>, IFAC-PapersOnLine, 49(9), 25-28 (2016)