



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**ANÁLISIS DEL IMPACTO TERMOGRÁFICO Y DE EMISIONES EN UN MOTOR A
GASOLINA PROVOCADO POR MEZCLAS DE COMBUSTIBLES**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: NICOLÁS ALEJANDRO LOJA SÁNCHEZ

ADRIÁN MATEO ZHUNIO GARCÍA

TUTOR: ING. CHRISTIAN OMAR PULLA MOROCHO, MSc.

Cuenca - Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Nicolás Alejandro Loja Sánchez con documento de identificación N° 0106410947 y Adrián Mateo Zhunio García con documento de identificación N° 0150896835; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

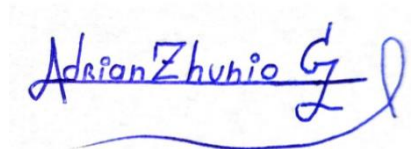
Cuenca, 3 de julio del 2024

Atentamente,



Nicolás Alejandro Loja Sánchez

0106410947



Adrián Mateo Zhunio García

0150896835

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Nicolás Alejandro Loja Sánchez con documento de identificación N° 0106410947 y Adrián Mateo Zhunio García con documento de identificación N° 0150896835, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo académico: “Análisis del impacto termográfico y de emisiones en un motor a gasolina provocado por mezclas de combustibles”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

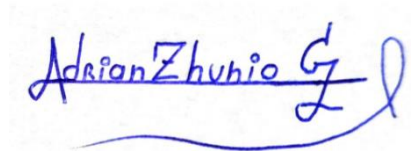
Cuenca, 3 de julio del 2024

Atentamente,



Nicolás Alejandro Loja Sánchez

0106410947



Adrián Mateo Zhunio García

0150896835

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Christian Omar Pulla Morocho con documento de identificación N° 0103570602, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DEL IMPACTO TERMOGRÁFICO Y DE EMISIONES EN UN MOTOR A GASOLINA PROVOCADO POR MEZCLAS DE COMBUSTIBLES, realizado por Nicolas Alejandro Loja Sánchez con documento de identificación N° 0106410947 y por Adrián Mateo Zhunio García con documento de identificación N° 0150896835, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 3 de julio del 2024

Atentamente,



Ing. Christian Omar Pulla Morocho, MSc.

0103570602

ANÁLISIS DEL IMPACTO TERMOGRÁFICO Y DE EMISIONES EN UN MOTOR A GASOLINA PROVOCADO POR MEZCLAS DE COMBUSTIBLES

ANALYSIS OF THE THERMOGRAPHIC AND EMISSIONS IMPACT ON A GASOLINE ENGINE CAUSED BY FUEL BLENDS

Nicolás Alejandro Loja Sánchez ¹, Adrián Mateo Zhunio García ², Christian Omar Pulla Morocho³

Resumen

Este estudio indaga los diferentes porcentajes de mezclas de combustibles de un MCI, con el fin de encontrar la mezcla idónea para minimizar los gases contaminantes, y también, demostrar la temperatura de funcionamiento del catalizador sometido a diferentes cargas y mezclas. Los objetivos implican, evaluar la mezcla de combustibles Ecopaís, Súper y Etanol, al contemplar diversos porcentajes de combustibles y análisis de emisiones contaminantes como hidrocarburos no combustionados (HC) y dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), y a su vez, con la temperatura de trabajo del catalizador. Se usó como metodología el diseño de experimentos (DOE) con 25 pruebas experimentales. Se utilizó equipos automotrices como: analizador de gases, banco dinamométrico Armfield, cámara termográfica. En cuanto al catalizador se obtuvo las muestras de temperatura en 3 puntos clave. Las condiciones apropiadas para la minimización de gases contaminantes son con una mezcla E50 conformada por 50% Ecopaís (750 ml) y 50% Etanol (750 ml), esta mezcla fue probada con diferentes cargas desde un 20% hasta un 80% cumpliendo con la normativa. El catalizador tuvo temperaturas desde los 201,2°C hasta los 311°C, demostrando que trabaja dentro de las temperaturas óptimas.

Palabras clave: mezcla de combustibles, etanol, banco dinamométrico Armfield, analizador de gases, cámara termográfica.

Abstract

This study investigates the different percentages of fuel mixtures of an ICM, in order to find the ideal mixture to minimize pollutant gases, and also, to demonstrate the operating temperature of the catalyst subjected to different loads and mixtures. The objectives involve evaluating the mixture of Ecopaís, Super and Ethanol fuels, considering different percentages of fuels and analysis of pollutant emissions such as unburned hydrocarbons (HC) and carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), and at the same time, with the catalyst working temperature. The design of experiments (DOE) methodology was used with 25 experimental tests. Automotive equipment was used, such as: gas analyzer, Armfield dynamometric bench, thermographic camera. As for the catalyst, temperature samples were obtained at 3 key points. The appropriate conditions for the minimization of polluting gases are with an E50 mixture made up of 50% Ecopaís (750 ml) and 50% Ethanol (750 ml), this mixture was tested with different loads from 20% to 80%, complying with the regulations. The catalyst had temperatures from 201.2°C to 311°C, demonstrating that it works within the optimum temperatures.

Key words: fuel mixture, ethanol, Armfield dynamometer, gas analyzer, thermographic camera.

¹ Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador. Autor para correspondencia: nlojas@est.ups.edu.ec

² Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador. Autor para correspondencia: azhuniog@est.ups.edu.ec

³ Grupo de Investigación de Ingeniería del Transporte (GIIT), Carrera de Ingeniería Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador. Autor para correspondencia: cpulla@ups.edu.ec

En la actualidad de los vehículos, un factor que se encuentra en constante análisis son las emisiones de gases de escape, esto con el fin de obtener motores más eficientes y con bajos niveles de contaminación. [1]. Al momento de ejecutarse los ciclos de combustión ideal, se logra obtener agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2). Pero en la realidad los ciclos de combustión no llegan a ser ideales, lo cual provoca la creación de óxidos de nitrógeno (NO y NO_2), monóxido de carbono (CO), entre otros [2]. La Organización Mundial de la Salud (OMS), establece directrices internacionales que buscan minimizar los riesgos de la contaminación atmosférica [3]. Siguiendo este ejemplo, se plantea directrices similares para disminuir los gases contaminantes de los MCI, tales como la normativa EURO. Teniendo como referencia la edición 4 que por la zona geográfica es la que mejor se adapta al lugar donde se ha realizado esta investigación [4].

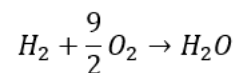
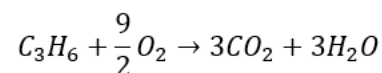
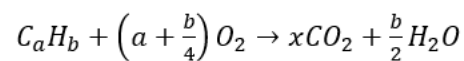
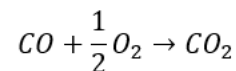
Esta norma establece que los vehículos que cuenten con inyección electrónica deberán cumplir con los siguientes valores de emisiones para, NO_x de 0.08 gr/km, CO de 1.0 gr/km y HC de 0.10 gr/km [5].

En cuanto al ámbito local, se hace referencia a la norma NTE INEN 2204, para fuentes móviles de más de tres ruedas, que especifica los valores máximos en pruebas estáticas, como son: CO 1% y HC de 200 ppm [6]. Para ello, se toma como una opción viable la mezcla de combustibles de etanol con combustibles locales. La mezcla de combustibles sirve para mejorar sus propiedades y rendimiento. Mezclas más comunes de gasolina y etanol son el E10 (10% de etanol y 90% de gasolina) y el E85 (85% de etanol y 15% de gasolina) [7]. Entre los métodos para reducir los niveles de emisiones contaminantes aparece el uso de convertidores catalíticos, ubicados a la salida de los gases combustionados del motor en base a reacciones químicas y por influencia tales como: temperatura, presión y la interacción de materiales que actúan con los gases de escape [8].

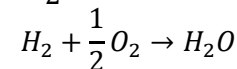
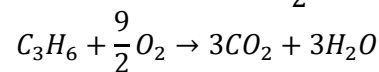
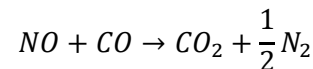
El convertidor catalítico es una solución de

metales preciosos usando diferentes aleaciones (Al_2O_3), además de otros elementos como el platino (Pt) y paladio (Pd) que integran el convertidor catalítico de dos vías o también conocido como catalizador de oxidación, estos mismos elementos juntamente con el rodio (Rh) son implementados para el catalizador de tres vías o de reducción y oxidación. [9].

A continuación, se muestra el proceso químico de reducción en un convertidor catalítico.



Ahora, las reacciones producidas por un convertidor catalítico en oxidación.



La dosificación de la mezcla aire-gasolina al motor debe ser de un kilogramo de gasolina por 14,7 kilogramos de aire para que los catalizadores funcionen mejor [10]. La sonda lambda es un dispositivo de monitoreo que registra la composición de la mezcla [11].

Este dispositivo, analiza y deja que la ECU realice ajustes al momento en la mezcla de combustión. Utiliza el porcentaje de oxígeno existente en los gases combustionados que salen por el tubo de escape, para informar a la unidad de gestión de inyección del motor sobre la cantidad de combustible; esta característica se conoce como factor lambda y depende del funcionamiento del catalizador [11]. Es por esto, por lo que los fabricantes tomaron la opción de hacer catalizadores con algún material que reduzca los niveles de oxígeno, como el cerio (Ce) y el circonio (Zr) que almacenan oxígeno y lo liberan

cuando disminuye la presencia de este gas en los gases provenientes de la combustión [12]. Se muestra la ilustración 1, que ejemplifica el funcionamiento del catalizador.

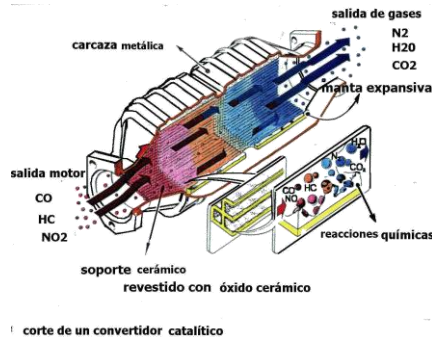


Ilustración 1. Gráfica sobre funcionamiento del catalizador

2. Materiales y Métodos

2.1. Metodología

El presente artículo, usa la metodología planteada en [13], usando como directriz el flujograma de la Ilustración . El flujograma se estructura con tres partes que son: preproceso, proceso y postproceso.

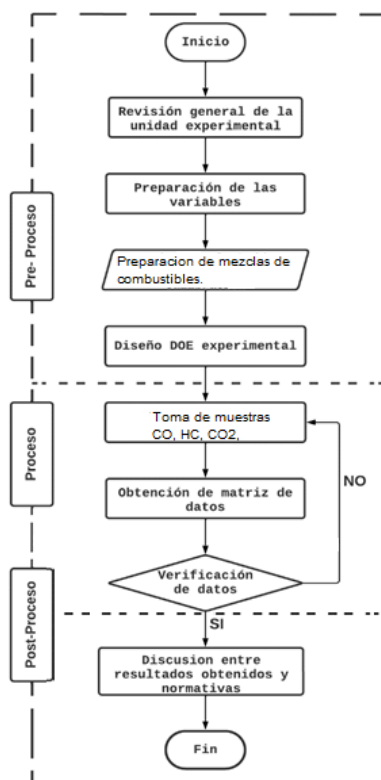


Ilustración 2. Flujograma de la metodología aplicada.

Al iniciar la fase preproceso, se realiza una revisión general del banco dinamométrico, como la correcta coordinación del motor y mantenimiento general de elementos consumibles como: Elementos filtrantes para el combustible y el aire, niveles de aceite y refrigerante. Luego se preparan los factores y niveles que influirán en las emisiones del motor, que son las mezclas de combustibles con etanol.

En el punto final del preproceso se realiza el diseño experimentos DOE, este está estructurado con 5 factores cada uno con 5 niveles. Además, se genera una base de datos en la que están presentadas todas las combinaciones de niveles de factores. El DOE está propuesto con 5 ejecuciones. Este diseño experimental contiene 25 ejecuciones para garantizar la veracidad de datos. Conforme al proyecto se identifican las diferentes mezclas de variables de entrada y su afectación en los gases analizados que son: CO₂, CO y HC.

En la parte del proceso, se determina la base de datos que se realizará junto con la recolección de datos. En esta fase se trabaja con experimentos y pruebas planificadas durante la fase DOE. En cuanto a la toma de datos, se realiza con herramientas automotrices detallados en la sección 2.2. Todos los datos tomados al final se usan en la matriz de datos finales, esta se verifica para garantizar la eficiencia del análisis.

En la parte del postproceso, se realiza el análisis de los resultados obtenidos en la medición de gases considerando la normativa NTE INEN 2204 para el nivel de contaminación y para las temperaturas de trabajo del catalizador se toma como referencia la teoría [14]. Una vez concluida la metodología, a continuación, se muestra los materiales usados en el estudio.

2.2. Materiales

La Ilustración , detalla los equipos y materiales empleados en el estudio.

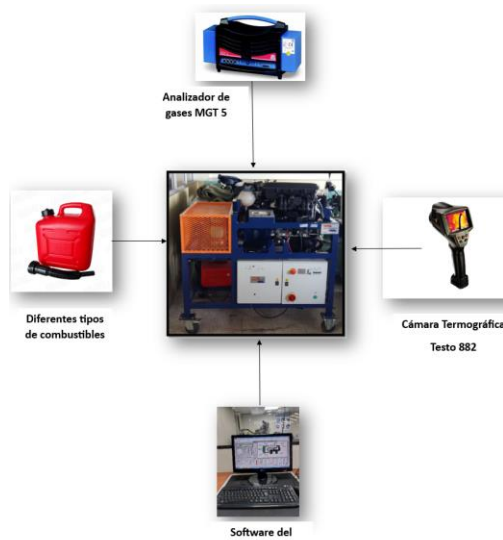


Ilustración 3. Equipos utilizados para la toma de muestras en el banco dinámico Armfield.

Por otro lado, se muestra las especificaciones técnicas de los equipos, en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los equipos automotrices.

Nombre del Equipo	Especificaciones técnicas
Analizador de gases MGT 5	- Medición de (CO, HC, CO₂, O₂, λ, NOX opcional) - Respuesta en menos de 10 Segundos - Bomba trabajo pesado y larga duración con bajo consumo energía - Regulación de la temperatura automática (2-8 min) - Tiempo calentamiento aproximado 2~8 min. - Alimentación 220V o 110V CA ±10% 50 o 60 Hz
Banco dinámico Armfield	- Este banco cuenta con un freno electromagnético acoplado a la salida del eje del motor y a su vez una celda de torque que nos ayuda a medir dicha magnitud enviando los datos al software de comunicación. Resolución de imagen: resolución de 320 x 240 píxeles, ampliable con la tecnología SuperResolution a 640 x 480 píxeles
Cámara termográfica Testo 882	Medición precisa: sensibilidad térmica < 50 mK, objetivo de 32°, detección de puntos calientes y fríos Cámara digital integrada con iluminación por LED: toma de imagen real para cada imagen térmica
Gasolina Ecopaís	85 octanos [15]
Gasolina Super	95 octanos [15]

Etanol

- Es un líquido incoloro, volátil, con un olor característico y sabor picante. También se conoce como alcohol etílico. Sus vapores son más pesados que el aire. Se obtiene, principalmente, al tratar etileno con ácido sulfúrico concentrado y posterior hidrólisis.

3. Resultados y Discusión.

Se muestra en la Tabla 2 y Tabla 3, los valores de las variables de entrada y salida, los cuales se obtuvieron mediante la metodología del DOE. Se realizó un total de 25 pruebas. Durante estas ejecuciones, se realizaron las variaciones de mezclas. Estas combinaciones permitieron la obtención de los parámetros de salida necesarios para el estudio, que son: CO, HC y CO₂. En las tablas 4 y 5 se muestra los datos sobre las temperaturas de trabajo del catalizado tanto en las pruebas de combustible Ecopaís y Súper, se escogió tres puntos específicos, los cuales son la entrada del catalizador, el cuerpo de este y la salida, todo esto con la intención de obtener las temperaturas de trabajo del catalizador.

Tabla 2. Base de datos de las variables de entrada y salida obtenidas del DOE con combustible Ecopaís.

MEZCLA E0	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	CO [%]	HC [ppm]	CO ₂ [ppm]
- Mezcla 100% eco país	1	850	0	0,51	266	13,2
	2	625	20	4,17	715	11,5
	3	1250	40	0,54	379	13,6
	4	1875	60	0,39	157	14,4
	5	2500	80	0,29	136	14,1
MEZCLA E25	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	CO [%]	HC [ppm]	CO ₂ [ppm]
- Mezcla 25% etanol y 75% eco país	1	850	0	0,61	404	13,2
	2	625	20	2,52	690	12,3
	3	1250	40	0,52	359	13,7
	4	1875	60	0,26	147	14,6
	5	2500	80	0,19	91	14,8
MEZCLA E50	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	CO [%]	HC [ppm]	CO ₂ [ppm]
- Mezcla 50% etanol y 50% eco país	1	850	0	0,17	93	13,8
	2	625	20	0,47	202	13,6
	3	1250	40	0,53	280	13,5
	4	1875	60	0,27	165	14,6
	5	2500	80	0,22	119	14,8
MEZCLA E75	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	CO [%]	HC [ppm]	CO ₂ [ppm]
- Mezcla 75% etanol y 25% eco país	1	850	0	0,43	277	13,4
	2	625	20	0,67	420	13,1
	3	1250	40	0,58	301	13,5
	4	1875	60	0,18	148	14,7
	5	2500	80	-	-	-
MEZCLA E100	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	CO [%]	HC [ppm]	CO ₂ [ppm]
- Mezcla 100% etanol y 0% eco país	1	850	0	0,04	83	14,1
	2	625	20	0	71	14,1
	3	1250	40	0,01	82	13,2
	4	1875	60	-	-	-
	5	2500	80	-	-	-
MEZCLA E75	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	CO [%]	HC [ppm]	CO ₂ [ppm]
- Mezcla 75% etanol y 25% Súper	1	850	0	0,37	225	13,1
	2	625	20	0,48	337	13,7
	3	1250	40	0,6	299	13,5
	4	1875	60	0,04	169	14
	5	2500	80	0,04	138	12,3
MEZCLA E100	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	CO [%]	HC [ppm]	CO ₂ [ppm]
- Mezcla 100% etanol y 0% Súper	1	850	0	0,04	83	14,1
	2	625	20	0	71	14,1
	3	1250	40	0,01	82	13,2
	4	1875	60	-	-	-
	5	2500	80	-	-	-

Tabla 4. Base de datos de las variables de entradas y salidas obtenidas del DOE Temperatura combustible Ecopais.

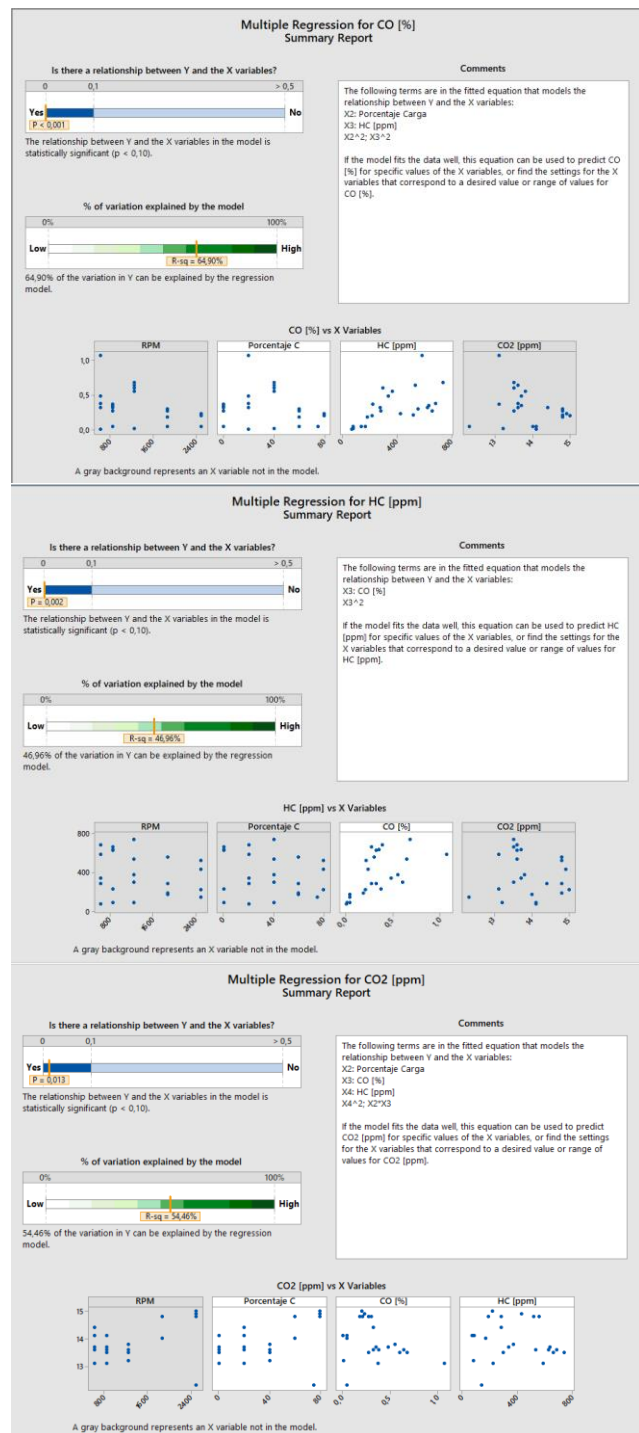
MEZCLA E0	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	Temperatura Entrada °C	Temperatura Medio °C	Temperatura Salida °C
- Mezcla 100% Ecopais	1	850	0	240,1	136,4	154,1
	2	625	20	259,7	141,5	162
	3	1250	40	275,9	147,1	172,4
	4	1875	60	304,7	142,1	194,5
	5	2500	80	350	170	271,9
MEZCLA E25	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	Temperatura Entrada °C	Temperatura Medio °C	Temperatura Salida °C
- Mezcla 25% etanol y 75% Ecopais	1	850	0	302,1	168,7	201
	2	625	20	355,1	176,2	224,6
	3	1250	40	360	198,8	262,3
	4	1875	60	360	242,6	343
	5	2500	80	360	360	360
MEZCLA E50	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	Temperatura Entrada °C	Temperatura Medio °C	Temperatura Salida °C
- Mezcla 50% etanol y 50% Ecopais	1	850	0	201,2	152,3	151,2
	2	625	20	220,2	224,8	360
	3	1250	40	209,8	123,5	150,8
	4	1875	60	291,5	144,9	184,2
	5	2500	80	360	218,9	311
MEZCLA E75	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	Temperatura Entrada °C	Temperatura Medio °C	Temperatura Salida °C
- Mezcla 75% etanol y 25% Ecopais	1	850	0	174,9	109,6	129
	2	625	20	188,6	116,9	136,5
	3	1250	40	211,1	126	168,7
	4	1875	60	317,9	159,9	223,5
	5	2500	80	262,7	174,3	260
MEZCLA E100	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	Temperatura Entrada °C	Temperatura Medio °C	Temperatura Salida °C
- Mezcla 100% etanol y 0% Ecopais	1	850	0	240	204,7	292,6
	2	625	20	253,9	217	310,8
	3	1250	40	279,4	227,5	334,7
	4	1875	60	-	-	-
	5	2500	80	-	-	-

Tabla 5. Base de datos de las variables de entradas y salidas obtenidas del DOE Temperatura combustible Súper.

MEZCLA E0	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	Temperatura Entrada °C	Temperatura Medio °C	Temperatura Salida °C
- Mezcla 100% Súper	1	850	0	198,5	105,7	123,4
	2	625	20	204,1	125,7	133,8
	3	1250	40	301,8	214	213,9
	4	1875	60	360	205	336,3
	5	2500	80	360	207	252,5
MEZCLA E25	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	Temperatura Entrada °C	Temperatura Medio °C	Temperatura Salida °C
- Mezcla 25% etanol y 75% Súper	1	850	0	214,1	142,8	147,2
	2	625	20	236,9	167,4	166,4
	3	1250	40	243,2	146,5	172,2
	4	1875	60	320,2	186,1	237,1
	5	2500	80	360	243,2	360
MEZCLA E50	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	Temperatura Entrada °C	Temperatura Medio °C	Temperatura Salida °C
- Mezcla 50% etanol y 50% Súper	1	850	0	241,5	157,4	178,9
	2	625	20	261,2	181,5	193,5
	3	1250	40	267,4	194,9	195,1
	4	1875	60	332,2	186,7	254,5
	5	2500	80	360	239,4	338,9
MEZCLA E75	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	Temperatura Entrada °C	Temperatura Medio °C	Temperatura Salida °C
- Mezcla 75% etanol y 25% Súper	1	850	0	209,8	143,2	154,9
	2	625	20	239	162,8	175,6
	3	1250	40	256,6	162,9	183,8
	4	1875	60	313,2	159,8	238,6
	5	2500	80	360	216,9	308
MEZCLA E100	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	Temperatura Entrada °C	Temperatura Medio °C	Temperatura Salida °C
- Mezcla 100% etanol y 0% Súper	1	850	0	265,1	154,8	169,3
	2	625	20	289,6	178,9	190,4
	3	1250	40	285,9	177,1	206,1
	4	1875	60	-	-	-
	5	2500	80	-	-	-

La Ilustración 4, muestra los valores R^2 del CO, CO₂ y HC del combustible Súper con las mezclas de etanol obteniendo valores de R^2 de 64,90%, 46,96%, 54,46%, lastimosamente estos valores no cumplen para realizar el análisis en Minitab, por lo que fue necesario cesar los análisis con combustible Súper y continuar con el combustible Ecopais que si cumple con el R^2 .

El R^2 es una medida estadística que señala, que tan cerca están los datos de la línea de regresión.

**Ilustración 4.** Validación de datos CO, HC Y CO₂ del combustible Súper

3.1. Estudio del monóxido de carbono (CO) - Ecopais

Se aplicó el software estadístico que en este caso es Minitab para el análisis de partículas de CO. Se muestra en la ilustración 5 A, en donde se observa

los residuos (puntos de color azul) distribuidos y sobrepuestos a lo largo de la línea roja de regresión. Esto demuestra que hay un ajuste adecuado a la distribución normal.

En las ilustraciones 5 B y 5 D de valores ajustados vs residuos, los residuos están dispersos aleatoriamente alrededor de cero con valores positivos y negativos. Esto indica que hay una correcta aleatoriedad de datos, la ilustración 5 C se observa un pico individual en la media, lo que asegura la veracidad de los datos.

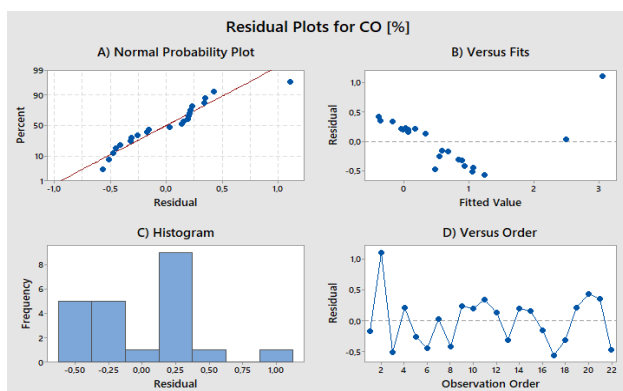


Ilustración 5. Gráficos residuales para el monóxido de carbono (CO).

Con la intención de descubrir las variables más relevantes del el CO, se procede a realizar un estudio mediante el uso de diagrama de Pareto. En la ilustración 6 se observan los valores absolutos de los efectos estandarizados. Se puede apreciar que la línea roja tiene un valor de 2,145 junto con un valor estadístico de confianza de 99,12% ($\alpha = 0,05$). Todos los factores que pasen por esta línea se consideran determinantes para el CO.

Se puede notar que el factor B, que significa el gas HC supera este límite, lo que indica que es el gas más influyente en relación con el CO. Otro factor influyente es el C que representa el gas CO₂, y, por último, en la interacción de AC, que significa el porcentaje de carga, y el gas CO₂.

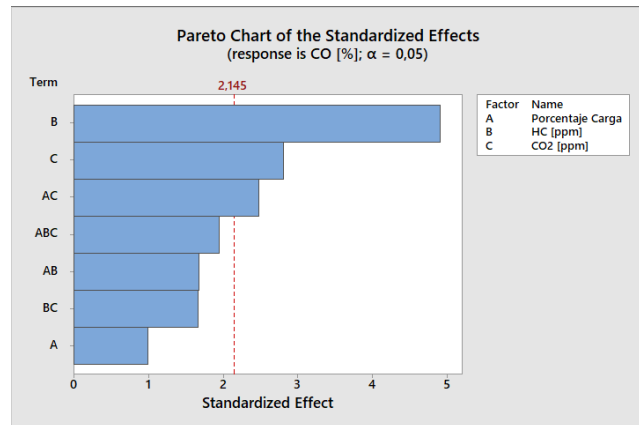


Ilustración 6. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado del Monóxido de carbono (CO).

3.2. Estudio de Hidrocarburos no combustionados (HC) – Ecopaís

En la ilustración 7 A, se da una tendencia lineal, lo que demuestra que se está siguiendo una distribución normal. Con esto se comprueba que la base de datos es veraz y fortalece la investigación. En las ilustraciones 7 B Y 7 D se observa que los valores se encuentran dispersos entre cero tanto positivos como negativos. En la ilustración 7 C el perfil de la distribución en el histograma de los residuos expone una distribución normal en forma de campana con un pico individual, lo que corrobora la normalidad de los datos.

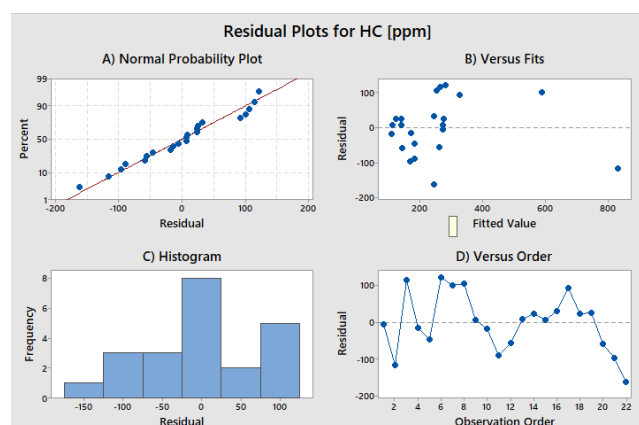


Ilustración 7. Gráficos residuales para los Hidrocarburos no quemados (HC).

Con la intención de descubrir las variables más relevantes con el HC, se procede con un estudio mediante la ayuda del diagrama de Pareto. En la ilustración 8 se aprecia los valores absolutos de los efectos estandarizados. Se observa que la línea

de regresión tiene un valor de 2,101 junto con un valor estadístico de confianza de 93,70($\alpha = 0,05$). Todas las variables que pasen esta línea se consideran determinantes para el HC.

Se identifica que el factor A que es el gas CO es influyente para el HC, junto con el factor B que significa el gas CO₂ también es influyente, por último, el factor AB que significa la interacción entre el CO y el CO₂ esta combinación también es influyente para el HC.

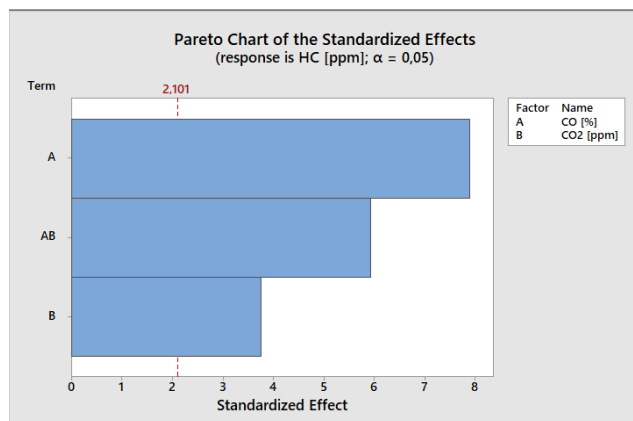


Ilustración 8. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado del (HC).

3.3. Estudio de los dióxidos de carbono (CO₂) - Ecopaís

En la gráfica 9 A (residuos vs porcentaje del CO₂) de la ilustración 9, se aprecia como los residuos están distribuidos y sobrepuestos a lo largo de la línea roja de regresión, lo que confirma la normalidad de los datos. En la ilustración 9 B, se muestra que hay datos agrupados; esto se da ya que las pruebas fueron controladas, pero los valores se mantienen alrededor de cero tanto positivos como negativos; esto nos dice que hay una independencia de resultados reduciendo los errores de muestreo. En la ilustración 9 C, la distribución del histograma muestra un pico unitario lo que certifica la autenticidad de los valores.

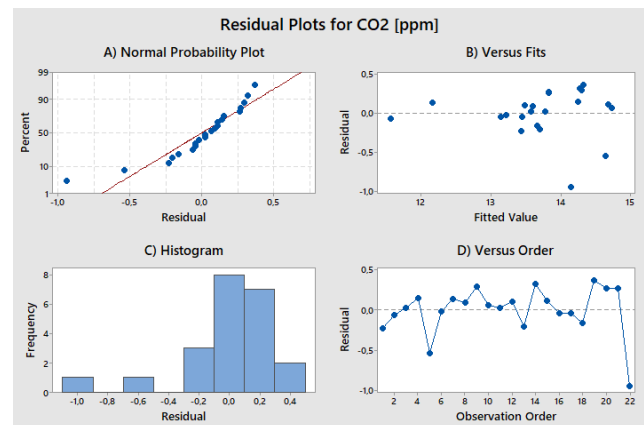


Ilustración 9. Gráficos residuales para los dióxidos de carbono (CO₂).

Con la intención de descubrir las variables más relevantes con el CO₂, se realiza un estudio mediante la ayuda del diagrama de Pareto. En la ilustración 10, se observa los valores absolutos de los efectos estandarizados. Se puede observar que la línea roja tiene un valor de 2,101 junto con un valor estadístico de confianza de 84,93% ($\alpha = 0,05$). Todos los factores que pasen esta línea se consideran determinantes para el CO₂.

En este caso, se detalla que ninguna de las variables afecta de forma directa al CO₂ por lo tanto no son significativos.

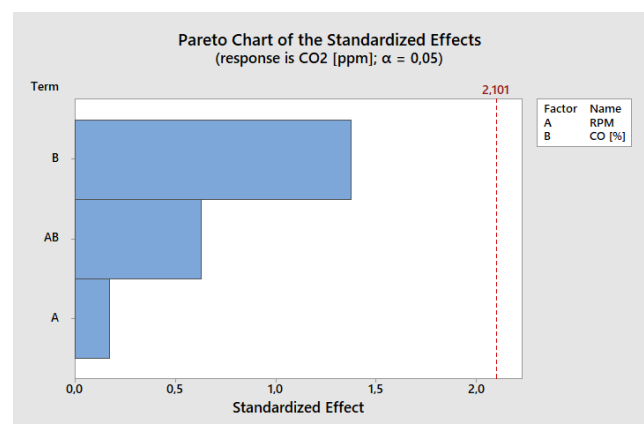


Ilustración 10. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado del (CO₂).

3.4 Estudio de las temperaturas de trabajo del catalizador - Ecopaís

Se utiliza el software estadístico que en este caso es Minitab, y se realiza un análisis de residuos de la temperatura de trabajo de entrada del

catalizador, la calidad del modelo se muestra en la ilustración 11 A, en donde los residuos (puntos de color azul) están distribuidos y sobrepuestos a lo largo de la línea roja de regresión, esto afirma que hay un ajuste adecuado a la distribución normal.

En la ilustración 11 B y 11 D (valores ajustados vs residuos), los residuos están dispersos aleatoriamente alrededor de cero con valores positivos y negativos, se muestra que hay una correcta aleatoriedad de datos, la ilustración 11 C detalla un pico individual en la media; lo que asegura la veracidad de los datos.

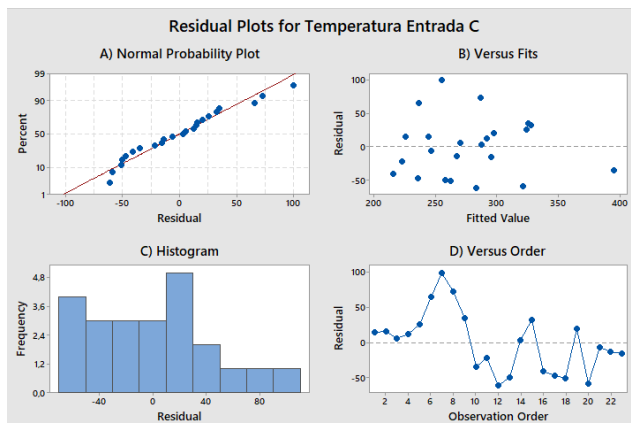


Ilustración 11. Gráficos residuales para la temperatura de trabajo del catalizador (Entrada).

El diagrama de Pareto presentado en la ilustración 12, muestra los valores absolutos de los efectos estandarizados para la temperatura de trabajo del catalizador en el área de entrada, planteados según su grado de influencia; desde el más influyente hasta el menos influyente.

En este caso se observa, que ninguno de los factores es influyente, como lo muestra la línea roja de regresión con valor de 2,131.

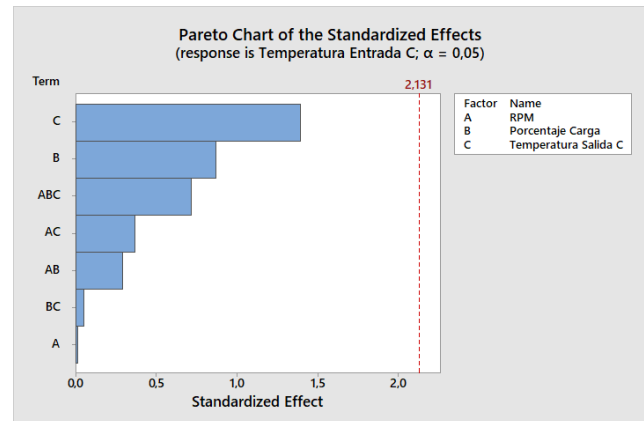


Ilustración 12. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado de (las temperaturas de trabajo del catalizador entrada).

En la ilustración 13 A, se ilustra una correcta distribución de los residuos (puntos de color azul) a lo largo de la línea roja de regresión, en las ilustraciones 13 B y 13 D los residuos están dispersos aleatoriamente alrededor de cero con valores positivos y negativos, junto con la ilustración 13 C en donde muestra un pico individual en la media; garantizando la veracidad de los datos obtenidos.

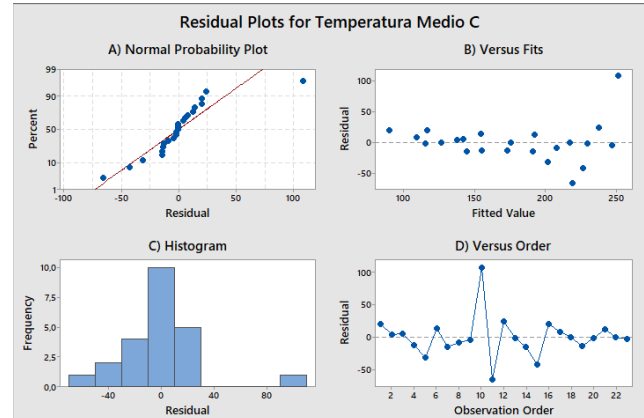


Ilustración 13. Gráficos residuales para la temperatura de trabajo del catalizador (Medio).

En la ilustración 14, se presenta la variable más relevante en relación con la temperatura de trabajo del catalizador, siendo la parte media del mismo. Con un valor de 2,131 en la línea roja junto con un nivel de confianza de 82,25% ($\alpha = 0,05$). Estos datos indican el factor C que significa la temperatura de salida, es determinante para la temperatura de trabajo del catalizador en el área media.

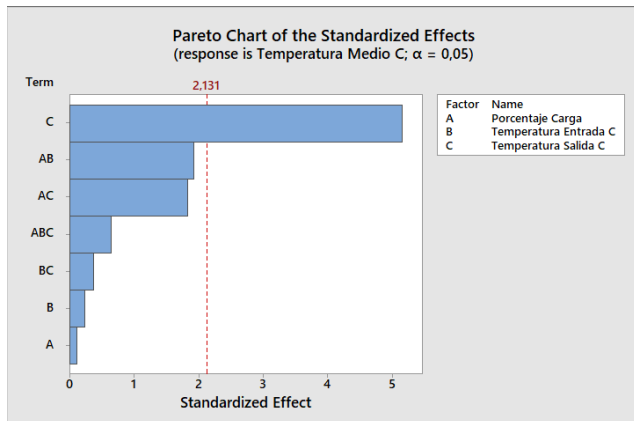


Ilustración 14. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado de (las temperaturas de trabajo del catalizador medio).

Así pues, el análisis de residuos de la temperatura de trabajo del catalizador en el área de salida, La ilustración 15 A, se muestra un reparto de residuos uniforme, ya que la mayor parte de los puntos azules se superponen con la línea de regresión.

En las ilustraciones 15 B y 15 D se observa que las variables se encuentran cerca de cero y están distribuidas al azar. Esto demuestra una coherencia en los datos. Por último, en la ilustración 15 C, se presenta una distribución normal en forma de campana con un pico individual lo que corrobora la normalidad de los datos.

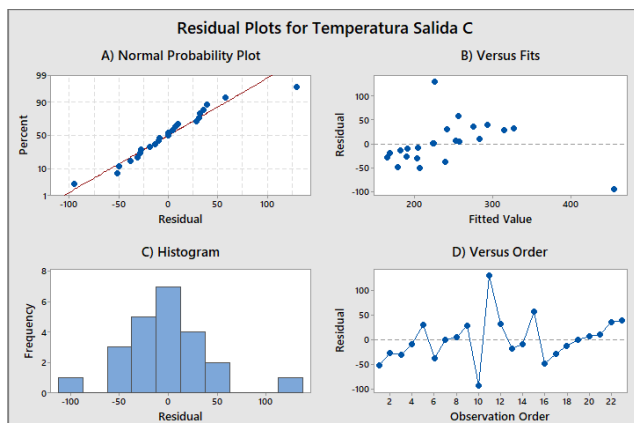


Ilustración 15. Gráficos residuales para la temperatura de trabajo del catalizador (Salida).

En la ilustración 16, se aprecian los efectos estandarizados en términos de sus valores absolutos, y la línea roja, con un valor de 2,131, señala la significancia estadística con un nivel de confianza del 87,96% ($\alpha = 0,05$), se procede a

observar el diagrama de Pareto para los efectos estandarizados respecto a la temperatura de trabajo del catalizador en el área de salida, se destaca el factor C que significa la temperatura de trabajo del catalizador en el área media; este factor es influyente para la temperatura de salida.

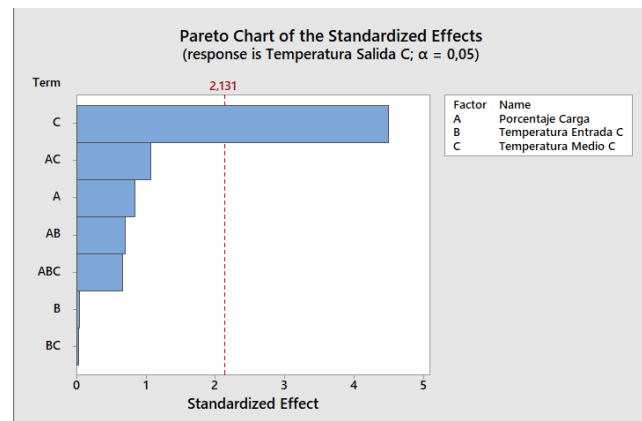


Ilustración 16. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado de (las temperaturas de trabajo del catalizador salida).

3.5 Ilustraciones de análisis de las variables identificadas como óptimas para reducir el CO, HC y CO₂.

Se muestra en la ilustración 17 que al cambiar las variables más influyentes para el CO en este caso es el CO₂ y el HC, el gas CO va a disminuir. El CO₂ ideal sería aproximadamente de 13,7 ppm y con un CO de 0,3%.

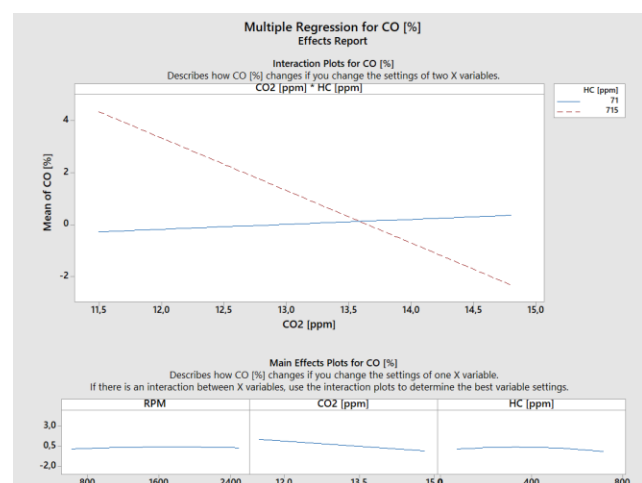


Ilustración 17. Gráfico de efectos principales para el monóxido de carbono (CO).

La ilustración 18, detalla que al cambiar las variables más influyentes para el HC que en este

caso es el CO₂ y el CO, el HC tiende a disminuir. Un HC ideal debe estar entre las 150 y 200 ppm mientras que el CO₂ debe estar entre 13,7 a 15 % [16]

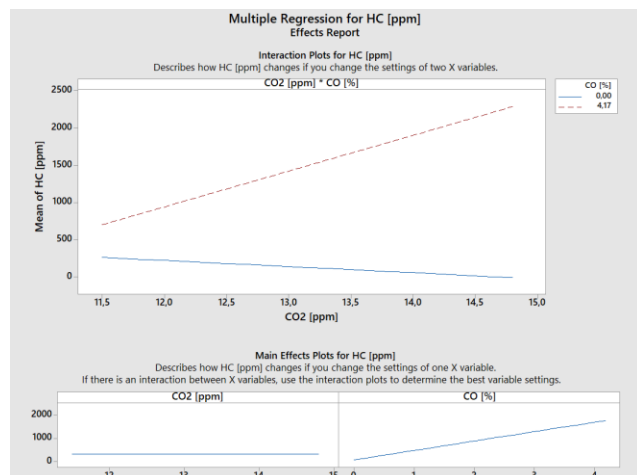


Ilustración 18. Gráfico de efectos principales para los Hidrocarburos no combustionados (HC).

A continuación, se presentan los límites establecidos por la normativa EURO 4 y normativa NTE INEN 2204 mostradas en la tabla 6 que es la que rige en Ecuador, se puede ver que los datos registrados apuntan a la normativa.

Con respecto a la normativa los resultados de la mezcla E50 representados en la tabla 7, son los que mejor cumplen los límites máximos, manteniéndose en los rangos en ralentí y con carga.

Tabla 6. Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina. Marcha mínima o ralentí (prueba estática).

Año modelo	% CO ^a		ppm HC ^a	
	0 - 1500 ^b	1500 - 3000 ^b	0 - 1500 ^b	1500 - 3000 ^b
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1000	1200

^a Volumen

^b Altitud = metros sobre el nivel del mar (msnm).

Tabla 7. Variables de entradas y salidas obtenidas del DOE combustible Ecopais E50.

MEZCLA E50	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	CO [%]	HC [ppm]	CO ₂ [ppm]
- Mezcla 50% etanol y 50% Eco pais	1	850	0	0,17	93	13,8
	2	625	20	0,47	206	13,6
	3	1250	40	0,53	280	13,5
	4	1875	60	0,27	165	14,6
	5	2500	80	0,22	119	14,8

3.6 Gráficas de comparación de las variables tomadas para las temperaturas de trabajo del catalizador.

Se presenta en la tabla 8, los registros termográficos del catalizador, trabajando el motor con las diferentes cargas y con la mezcla E50 la cual cumple con la normativa NTE INEN 2204.

Tabla 8. Variables de entradas y salidas obtenidas del DOE temperatura combustible Ecopais E50

MEZCLA E50	Orden de Corrida (Nº)	RPM	Porcentaje de carga (%)	Temperatura Entrada °C	Temperatura Medio °C	Temperatura Salida °C
- Mezcla 50% etanol y 50% Eco pais	1	850	0	201,2	152,3	151,2
	2	625	20	220,2	224,8	360
	3	1250	40	209,8	123,5	150,8
	4	1875	60	291,5	144,9	184,2
	5	2500	80	360	218,9	311

Como se observa, a mayor carga el catalizador eleva su temperatura de ingreso, esto se da ya que el catalizador necesita estar en una temperatura específica para poder filtrar los gases contaminantes.

En las imágenes termográficas, presentadas mas adelante, las zonas con la coloración mas fuerte (amarillo intenso) es en donde se origina la mayor temperatura, mientras que en las de menor coloración, la temperatura es menor.

Según los datos técnicos un catalizador debe trabajar a una temperatura mínima de 250 °C para una correcta conversión catalítica y con un máximo de 750°C posterior a esto se producen daños o fallas en la conversión catalítica [17].

En las ilustraciones termográficas, se observa los puntos M1 que hace referencia al área de entrada, M2 al área media y M3 al área de salida.

En la ilustración 19 y 20, se observa que el catalizador se encuentra con temperaturas de trabajo mínimas pues solo se encuentra con una carga del 0% hasta el 20%.

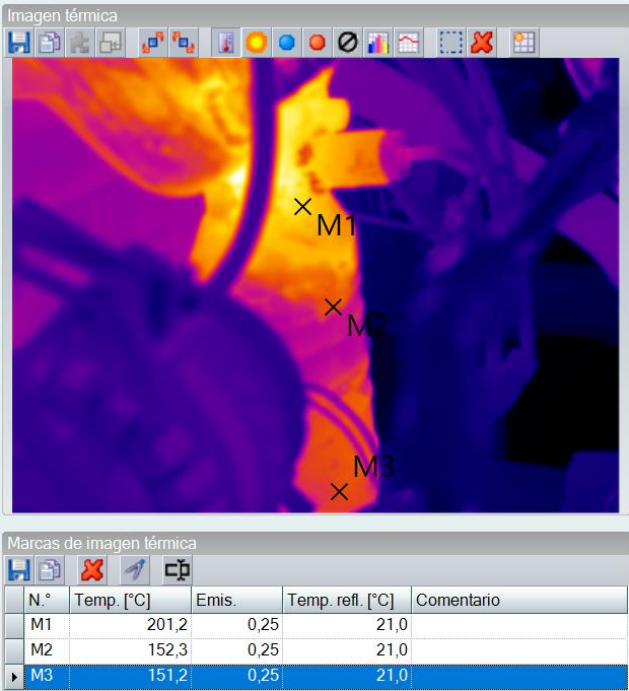


Ilustración 19. Imagen termográfica del catalizador con porcentaje de carga del 0% y mezcla E50.

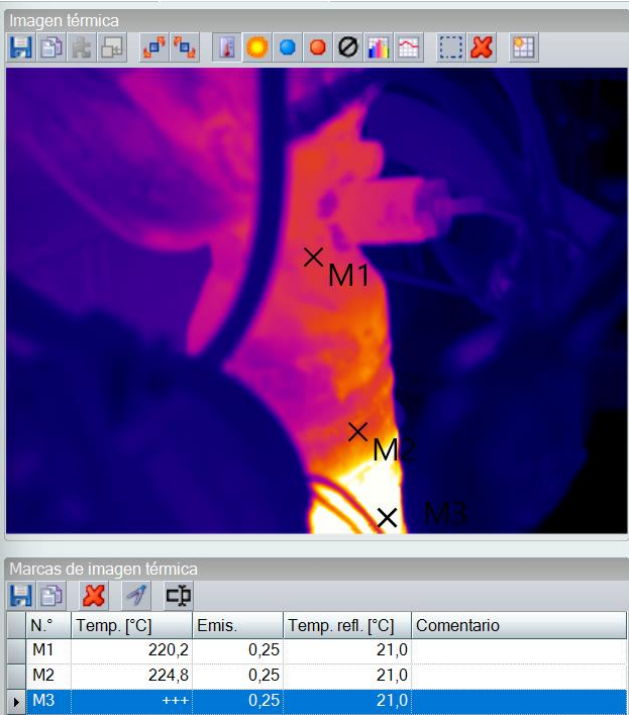


Ilustración 20. Imagen termográfica del catalizador con porcentaje de carga del 20% y mezcla E50.

En las ilustraciones 21, 22 se aprecia el cambio pronunciado de la temperatura del catalizador; ocasionado por el aumento de carga de un 40% y 60%, lo que provoca un mayor volumen de gases a filtrar.

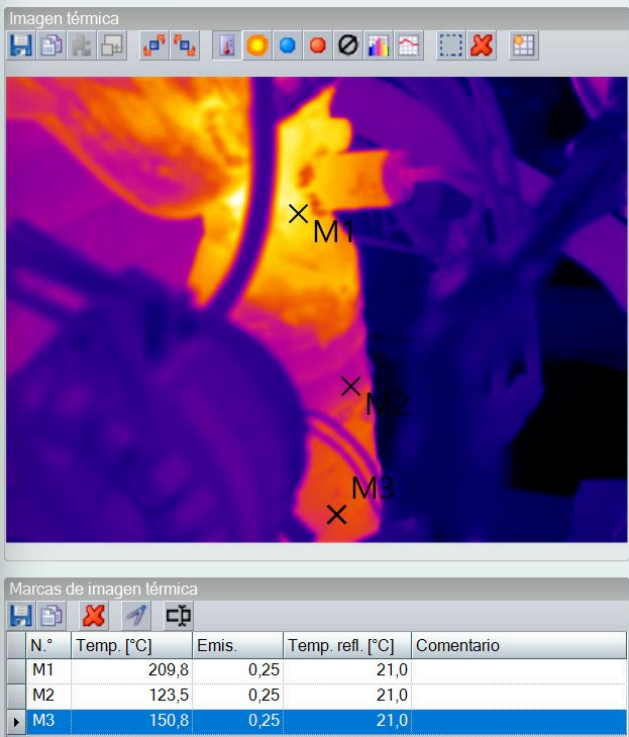


Ilustración 21. Imagen termográfica del catalizador con porcentaje de carga del 40% y mezcla E50.

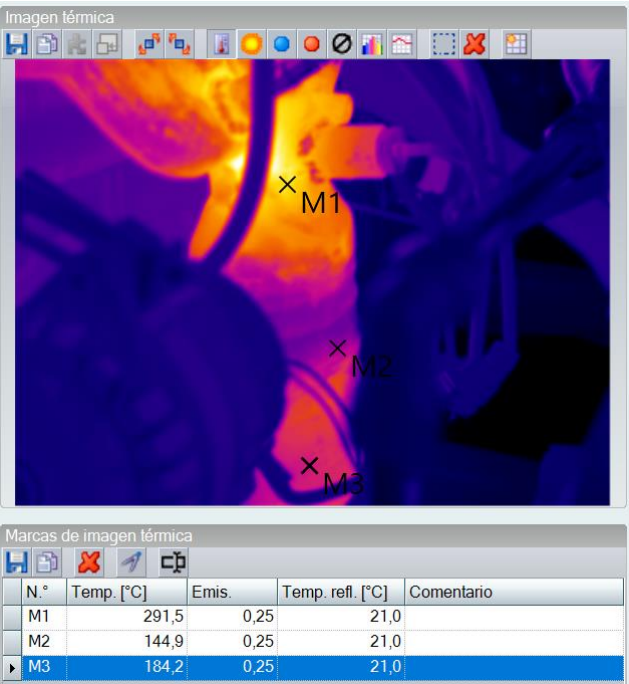


Ilustración 22. Imagen termográfica del catalizador con porcentaje de carga del 60% y mezcla E50.

La ilustración 23, muestra que el catalizador se encuentra con temperaturas altas (M3), como consecuencia del nivel de carga que es de un 80% casi a la máxima capacidad del motor.

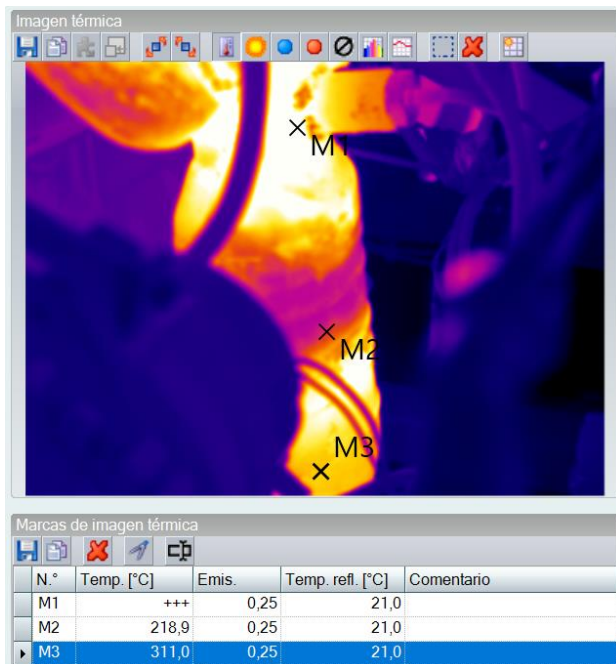


Ilustración 23. Gráfica termográfica del catalizador con porcentaje de carga del 80% y mezcla E50.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos gracias a la metodología del DOE fueron los suficientes para llegar a completar este estudio, demostrando que la aplicación de esta metodología fue efectiva para nuestra investigación. Este diseño experimental es una opción muy viable para investigaciones experimentales; basadas en la mezcla de combustibles y análisis de gases contaminantes.

Se ha identificado que, con una mezcla E50 que se compone del 50% de combustible Ecopaís (750 ml) y el 50% de etanol (750 ml) se puede obtener las emisiones mínimas de CO, HC y CO₂. Esta mezcla de combustible cumple con los niveles de emisiones permitidos en Ecuador.

Mediante el uso de los diagramas de Pareto, se han identificado los parámetros más influyentes en las emisiones de CO, HC y CO₂. Para el CO de la ilustración 5, los gases CO₂ y HC y la interacción entre estos dos hacen que sean significativas. En el caso del HC, los factores e interacciones mostrados en la Ilustración muestra que el factor A (gas CO) junto con el factor B (gas CO₂) también es influyente. En el caso del factor AB que significa la interacción entre el CO y el

CO₂; es una combinación que influye para el HC. Finalmente, en la ilustración 9, se puede apreciar que ninguna de las variables afecta de forma directa al CO₂, por lo tanto, no son significativos.

Las ilustraciones de los efectos principales de las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 16 y 17, presentan la tendencia de las rectas del caso de estudio, en donde se puede notar que las diferentes mezclas se ajustan de una u otra forma a las normativas establecidas, sin embargo, la mezcla E50 es la que mejor se adaptó a las normativas, incluso por debajo de los límites permitidos.

En las ilustraciones 19, 20, 21, 22, 23 se muestra el comportamiento termográfico del catalizador usando la mezcla mencionada, en donde resalta que a mayor carga del motor; mayor va a ser la temperatura de trabajo del catalizador. En el análisis termográfico del catalizador, se obtuvo una temperatura de trabajo en el área de entrada que ronda desde los 201,2°C hasta los 360 °C, en el área del medio se registró un rango de temperaturas de entre 152,3°C hasta los 218,90°C y, por último, el área de salida tuvo una relación de temperaturas de 151,2°C hasta los 311°C.

Los datos muestran que el catalizador trabaja dentro de las temperaturas idóneas para el convertidor catalítico.

Según los datos técnicos del fabricante, un catalizador debe trabajar a una temperatura mínima de 250 °C para una correcta conversión catalítica aproximadamente del 90% y con un máximo de 750°C, si se sobrepasa esta temperatura puede provocar graves daños en el funcionamiento de este elemento. La producción de hollín que se puede alojar internamente en los poros del convertidor catalítico puede provocar su taponamiento. Debido a esta obstrucción, los gases producto de la combustión no son liberados, y esto provocaría que aumente la presión y se sobrecaliente el motor.

En el análisis termográfico del catalizador usado en la prueba, se pudo apreciar que las

temperaturas de trabajo se mantienen dentro de los rangos mencionados anteriormente lo que garantiza su normal funcionamiento sin afectar la mezcla de combustible utilizada.

5. Referencias

- [1] E. V. R. H. V. J. & P. R. J. M. Rojas Reinoso, «Análisis del comportamiento de las emisiones de CO₂, CO y del factor lambda de un vehículo con sistema de inyección convencional con catalizador y sin catalizador.,» Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, Quito, (2020).
- [2] J. Lee, Y. Lee, J. Kim, S. Oh, J. Lee, J. Jung y J. Cha, *Effects of engine cooling strategy on Knock suppression in high-compression ration spark-ignition engine*, 2022.
- [3] J. Martinez y F. Robles, *Estudio del comportamiento de las variables de un motor de inyección electrónica respecto a la altura sobre el nivel del mar*, Quito, 2010.
- [4] N. INEN, *GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MOVILES TERRESTRES DE GASOLINA*, Quito, 2017.
- [5] G. Serpa y X. Zumba, *Determinación de la influencia en emisiones contaminantes, Torque, Potencia y consumo de combustible de un vehículo con motor ciclo Otto, de inyección electrónica de gasolina, mediante la variación de 6 tipos de bujías*, Quito, 2016.
- [6] G. Serpa, X. Zumba, F. Montalvo, D. Baño, J. Martinez y I. Zambrano, *Influencia del tipo de bujía en la evaluación del comportamiento y emisiones en un motor de encendido provocado.*, Enfoque UTE, 2019.
- [7] P. G. Caiza Jacome y A. A. Portilla Aguilar, *Determinación de la influencia de la altura en emisiones contaminantes de un vehículo con motor de ciclo Otto, de inyección electrónica de gasolina.*, Quito, 2011.
- [8] Yufeng, Z. GU y FANG, «Experimental Study on Different Ignition System Matching Different Spark Plug Gap,» *International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing*, pp. 305-308, 2009.
- [9] E. S. Aroyo Terán, A. F. Cevallos González, R. P. Imbaquingonavarrete y J. L. Melo Obando, «Estudio del efecto de la altitud sobre las emisiones de gases de escape de motores de combustión interna con encendido provocado.,» *Ing. Desarro.*, vol. 38, n° 1, pp. 148-162, 2020.
- [10] S. R. Lesano Pérez, «Estudio de la incidencia en las emisiones contaminantes mediante pruebas estáticas en un motor a gasolina considerando el comportamiento del termostato en el sistema de refrigeración bajo la Norma NTE INEN 2 204: 2002 en condiciones de ralentí o marcha mi,» *dspace*, Riobamba, 2021.
- [11] M. Lapuerta, O. Armas, J. Agudelo y C. A. Sánchez, «Estudio del efecto de la altitud sobre el comportamiento de motores de combustión interna. Parte 1: Funcionamiento.,» *Información Tecnológica*, vol. 17, pp. 21-30, 2006.
- [12] OMS, *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire. Materia particulada (MP_{2,5} y MP₁₀), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono*, Ginebra, 2021.
- [13] R. S. León Japa, J. L. Maldonado Ortega y R. W. Contreras Urgiles, «Predicción de emisiones de CO y HC en motores Otto mediante Redes Neuronales,» *Ingenius Revista de Ciencia y Tecnología*, n° 23, pp. 30-39, 2020.
- [14] E. A. M. E. E. C. D. & V. J. Lombardo, «Desarrollo y certificación ambiental de catalizadores para emisiones de escape de automóviles,» *Fundación para el Análisis Estratégico y Desarrollo de la Pyme*, Argentina, 2016.
- [15] J. C. R. M. J. S. C. & C. P. M. C. Terán, «Análisis comparativo de combustibles entre Colombia y Ecuador a partir de la norma INEN 2203 utilizada en la revisión técnica vehicular,» *Dominio de las Ciencias*, Quito, 2023.
- [16] E. A. Cedeño, J. C. Rocha-Hoyos, D. B. Zurita y J. C. Milla, «Evaluación de emisiones de gases en un vehículo liviano a gasolina en condiciones de altura,» *Enfoque UTE*, vol. 9, n° 2, pp. 149-158, 2018.
- [17] C. M. S. José, «CATALIZADORES DE ALTA ACTIVIDAD A BAJA TEMPERATURA,» IREC, Barcelona, 2020.