



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE CO, O₂ Y HC DE UN MOTOR HYUNDAI ACCENT 1500 cc
MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE LAS BUJÍAS**

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

AUTORES: PEDRO VINICIO ARÉVALO PARAPI

ELVIS ALEXANDER MALLA MAYAGUARI

TUTOR: ING. CHRISTIAN OMAR PULLA MOROCHO, MSc.

Cuenca - Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Pedro Vinicio Arévalo Parapi con documento de identificación N° 0107307209 y Elvis Alexander Malla Mayaguari con documento de identificación N° 0150182004; 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, 25 de julio del 2024

Atentamente,



Pedro Vinicio Arévalo Parapi
0107307209



Elvis Alexander Malla Mayaguari
0150182004

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

Nosotros, Pedro Vinicio Arévalo Parapi con documento de identificación N° 0107307209 y Elvis Alexander Malla Mayaguari con documento de identificación N° 0150182004, 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 Proyecto técnico: “Análisis de los niveles de CO, O2 y HC de un motor Hyundai Accent 1500 cc mediante la variación de la longitud de las bujías”, 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, 25 de julio del 2024

Atentamente,



Pedro Vinicio Arévalo Parapi
0107307209



Elvis Alexander Malla Mayaguari
0150182004

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 DE LO NIVELES DE CO, O2 Y HC DE UN MOTOR HYUNDAI ACCENT 1500 cc MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE LAS BUJÍAS, realizado por Pedro Vinicio Arévalo Parapi con documento de identificación N° 0107307209 y por Elvis Alexander Malla Mayaguari con documento de identificación N° 0150182004, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 25 de julio del 2024

Atentamente,



Ing. Christian Omar Pulla Morocho, MSc.

0103570602

ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE CO, O₂ Y HC DE UN MOTOR HYUNDAI ACCENT 1500 cc MEDIANTE LA VARIACION DE LA LONGITUD DE LAS BUJIAS

ANALYSIS OF CO, O₂ AND HC LEVELS OF A HYUNDAI ACCENT 1500 cc ENGINE THROUGH VARIATION OF THE LENGTH OF THE SPARK PLUGS

Pedro Vinicio Arévalo Parapi¹, Elvis Alexander Malla Mayaguari², Christian Omar Pulla Morocho³

Resumen

El presente estudio, se centra en la variación de los parámetros de calibración y la longitud de las bujías en un MCI para reducir las emisiones contaminantes. Los objetivos incluyen evaluar los efectos de la altitud, particularmente los 2.538 metros sobre el nivel del mar de la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay. Se utilizan bujías de diferentes longitudes, para analizar las emisiones de: monóxido de carbono (CO), oxígeno (O₂) e hidrocarburos no quemados (HC), mediante un analizador de gases. El diseño de experimentos (DOE) con 18 pruebas experimentales, se aplicó como metodología para la recolección de datos. Se emplearon herramientas para la investigación automotriz, tales como: Banco dinamométrico Armfield, analizador de gases MGT 5. El análisis estadístico muestra la relación entre los parámetros del motor y las variables consideradas. Resaltando que la calibración y la longitud son los factores que tienen mayor efecto sobre HC, O₂ y CO. Las condiciones ideales para reducir estas emisiones contaminantes son: calibración de electrodos de 0,50 mm y longitud de bujía de 13 mm.

Palabras clave: calibración de bujías, longitud de bujías; analizador de gases; banco dinamométrico; emisiones contaminantes

Abstract

The present study focuses on the variation of calibration parameters and spark plug length in an ICM to reduce pollutant emissions. The objectives include evaluating the effects of altitude, particularly the 2,538 meters above sea level of the city of Cuenca, Azuay province. Spark plugs of different lengths are used to analyze carbon monoxide (CO), oxygen (O₂) and unburned hydrocarbons (HC) emissions using a gas analyzer. The design of experiments (DOE) with 18 experimental tests was applied as the methodology for data collection. Automotive research tools were used, such as: Armfield dynamometric bench, MGT 5 gas analyzer. The statistical analysis shows the relationship between the engine parameters and the variables considered, highlighting that calibration and length are the factors that have the greatest effect on HC, O₂ and CO. The ideal conditions to reduce these pollutant emissions are: 0.50 mm electrode calibration and 13 mm spark plug length.

Keywords: Spark plug calibration, spark plug length, gas analyzer, dynamometer, pollutant emissions

1. Introducción

Los motores de combustión interna sufren alteraciones negativas en su rendimiento en zonas elevadas, afectando la potencia, el torque y las emisiones contaminantes [1, 2]. En respuesta a este desafío, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido directrices internacionales para reducir los riesgos asociados con la contaminación atmosférica, que tiene efectos perjudiciales en la salud humana [3]. Estas directrices forman parte de un esfuerzo global que incluye normativas como las regulaciones EURO, diseñadas para mitigar los efectos nocivos de los motores de combustión interna. La edición 4 de las normativas EURO se considera adecuada para las condiciones geográficas específicas donde se realizó esta investigación. Según estas normativas, los vehículos con inyección electrónica deben cumplir con estrictos estándares de emisiones durante pruebas dinámicas, con límites de 0.08 gr/km para NO_x, 1.0 gr/km para CO y 0.10 gr/km para HC [4]. A nivel local, la normativa NTE INEN 2204 aplica a vehículos terrestres con más de tres ruedas o sus motores, estableciendo límites de 1% para CO y 200 ppm para HC durante pruebas estáticas [5]. Estas regulaciones son esenciales para controlar y mitigar los impactos ambientales y de salud pública derivados de las emisiones vehiculares en diversas condiciones operativas y geográficas.

La región montañosa de la sierra en Ecuador presenta condiciones que afectan significativamente el funcionamiento de los motores [6]. En un estudio dirigido a investigar las variaciones en zonas elevadas, Vargas Martínez y Robles [7], realizaron pruebas estáticas y dinámicas en cinco provincias ecuatorianas, desde el nivel del mar hasta los 4500 metros sobre el nivel del mar. Según los hallazgos, se observó que el vacío del motor disminuye aproximadamente 7.7 kPa por cada 1.000 metros de altura, lo que resulta en una disminución del rendimiento de los motores de

combustión interna en términos de potencia y torque efectivo. Además, esta situación conlleva a un aumento en el consumo específico de combustible y una mayor emisión de contaminantes como CO y HC hacia la atmósfera [8]. Estos resultados subrayan la importancia de comprender y gestionar los efectos de la altura en el desempeño ambiental y operativo de los vehículos en estas áreas geográficas específicas.

En cuanto a la optimización del rendimiento de los motores de combustión interna, investigaciones recientes [9, 10, 11] han destacado el papel crucial de las bujías en este proceso. Estos estudios en conjunto destacan la relevancia de las bujías tanto en la mejora del desempeño de los motores como en la reducción de las emisiones. Según el trabajo realizado por Serpa y Zumba [9], variar el tipo de bujías puede significativamente aumentar la eficiencia del motor y reducir las emisiones contaminantes. En su análisis de un motor con 1500 cm³ de cilindrada, han encontrado que la bujía NGK BKR5E-11 ha mejorado el rendimiento del motor en un 18%, reducido las emisiones en un 2%, optimizado el arranque en frío y disminuido el consumo de combustible hasta en un 14.4%. Estos descubrimientos resaltan la importancia de seleccionar adecuadamente las bujías como parte integral de las estrategias para mejorar tanto el rendimiento operativo como el impacto ambiental de los motores de combustión interna.

En la continuación de esta línea de investigación, se ha llevado a cabo un estudio detallado en [12], el cual estudia la capacidad de ajuste de los espacios entre electrodos de las bujías en distintos sistemas de encendido [13]. El objetivo principal ha sido determinar el espacio óptimo para las bujías en motores, hallando que los sistemas de encendido convencionales emplean bujías con 0,7 mm de espacio debido a su menor energía de chispa, mientras que los sistemas de alto rendimiento prefieren 1,3 mm. Además, se ha evidenciado que las bujías con

mayores holguras, combinadas con sistemas de encendido avanzados, pueden adaptarse eficazmente a altas velocidades y relaciones de compresión elevadas, mejorando tanto la supresión de detonaciones no controladas como el rendimiento global del motor. Estos resultados subrayan la importancia de ajustar con precisión los espacios entre electrodos de las bujías según las demandas específicas del motor y las condiciones operativas, con el propósito de optimizar la eficiencia y la confiabilidad del sistema de encendido en diversas circunstancias.

En un estudio reciente [11], se examina cómo la ubicación de la bujía en el centro de la cámara de combustión y la colocación del inyector en un lado del cilindro afectan la mezcla aire-combustible, la combustión y las emisiones en motores de combustión interna. Esta técnica ha demostrado mejorar el rendimiento del motor y reducir las emisiones contaminantes de manera efectiva. Estos avances tecnológicos ofrecen varias ventajas, incluido un aumento de rendimiento del motor en un 16%. Esto subraya la importancia de diseñar y ubicar estratégicamente los componentes internos del motor para optimizar la eficiencia y la ecoeficiencia en términos de emisiones.

Los estudios presentados ofrecen una sólida evidencia sobre el papel fundamental que tienen las bujías en la optimización del rendimiento de los motores de combustión interna y en la reducción de las emisiones contaminantes. No obstante, estas investigaciones presentan una limitación al no explorar detalladamente las características geométricas de las bujías, como su longitud y su impacto específico en las emisiones contaminantes. En respuesta a esta necesidad, este estudio aborda esta deficiencia y propone investigar las variaciones en la longitud de las bujías dentro de la cámara de combustión y la calibración de los electrodos de las bujías [14]. Estas medidas se plantean como una alternativa viable para potenciar la eficiencia del proceso de combustión y reducir las emisiones de gases contaminantes.

2. Materiales y Métodos

En este apartado se detallará el procedimiento metodológico aplicado en el estudio, junto con una descripción exhaustiva de los materiales y equipos utilizados en la investigación.

2.1. Metodología

Este estudio adopta la metodología descrita en [15], con un reajuste reflejado en el flujograma presentado en la Ilustración 1. El flujograma se organiza en tres fases: preproceso, proceso y postproceso.

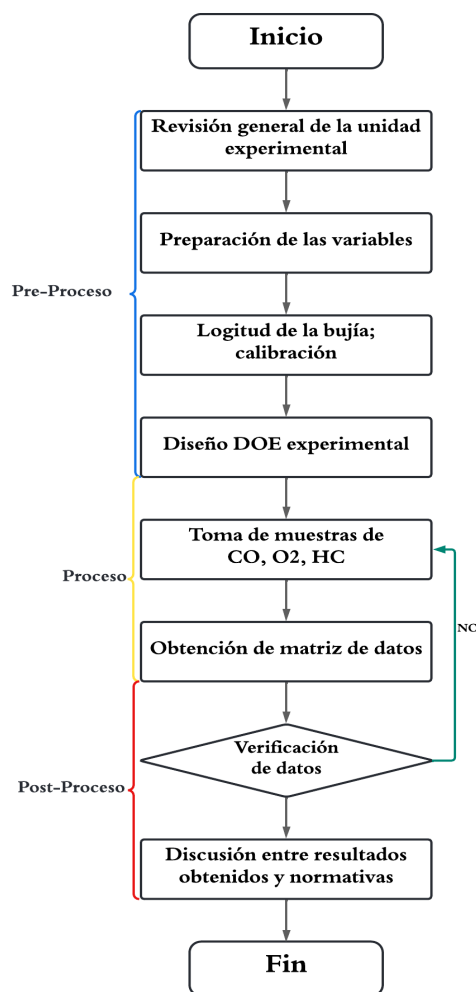


Ilustración 1. Diagrama de flujo de la metodología aplicada

En la primera fase del preproceso, se emplea un procedimiento inductivo, empezando con la inspección general del banco dinamométrico asegurando la correcta funcionabilidad del motor y realizando un mantenimiento general de los componentes como: filtros de combustible y aire, bujías, los niveles de aceite y refrigerante. A continuación, se establecen los factores y niveles que afectarán en las emisiones del motor, que son: longitud de bujía con 13, 16 y 19 mm, la calibración de electrodos de la bujía con 0.5, 0.7, 0.9, 1.1 y 1.3 mm.

En el último punto del preproceso, se realiza el diseño experimental DOE, estructurado con 2 factores cada uno con 2 niveles. Se genera una matriz en la que representa todas las combinaciones de niveles de factores. El DOE se prepara con 18 ejecuciones de pruebas, lo que garantiza la coherencia y consistencia de los datos. El detalle del DOE se explica en la tabla 2 de la sección 3 del presente documento. De acuerdo con el diseño, se identifican las diferentes combinaciones de variables de entrada y su impacto en los gases analizados que son: CO, O2 y HC.

Al iniciar la fase del proceso, se determinará el plan de muestreo y la recolección de datos que se llevará a cabo como parte de los experimentos y pruebas planificadas durante la fase DOE. La recolección de datos se realiza con equipos automotrices, detallados en la sección 2.2. Los datos recopilados se incorporan en una matriz de datos finales según el orden de corrida, la cual se verifica para asegurar la precisión y eficacia del análisis.

En la fase final del postproceso, se procede con el análisis de los resultados obtenidos en la medición de gases, siguiendo la normativa NTE INEN 2204 para evaluar el nivel de contaminación.

Una vez descrita la metodología, se presentan a continuación los materiales empleados en el estudio.

2.2. Materiales

La Ilustración 2, muestra los equipos y materiales empleados en la investigación.

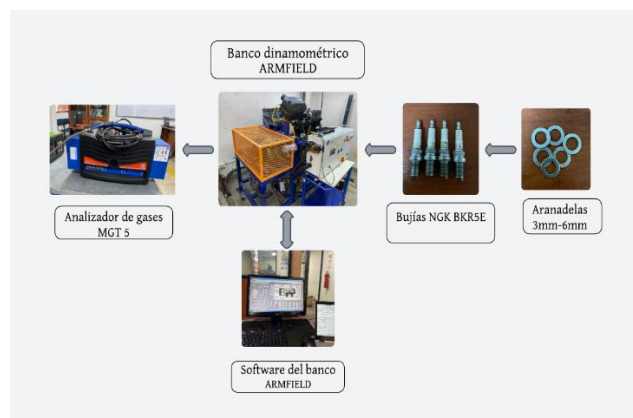


Ilustración 2. Equipos utilizados para la recolección de muestras en el banco dinamométrico Armfield.

A continuación, se presentan las especificaciones de los equipos con una descripción detallada, en la siguiente Tabla.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los equipos automotrices.

Nombre del equipo	Imagen	Especificaciones técnicas
Banco dinamométrico Armfield CM11		<ul style="list-style-type: none"> • Freno dinamométrico: KLAM. • Modelo: K40 • Potencia máxima 60KW • Torque máximo 145Nm, • Voltaje: 220-240V • Frecuencia: 50-60Hz
Unidad experimental		<ul style="list-style-type: none"> • Cilindrada: 1.5 l. • Número de cilindros: 4 • Número de válvulas: 16 • Modelo: G4FK • Motor: Alpha II. • Potencia máxima: 74 KW @ 6000 RPM • Torque máximo: 134

Bujía NGK
BKR5E



- Relación de compresión: 9,5:1
- Distribución: DOHC
- Sistema de inyección MPFI

- Diámetro de rosca: 14 mm.
- Largo rosca (L): 19 mm.
- Ancho llave: (5/8) 16 mm.
- Material Electrodo Platino.
- Espesor 3mm.

Arandelas



- Espesor: 3mm y 6mm.
- Diámetro interno: 14 mm
- Material: Aluminio.

Analizador de gases MGT-5



- Regulación de temperatura automática (2-8 min).
- Medición de (CO, HC, CO₂, O₂, λ, Nox opcional).
- Respuesta mínima de 10 segundos.
- Bomba trabajo pesado y larga duración con bajo consumo de energía.
- Tiempo de calentamiento aproximado 2~8 min.
- Alimentación 220v o 110V CA ±10% 50 o 60 Hz.

estudio, que son CO, O₂ y HC. Los datos obtenidos se organizan de forma estructurada en la Tabla 2.

Tabla 2. Base de datos variables de entrada y salida obtenidas del DOE.

Orden de Corrida (N°)	STD Orden (N°)	Longitud rosca(mm)	Calibración (mm)	RPM	CO [%]	HC [ppm]	O ₂ %
1	6	19	1,1	1000	0,52	190	1,78
2	9	16	0,9	1000	0,52	159	1,55
3	18	13	0,5	1000	0,20	136	1,30
4	13	13	0,5	1000	0,22	137	1,34
5	4	19	1,1	1000	0,50	195	1,80
6	1	19	0,5	1000	0,59	316	1,91
7	16	13	1,1	1000	0,50	135	1,73
8	11	16	1,3	1000	0,54	166	1,73
9	3	19	0,9	1000	0,58	251	1,88
10	8	16	0,7	1000	0,48	155	1,64
11	7	16	0,5	1000	0,53	180	1,67
12	17	13	1,3	1000	0,50	136	1,60
13	12	16	0,7	1000	0,50	150	1,60
14	5	19	1,3	1000	0,51	189	1,80
15	15	13	0,9	1000	0,30	101	1,33
16	2	19	0,7	1000	0,54	240	1,87
17	10	16	1,1	1000	0,53	175	1,76
18	14	13	0,7	1000	0,10	115	1,07

3. Resultados y Discusión.

A continuación, en la Tabla 2, se muestran los valores correspondientes a las variables de entrada y salida, obtenidos mediante la aplicación del DOE con un total de 18 pruebas. Durante estas ejecuciones se modificaron los parámetros de entrada, tales como la calibración de los electrodos de las bujías y la longitud de la bujía en la cámara de combustión. Estos ajustes permitieron obtener los parámetros de salida evaluados en este

3.1 Estudio del monóxido de carbono (CO)

En la Ilustración 3, se muestran tanto el valor de R² como el p-valor, estos valores validan la eficacia del modelo lineal al cumplir con los supuestos estadísticos necesarios. El p-valor es inferior a 0.001, lo que indica un alto nivel de significancia y, por ende, respalda la fiabilidad de los resultados obtenidos en el estudio. Adicionalmente, el modelo presenta una significancia estadística notable, reflejada en un R² ajustado de 98.20%. Este alto porcentaje

sugiere que el modelo es capaz de explicar el 98.20% de la variabilidad de la variable estudiada, proporcionando así una fuerte evidencia de su capacidad predictiva.

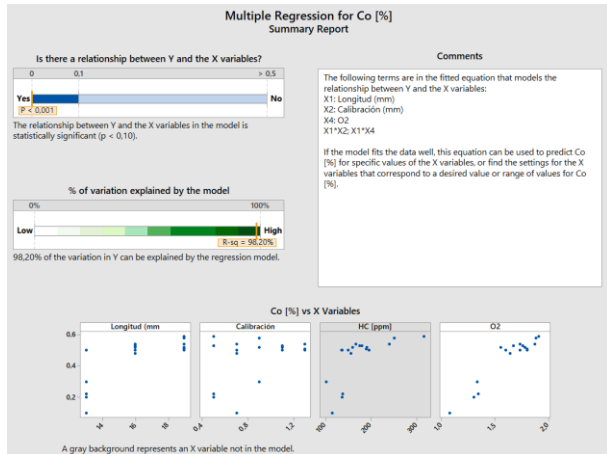


Ilustración 3. Regresión múltiple de CO.

Con el propósito de investigar cómo la longitud de la bujía afecta la variación en el porcentaje de monóxido de carbono (CO), se ha llevado a cabo un análisis de los efectos principales relacionados con este gas. La Ilustración 4 muestra los resultados de este estudio, revelando que la concentración más baja de CO, con un valor de 0.45%, se obtiene cuando se utilizan bujías de 13 mm de longitud en el motor. Mientras que, el valor más alto registrado para este gas es de 0.563%, que se observa al emplear bujías con una longitud de 19 mm.

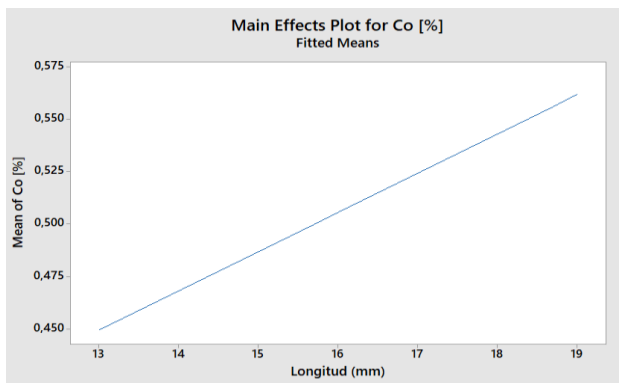


Ilustración 4. Gráfico de efectos principales para el monóxido de carbono (CO).

En el diagrama de Pareto de la ilustración 5 para el gas CO, se observa que con un nivel de confianza del 95% (equivalente a 0.05), la línea

roja, con un valor de 2.145, marca el umbral de significancia estadística. Esto significa que cualquier factor que exceda esta línea se considera significativo. En este contexto, el factor A, que se refiere a la calibración, y la interacción AB superan dicho umbral, lo que indica que estas variables son las más influyentes en relación con el gas CO.

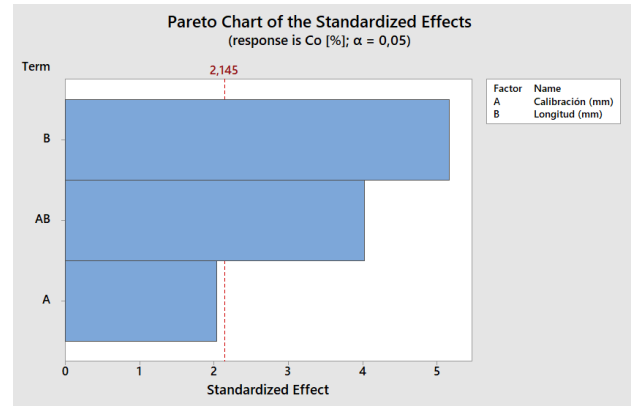


Ilustración 5. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado de Monóxido de carbono (CO).

En la ilustración 6, se observa la gráfica de Residuos versus Porcentaje del CO, los puntos azules se sobrepone con la línea diagonal de color rojo, esta tendencia valida la normalidad en los residuos. Además, el histograma afirma que los resultados siguen una distribución normal. En la Ilustración 6 B, de Valor Ajustado frente a los Residuos, se destaca que los residuos están distribuidos de forma aleatoria sin seguir un patrón predecible en relación con el valor ajustado. Por otro lado, la ilustración 6 D, se puede apreciar que los puntos no siguen un patrón específico y se distribuyen aleatoriamente alrededor de la línea cero. Esto respalda el supuesto de independencia de los residuos, lo cual indica que el supuesto de independencia de los errores muestrales es válido.

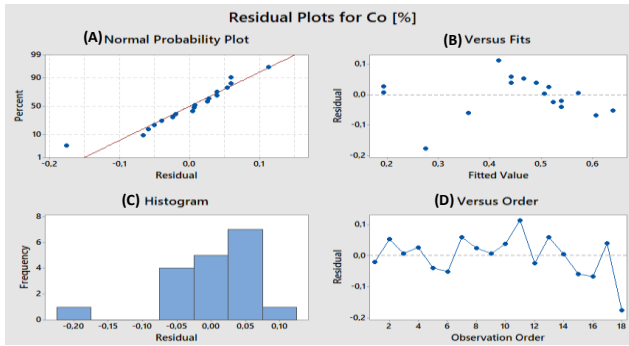


Ilustración 6. Gráficos residuales para el monóxido de carbono (CO).

3.2. Estudio del oxígeno (O2)

En la ilustración 7, se presentan los valores de R^2 y el p-valor, los cuales demuestran la validez del modelo lineal al consolidar los supuestos estadísticos necesarios. El p-valor, con un valor que es menor a 0.001, indica un alto nivel de significancia dentro del modelo, confirmando la validez de los resultados del estudio. Asimismo, el modelo exhibe una notable significancia estadística, reflejada en un R^2 ajustado de 95.02%. Este elevado valor sugiere que el modelo es capaz de explicar la variabilidad de la variable en cuestión, lo que proporciona una fuerte evidencia de su capacidad predictiva dentro de este estudio.

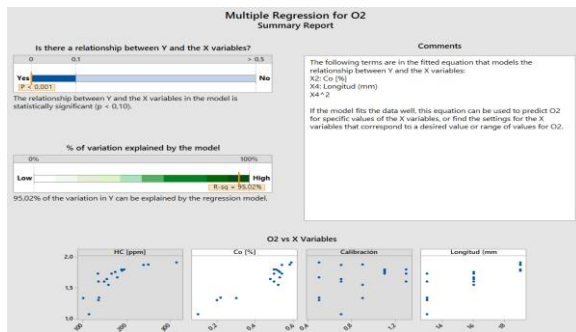


Ilustración 7. Regresión múltiple de O2.

En la Ilustración 8, se analiza el impacto de la longitud de las bujías en los niveles de concentración del O2 en ppm. La grafica 8, resalta los efectos principales relacionados con estos compuestos. Se observa que para este gas las concentraciones más bajas, se presentan en un valor para el O2 de 1560 ppm, este valor se produce cuando se emplean bujías de 15 mm de

longitud. Por otro lado, se evidencia que cuando se aumenta la longitud roscada de las bujías, las concentraciones de O2 aumentan su valor llegando a un valor máximo de 1720 ppm con una longitud de bujía de 19 mm.

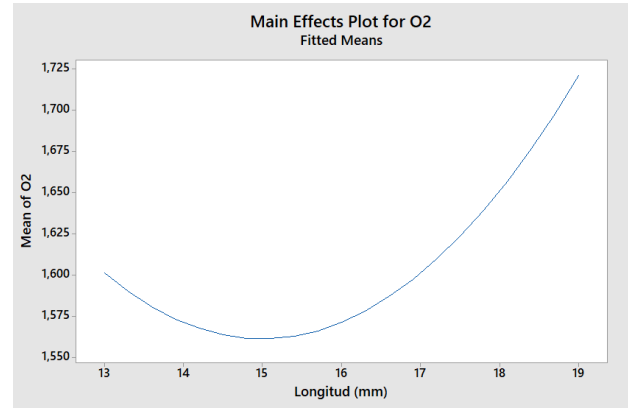


Ilustración 8. Gráfico de efectos principales para el oxígeno (O2).

En el diagrama de Pareto de la ilustración 9, para el gas O2, con un nivel de confianza del 95% (0.05), la línea roja que tiene un valor de 2.145 define el umbral de significancia estadística. Los factores que superan este valor, como el factor A (calibración) y la interacción AB que hace referencia a (longitud por calibración), son considerados significativos, indicando que son los más influyentes para el gas del O2.

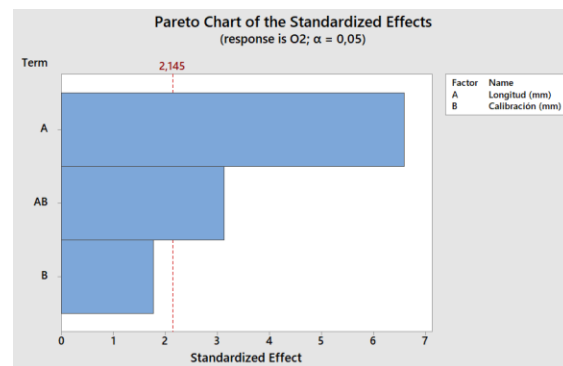


Ilustración 9. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado del oxígeno (O2).

En la Ilustración 10, se presenta la gráfica de probabilidad normal en la cual se observa una repartición uniforme de los residuos, ya que los puntos azules se alinean con la línea roja de

regresión siguiendo una tendencia específica con esto se confirma que el estudio no está influenciado por variables externas y valida el supuesto de normalidad. En las Ilustraciones 10 B, que representa el valor ajustado versus residuos, las variables están cercanas a cero y se distribuyen aleatoriamente es decir que no siguen ningún patrón en su distribución, lo que indica consistencia en los datos. Finalmente, la Ilustración 10 C del histograma, muestra una distribución normal en forma de campana de Gauss, lo que confirma la normalidad de los datos y una correcta toma de datos en la investigación.

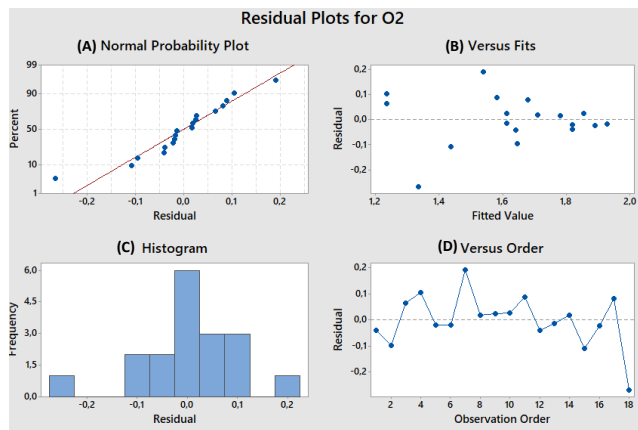


Ilustración 10. Gráficos residuales para el oxígeno (O2).

3.3. Estudio de Hidrocarburos no quemados (HC)

En la ilustración 11, se presenta el resultado del valor de R^2 y el valor p, los valores obtenidos de estos resultados demuestran la validez del modelo ya que fortalece los supuestos estadísticos. Con un valor p menor a 0.001, que revela un elevado nivel de significancia para este modelo, así se confirma que los resultados son válidos para el estudio, por otro lado, la significancia estadística es notable ya que manifiesta un R^2 ajustado de 98.37%. Este alto valor porcentual indica que el modelo puede revelar la variabilidad de la variable estudiada, ofreciendo así seguridad en su capacidad predictiva del análisis.

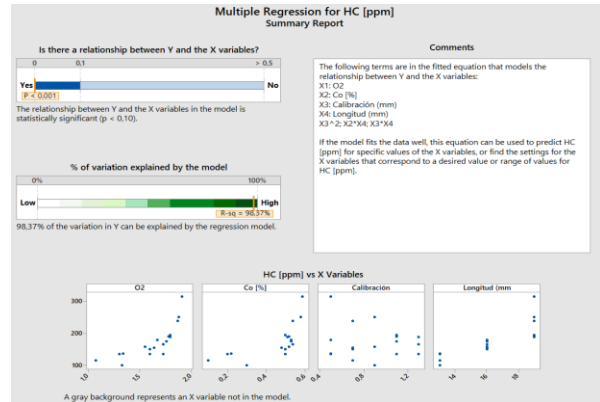


Ilustración 11. Regresión múltiple del (HC).

En el análisis de los efectos principales del HC presentado en la ilustración 12, se observa que con una longitud de bujía de 13 mm se puede obtener el valor de salida más bajo, situado en 155,6 ppm. Se identifica además que el valor de la longitud es proporcional al valor del HC, es decir, si se incrementa la longitud, también aumentan los valores de HC, estableciendo así una relación directamente proporcional.

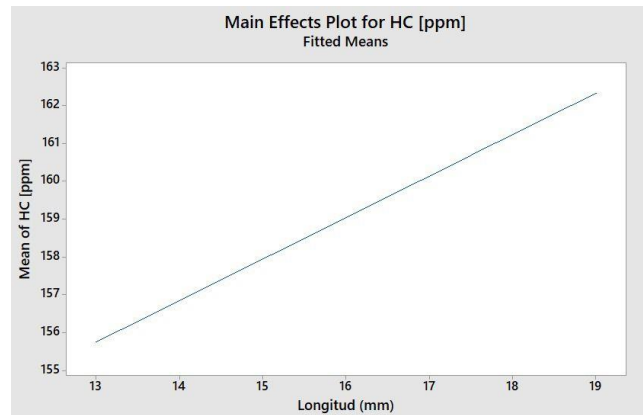


Ilustración 12. Gráfico de efectos principales para los Hidrocarburos no quemados (HC).

La ilustración 13, muestra el estudio de las variables más influyentes para el gas HC se procede hacer el diagrama de Pareto con un nivel de confianza del 95% (0.05) el nivel de significancia estadística esta dado por la línea roja vertical con un valor de 2.145, las variables que sobrepasan esta línea vertical se consideran influyentes en este caso todas las variables sobrepasan el umbral y se consideran como significativas en este gas.

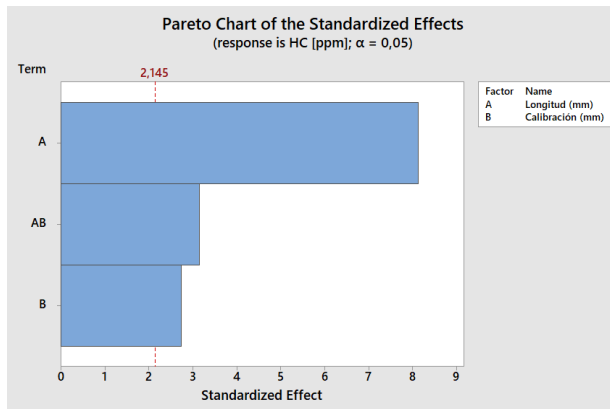


Ilustración 13. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado del (HC).

Para el análisis de los residuos se presenta la ilustración 14, en la cual la gráfica de normalidad demuestra que los puntos de color azul siguen una tendencia sobreponiéndose a la línea roja validando así el supuesto de la distribución normal. Para las Ilustraciones 14 B y D, las variables están cercanas a cero y se presentan de forma aleatoria es decir que no siguen ningún patrón en su distribución, lo que indica una exactitud general en las mediciones realizadas y reconoce una correcta toma de datos. Además, al examinar el histograma, se confirma que los resultados siguen una distribución normal. Estos hallazgos respaldan el supuesto de normalidad en el estudio y respaldan el análisis estadístico de la investigación.

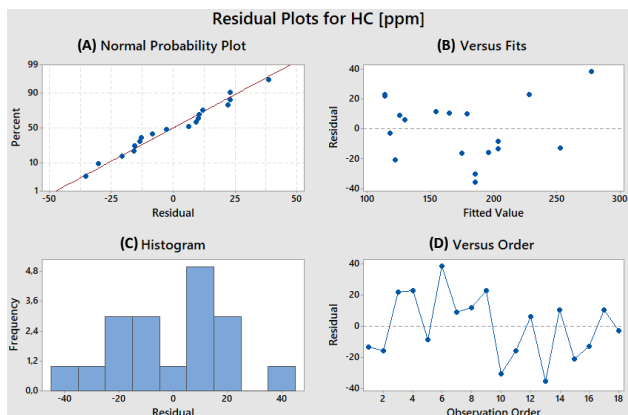


Ilustración 14. Gráficos residuales para los Hidrocarburos no quemados (HC).

3.4. Graficas de comparación de las variables identificadas como óptimas para minimizar CO, O2 y HC

Para este caso de estudio, los valores ideales para lograr reducir el HC, O2 y CO se presentan en la ilustración 15. Esta muestra que una longitud de bujía de 13 mm y una calibración de electrodos de 0.50 mm representan la combinación idónea para cumplir con los objetivos del estudio, es decir, reducir las emisiones contaminantes. Estos resultados pueden servir como guía para futuros estudios enfocados en mejorar los sistemas asociados con las bujías y su calibración.

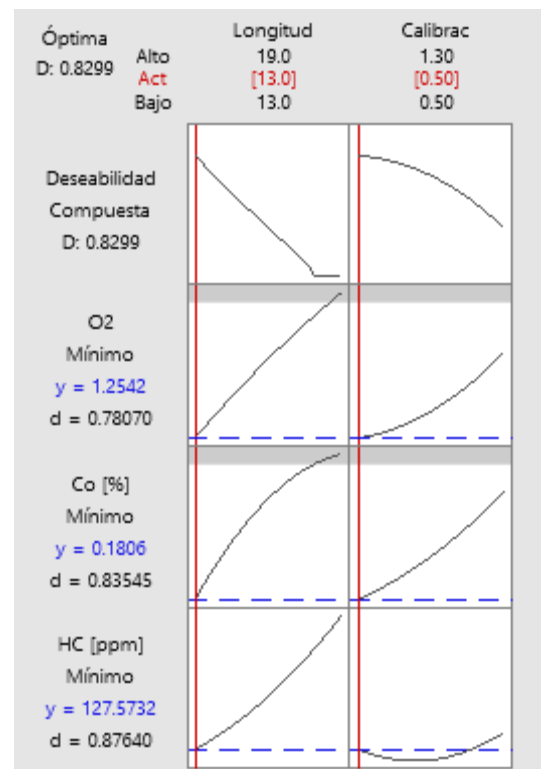


Ilustración 15. Variables identificadas como óptimas para minimizar el CO, O2 y HC

En relación con el cumplimiento de los límites establecidos por la normativa EURO 4 y NTE INEN 2204, los resultados de la optimización mostraron que, con una longitud de rosca en la bujía de 13 mm y una calibración de electrodos de 0,5 mm, son valores que cumplen con los estándares de emisiones nacionales para

CO y HC. Estos valores garantizan que las emisiones de CO y HC se mantengan dentro de los límites permitidos, contribuyendo a una reducción significativa de la contaminación y asegurando un rendimiento eficiente del motor. Además, esta configuración permite cumplir con las exigencias ambientales establecidas por la normativa nacional, lo que subraya la efectividad del proceso de optimización empleado.

Para el CO se obtuvo un resultado de 0,1806 %, mientras que la norma nacional establece un límite máximo permitido de 1 %. Esto indica que las emisiones están dentro de los límites establecidos por la normativa nacional.

En el caso de los hidrocarburos HC, se logró una reducción de los gases contaminantes, alcanzando un valor de 127,57 ppm. Este resultado está por debajo del límite máximo de 200 ppm establecido por la normativa nacional. Esto demuestra la efectividad de las medidas implementadas, asegurando que las emisiones de HC se mantengan dentro de los límites permitidos.

4. Conclusiones

Los resultados del diseño experimental DOE fueron satisfactorios para determinar cómo las variables de entrada, como la calibración de los electrodos y la longitud de las bujías, afectan las emisiones de gases contaminantes de un motor de combustión interna. Esto confirma la efectividad de la metodología empleada en esta investigación, que incluyó (18 corridas), y se presenta como una alternativa eficiente, rápida y económica para estudios sobre emisiones contaminantes en los MCI.

En esta investigación se lograron identificar los valores óptimos de entrada para reducir los gases contaminantes de HC, O₂ y CO. Los valores determinados son: una longitud de bujías de 13 mm y una calibración de electrodos de 0,5 mm, como se indica en el análisis de la ilustración 15. Estos valores cumplen con los parámetros

establecidos por la normativa nacional INEN 2204. Siendo:

- CO = 0,1806 % (valor obtenido) < 1% (según norma).
- HC = 127,57 ppm (valor obtenido) < 200 ppm (según norma).

Con la ayuda de las ilustraciones de los diagramas de Pareto, se reconocieron las variables que más influyen en los gases HC, O₂ y CO. Para el gas HC, se observó que múltiples variables como la longitud, la calibración y la interacción AB se presentan de forma significativa, como se muestra en la ilustración 13. En cuanto al gas CO, se identificó que la variable de mayor influencia es la longitud como muestra la ilustración 5. Finalmente, para el gas O₂, se determinó que la variable de longitud y la interacción de longitud por calibración son las más influyentes, como se muestra en la ilustración 9.

Las gráficas de los efectos principales presentadas en las ilustraciones 4, 8 y 12 muestran diferentes curvas que destacan la relación entre la longitud de las bujías y el porcentaje de CO, así como los niveles de concentración de HC y O₂ en motores de combustión interna. Estas gráficas permiten observar cómo las variaciones en la longitud de las bujías impactan significativamente en las emisiones de estos gases contaminantes, proporcionando información útil para reducir las emisiones de los motores.

En las gráficas 3, 7 y 11 que presentan el resultado del valor de R² y el valor p para el CO, O₂ Y HC, revelan que los valores obtenidos para este estudio son óptimos y ayudan a reforzar la validez de esta investigación y fortalecen los supuestos estadísticos.

5. Bibliografía

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] OMS, *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire. Materia particulada (MP2,5 y MP10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono*, Ginebra, 2021.
- [4] «European Commission and Council of the European Union Commission Regulation (EU),» *EU*, vol. 82, n° 692, p. 1–98, 2016.
- [5] N. INEN, *GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MOVILES TERRESTRES DE GASOLINA*, Quito, 2017.
- [6] 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.
- [7] J. Martínez 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] G. Serpa, X. Zumba, F. Montalvo, D. Baño, J. Martínez y I. Zambrano, *Influencia del tipo de bujía en la evaluación del comportamiento y emisiones en un motor de encendido provocado.*, Enfoque UTE, 2019.
- [12] 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.
- [13] N. Merchán y M. Vinicio, *Análisis de los efectos que se producen al utilizar repuestos genéricos en el sistema de control de emisiones del Chevrolet Sail 1, 4l 2012.*, 2012.
- [14] S. Gallego y J. Felipe, «Diseño e implementación de precalentamiento del combustible mediante los gases de escape para un motor de combustión interna,» *FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA*, 2016.
- [15] R. Japa, J. Maldonado y W. Contreras, «Predicción de emisiones de CO y HC en motores Otto mediante redes neuronales,» 2020.