



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES EMISIONES CONTAMINANTES DE UN MOTOR
DE COMBUSTIÓN INTERNA MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE
LAS BUJÍAS EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN**

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

AUTORES: BRYAN GONZALO AGUIRRE PIRUCH

NIXON MAURICIO CAMPOVERDE RAMÍREZ

TUTOR: ING. RAFAEL WILMER CONTRERAS URGILÉS, MSc.

Cuenca - Ecuador

2024

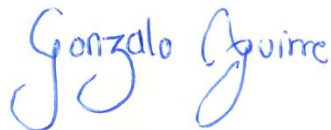
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Bryan Gonzalo Aguirre Piruch con documento de identificación N° 0502869548 y Nixon Mauricio Campoverde Ramírez con documento de identificación N° 1104647449; 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, 9 de enero del 2024

Atentamente,



Bryan Gonzalo Aguirre Piruch

0502869548



Nixon Mauricio Campoverde Ramírez

1104647449

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

Nosotros, Bryan Gonzalo Aguirre Piruch, con documento de identificación N° 0502669548 y Nixon Mauricio Campoverde Ramírez con documento de identificación N° 1104647449, 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 de las principales emisiones contaminantes de un motor de combustión interna mediante la variación de la longitud de las bujías en la cámara de combustión”, 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, 9 de enero del 2024

Atentamente,

Bryan Gonzalo Aguirre Piruch

0502869548

Nixon Mauricio Campoverde Ramírez

1104647449

ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES EMISIONES CONTAMINANTES DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE LAS BUJÍAS EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

ANALYSIS OF THE MAIN POLLUTANT EMISSIONS OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE THROUGH VARYING THE LENGTH OF SPARK PLUGS IN THE COMBUSTION CHAMBER

Bryan Gonzalo Aguirre Piruch¹, Nixon Mauricio Campoverde Ramírez²

Resumen

Este estudio investiga los parámetros de calibración, adelanto de encendido y longitud de las bujías de un motor de combustión interna (MCI), para minimizar los gases contaminantes. Los objetivos implican, evaluar la influencia de la altitud específicamente a una elevación de (2538 msnm), de la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, para medir las emisiones contaminantes al considerar diversas longitudes de bujías y evaluar emisiones como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y óxidos nitrosos (NOx) mediante un analizador de gases. La metodología aplicada incluye un diseño experimental factorial (DOE) con 15 corridas experimentales replicadas para garantizar el registro de los datos obtenidos. Se utilizan dispositivos para la investigación automotriz como: el banco dinamométrico, analizador de gases y escáner automotriz. El análisis estadístico evidencia una correlación entre los parámetros de desempeño del motor y las variables, destacando que el adelanto y la calibración son los factores más influyentes para el CO, y el adelanto de encendido para el HC y NOx. Las condiciones óptimas para minimizar dichas emisiones contaminantes son: adelanto de encendido 14°, longitud de bujía de 23,2 mm y calibración de electrodos de 1,30 mm.

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

Abstract

This study investigates the calibration parameters, ignition advance, and spark plug length of an internal combustion engine (ICM), to minimize pollutant gases. The objectives involve, to evaluate the influence of altitude specifically at an elevation of (2538 msnm), of the city of Cuenca, Azuay province, to measure pollutant emissions by considering different spark plug lengths and to evaluate emissions such as carbon monoxide (CO), unburned hydrocarbons (HC) and nitrous oxides (NOx) by means of a gas analyzer. The methodology applied includes a factorial experimental design (DOE) with 15 replicated experimental runs to ensure the recording of the data obtained. Automotive research devices such as the dynamometric bench, gas analyzer and automotive scanner are used. The statistical analysis shows a correlation between the engine performance parameters and the variables, highlighting that the advance and calibration are the most influential factors for CO, and the ignition advance for HC and NOx. The optimum conditions for minimizing these pollutant emissions are: ignition advance 14°, spark plug length of 23.2 mm and electrode calibration of 1.30 mm.

Keywords: polluting emissions; spark plug length; gas analyzer; dynamometric bench

1. Introducción

Los MCI han mostrado resultados negativos en su desempeño a gran altura tanto en potencia, torque y emisiones contaminantes [1, 2]. Para reducir las emisiones contaminantes, la Organización Mundial de la Salud (OMS), entidad líder en salud pública a nivel mundial, establece directrices internacionales. Dichas directrices buscan minimizar los riesgos de la contaminación atmosférica, la cual tiene impactos negativos en la salud humana [3]. De la misma forma, similares normativas se han implementado en el mundo para ayudar a disminuir los efectos negativos de los MCI, como las normativas EURO. De donde, la edición 4 es la que mejor se adapta a la condición actual de la zona geográfica, donde se ha desarrollado esta investigación. La normativa anteriormente mencionada, establece que los vehículos que equipen inyección electrónica en pruebas dinámicas deben cumplir con valores máximos de emisiones para, NOx de 0.08 gr/km, CO de 1.0 gr/km y HC de 0.10 gr/km [4]. A nivel local, la norma NTE INEN 2204, aplica para fuentes terrestres móviles de más de tres ruedas o sus motores. Esta norma específica los límites máximos en pruebas estáticas, con valores de CO 1% y HC de 200 ppm [5].

La sierra ecuatoriana debido a su topografía montañosa es propensa a esta particularidad [6]. Para evaluar las variaciones negativas en los ambientes de altura en un estudio de Vargas Martínez y Robles [7] recorrieron 5 provincias del Ecuador y se realizaron pruebas estáticas y dinámicas en altitudes desde el nivel del mar hasta 4500 msnm. El resultado es encontrado que el vacío del motor disminuye aproximadamente 7.7 kPa por cada 1.000 de altitud. Esta variación genera una reducción en la potencia y par efectivo del MCI. Otro efecto adverso es el aumento en el consumo específico de combustible, lo que, genera una mayor emisión de CO y HC contaminantes hacia la atmósfera [8].

Igualmente, en la misma línea, la investigación de [8], se analiza las modificaciones en la relación de compresión del motor, la proporción aire/combustible, el avance de la chispa y la duración de la combustión con el

propósito de reducir las emisiones contaminantes. Los resultados indican que los valores óptimos para la reducción de emisión de HC, CO y mejorar la eficiencia en el consumo de combustible del motor se obtienen con una relación aire-combustible de 14:1, un adelanto al encendido de 15° y una relación de compresión (RC) de 9.

Respecto de la optimización de funcionamiento del MCI las investigaciones, [9, 10, 11], destacan las bujías como una variable influyente en dicho proceso. De manera conjunta, los estudios presentados respaldan la relevancia de las bujías en la optimización del desempeño de los MCI y en la disminución de emisiones. Según la investigación llevada a cabo por Serpa y Zumba [9], se evidencia que, al variar el tipo de bujías, es factible mejorar la eficiencia del motor y reducir las emisiones. Su análisis en un motor con cilindrada de 2000 cm³, resalta la eficacia de la bujía NGK BKR5E-11, la cual ha potenciado el rendimiento del motor en un 18%, reducir las emisiones contaminantes en un 2%, optimizar el desempeño de arranque en frío y minimizar el consumo de combustible en un 14,4% [12].

En la continuación de este estudio, se llevó a cabo una investigación en [13], sobre la capacidad de ajuste de los espacios entre electrodos de bujías en diferentes sistemas de encendido [14], con la finalidad de establecer el espacio ideal para las bujías en el motor. Los resultados de los experimentos indican que el sistema de encendido convencional se utilizan bujías con una separación de 0,7 mm debido a su limitada energía de chispa, en contraste, el sistema de encendido de alto rendimiento opera con un espacio de 1,3 mm. Los resultados también revelan que las bujías con una holgura considerable, junto con un sistema de encendido de alto rendimiento, pueden equiparse a la elevada velocidad y relación de compresión del motor. Estas bujías pueden ser beneficiosas para mitigar la detonación no controlada del motor y mejorar su funcionamiento.

En otro estudio acerca de los MCI, se han analizado varios factores para optimizar el desempeño y la eficiencia del motor. La investigación de [10], ha constatado que el aumento de la relación de compresión de 10 a 14

conlleva una disminución en el consumo de combustible. No obstante, este incremento en la relación de compresión también se vincula con un aumento en la incidencia de detonaciones no controladas dentro del motor. A medida que la relación de compresión aumenta, se observa un retraso en la sincronización de la chispa para prevenir dicha detonación, al pasar de 27° a 9° de adelanto al encendido, esto se traduce en la supresión de detonaciones en el sistema de escape.

Otra investigación [11], estudia la influencia de la mezcla aire combustible, la combustión y emisiones contaminantes, con la ubicación de la bujía en la parte central de la cámara de combustión y la ubicación del inyector de combustible a un lado del cilindro. La implementación de esta técnica en el motor ha demostrado ser una opción en términos de rendimiento y reducción de emisiones contaminantes, este avance tecnológico ofrece diversas ventajas notables, como un incremento del desempeño del motor en un 16%.

Los estudios presentados aportan evidencia sólida sobre la importancia de las bujías en la optimización del rendimiento de MCI y la disminución de emisiones contaminantes. No obstante, estas investigaciones tienen una restricción al no examinar la característica geométrica de la bujía, específicamente su longitud y su impacto en las emisiones contaminantes. En respuesta a esta limitación, este estudio aborda este problema y sugiere realizar variación en la longitud de la bujía dentro de la cámara de combustión, además de modificar el adelanto de encendido y la calibración de electrodos [12]. Como una opción viable para mejorar la eficiencia del proceso de combustión y reducir las emisiones de gases contaminantes. En cambio, la relación aire-combustible ideal y la relación de compresión, aunque no se aborda en este trabajo, representan desafíos futuros para el planteamiento mejorado de estudio [12].

2. Materiales y Métodos

En este punto se explicará el proceso metodológico utilizado en la investigación, junto con una descripción de los materiales y equipos utilizados.

2.1. Metodología

Este estudio sigue la metodología planteada en [15], con una actualización mostrada en el flujograma de la Ilustración 1. El flujograma se desarrolla en tres fases, la cuales son: preproceso, proceso y postproceso.

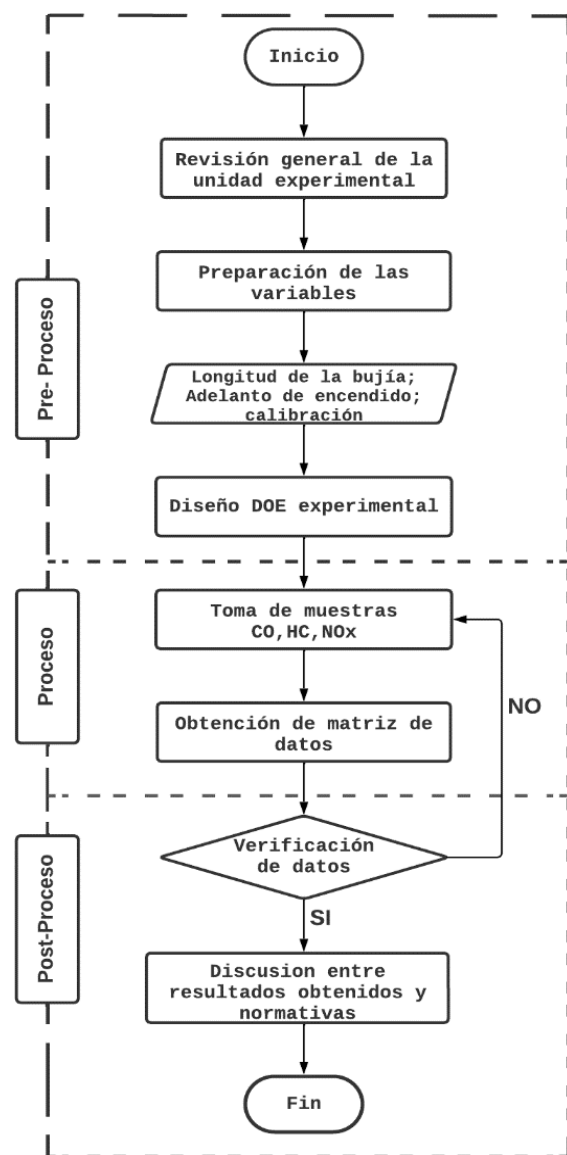


Ilustración 1. Flujograma de metodología aplicada.

En la fase preproceso, se realiza una revisión general de la unidad experimental, lo que

implica, la puesta a punto del motor y mantenimiento general de elementos como: filtros de aire y combustible, bujías, lubricantes y refrigerante. Luego se preparan los factores y niveles que influirán en las emisiones del motor, que son: longitud de bujía con 21, 24 y 27 mm, la calibración de electrodos de la bujía de 0.7, 1.0 y 1.3 mm, como el adelanto de encendido con 0, 7 y 14°.

Al final de la fase del preproceso se realiza el diseño experimental factorial DOE, que cuenta con 3 factores cada uno con 3 niveles. Esto crea una matriz en la que están representadas todas las combinaciones de niveles de factores. El DOE está preparado con 15 ejecuciones de pruebas replicadas, lo que garantiza la coherencia de los datos. El DOE se elabora con 15 corridas experimentales replicadas, con lo cual, se garantiza la consistencia de los datos. El detalle del DOE se explica en la Tabla 2 de la sección 3 del presente documento. Conforme al diseño se identifican las diferentes combinaciones de variables de entrada y su afectación en las respuestas que son: CO, HC y NOx.

Al inicio de la fase del proceso, se determinará el muestreo que se realizará junto con la recolección de datos. Se trata de la realización de experimentos y pruebas planificadas durante la fase DOE. En cuanto a la recogida de datos, se realiza, se realiza con equipos automotrices. Estos equipos se presentan en detalle en la sección 2.2. Los datos recopilados de las pruebas forman una matriz de resultados general. La matriz se verifica para garantizar la precisión y coherencia del análisis. En los casos en que los datos sean atípicos o estén fuera de rango, se repite el proceso.

Respecto de la fase de postproceso, se discuten los resultados en relación con la normativa nacional NTE INEN 2204 y la normativa internacional EURO 4. Estas normas establecen los niveles aceptables de emisiones de contaminantes a vehículos que equipen inyección electrónica. En pruebas dinámicas deben cumplir con valores máximos de emisiones para, NOx de

0.08 gr/km, CO de 1.0 gr/km y HC de 0.10 gr/km [4]. De manera local, la normativa NTE INEN 2204, se ha aplicado para fuentes móviles terrestres con más de tres ruedas o sus motores. Esta norma establece los límites máximos en pruebas estáticas, con valores de CO 1% y HC de 200 ppm [5].

Definida la metodología, a continuación, se proporcionan los detalles sobre los materiales utilizados en la ejecución del trabajo.

2.2. Materiales

la Ilustración 2 muestra los instrumentos y materiales empleados en la investigación automotriz.

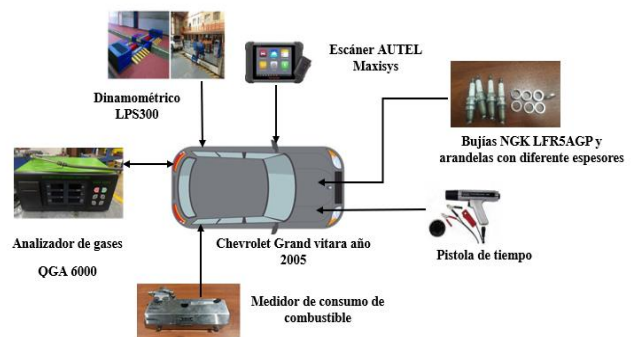


Ilustración 2. Equipos que se utilizaran en la implementación del vehículo.

Con el propósito de proporcionar una descripción detallada de las características de los equipos, se genera la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los equipos automotrices.

Nombre del Equipo	Especificaciones técnicas
Analizador de gases QGA 6000	<ul style="list-style-type: none"> 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

Dinamométrico LPS300	Característica	Rango	Sensibilidad	Unidad
	Potencia	0 – 520	0.1	Kw
	Fuerza Tractora	0 – 12000	1	N
	Monóxido de Carbono	0 – 10	0.01	%
	Dióxido de Carbono	0 – 16	0.1	%
	Oxígeno	0 – 21	0.01	%
	Hidrocarburos no combustiónados	0 – 5000	1	Ppm
	Óxidos Nitrosos	0 – 5000	1	Ppm
	Lambda	0 -2	0.001	-
	Consumo de combustible	0 – 120	0.01	l/h

Escáner AUTEL Maxisys	<ul style="list-style-type: none"> Sistema operativo Android 4.4.2, KitKat Procesador Samsung Exynos T5260 Memoria 2GB RAM y 32 GB ROM Alimentación y Batería se carga con 12 V y batería de 10.000 mAh
Equipo electroboscópico	<ul style="list-style-type: none"> Avance 0-60 grados Dimensiones 8.50 x 34.00 x 24.00 mm Tacómetro 200-10 000 RPM Voltaje 0-16V
Bujías NGK LFR5AGP	<ul style="list-style-type: none"> Bujía de 5/8 (16MM) Diámetro de Hilo Bujía (Mm) 14 Largo de Hilo Bujía (Mm)26.5 Material Electrodo PLATINO
Arandelas	<ul style="list-style-type: none"> Grosor: de 3mm y 6 mm Material: Aluminio
Unidad Experimental	<ul style="list-style-type: none"> Motor con cilindrada: 2000 cm³ Relación de compresión: 9 a 1 Número de cilindros: 4 Número de válvulas: 16 Sistema de inyección electrónica controlado por ECU Caudalímetro de aire de admisión por MAF Sistema de ignición controlado por ECU

datos se organizan de manera estructurada en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables de entradas y salidas obtenidas del DOE.

Orden de Corrida (Nº)	STD Orden (Nº)	Adelanto (º)	Longitud (mm)	Calibración (mm)	CO [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]
1	2	14	21	1,0	0,46	177	1857
2	15	7	24	1,0	0,52	434	2349
3	10	7	27	0,7	0,50	257	2783
4	3	0	27	1,0	0,58	324	2021
5	8	14	24	1,3	0,43	120	636
6	5	0	24	0,7	0,44	342	1972
7	4	14	27	1,0	0,49	150	1477
8	11	7	21	1,3	0,36	189	3876
9	14	7	24	1,0	0,52	434	2349
10	13	7	24	1,0	0,52	434	2349
11	1	0	21	1,0	0,57	214	1026
12	12	7	27	1,3	0,54	362	2318
13	6	14	24	0,7	0,49	198	1754
14	9	7	21	0,7	0,57	372	3285
15	7	0	24	1,3	0,70	176	1682

A continuación, se analiza las principales emisiones contaminantes.

3. Resultados y Discusión.

A continuación, se exhiben en la Tabla 2, los valores correspondientes a las variables de entrada y salida, los cuales fueron obtenidos mediante la aplicación del DOE, realizando un total de 15 ejecuciones. Durante estas ejecuciones, se realizaron ajustes en los parámetros de entrada, incluyendo el adelanto al encendido, la longitud de la bujía dentro de la cámara de combustión y la calibración de la distancia entre los electrodos de la bujía. Estas modificaciones posibilitaron la obtención de los parámetros de salida examinados en este estudio, que son el CO, HC y NOx. Los resultados de los

3.1. Estudio del monóxido de carbono (CO)

A través del empleo de software estadístico, se procede al análisis de residuos del CO, que refleja la calidad del ajuste del modelo. La Ilustración 3 A, evidencia una distribución de residuos uniforme, ya que la mayor parte de los puntos azules se superponen con la línea roja. Esta tendencia indica un ajuste adecuado a la distribución normal. Además el histograma indica un ajuste general positivo del modelo, ya que la densidad de residuos alrededor de cero y la estrechez de los intervalos indican que el

modelo se ajusta de manera precisa, puesto que los residuos se presentan sin variaciones significativas. Con la Ilustración 3 B, de valor ajustado vs residuo, se observa que los puntos se presentan cercanos a cero y están dispersos de manera aleatoria. Esto sugiere una precisión general en las mediciones y corrobora una correcta toma de datos. Para finalizar, la Ilustración 3 D, de orden, se observa que los errores se encuentran de forma aleatoria, esto afirma que el experimento no está influenciado por variables externas.

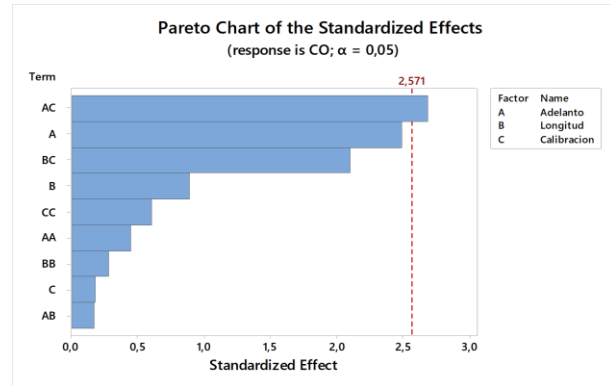


Ilustración 4. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado del Monóxido de carbono (CO).

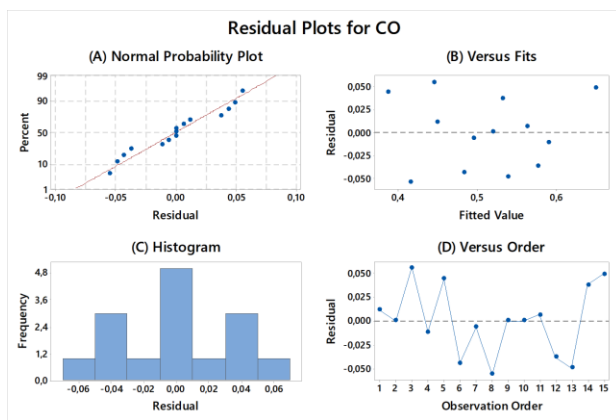


Ilustración 3. Gráficos residuales para el monóxido de carbono (CO).

Con el propósito de identificar la variable más relevante en relación con el CO, se ejecuta un análisis mediante el diagrama de Pareto. En la Ilustración 4, se muestran los valores absolutos de los efectos estandarizados, donde la línea roja, con un valor de 2,571, denota la significancia estadística con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$). Aquellos factores que superen este umbral se considerarán determinantes para el CO. Se destaca que el factor AC, que representa la interacción entre las variables de adelanto en el encendido y la calibración de la bujía, supera este límite, lo que indica que es la combinación más influyente en relación con el CO.

Con el propósito de examinar la influencia de la longitud de la bujía en la variación del porcentaje de CO, se presenta en estudio de los efectos principales asociados a este gas. En la Ilustración 5, se observa que la concentración más baja, alcanza el valor de 0,493 %, que se obtiene con bujías de 21 mm de longitud. Por otro lado, el valor más alto, se registra en 0,53 %, que se presenta al utilizar longitudes de bujía comprendidas entre 26 y 27 mm.

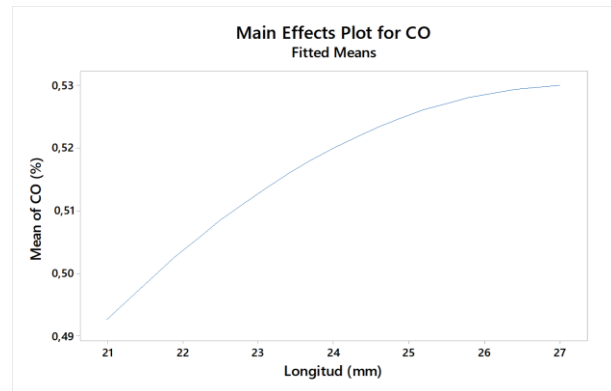


Ilustración 5. Gráfico de efectos principales para el monóxido de carbono (CO).

3.2. Estudio de Hidrocarburos no quemados (HC)

En la Ilustración 6 al observar la relación entre el Residuo y el Porcentaje, se nota que los datos exhiben una tendencia lineal, lo que respalda la suposición de que siguen una distribución normal. Además, al analizar el histograma, se verifica que los resultados se distribuyen de manera normal. Estos resultados

validan la suposición de normalidad en los datos y fortalece la base estadística del análisis en la investigación. En la Ilustración 6 B, de valor ajustado vs residuo, se presentan los valores de forma aleatoria en función del valor ajustado, esto corrobora que los datos fueron tomados correctamente. En la gráfica de Orden de observación vs. Residuo, se observa que los puntos carecen de un patrón específico y están distribuidos de manera aleatoria alrededor de la línea de cero. Esta disposición asegura la independencia de los residuos, con lo que se corrobora la validez del supuesto de independencia entre los resultados.

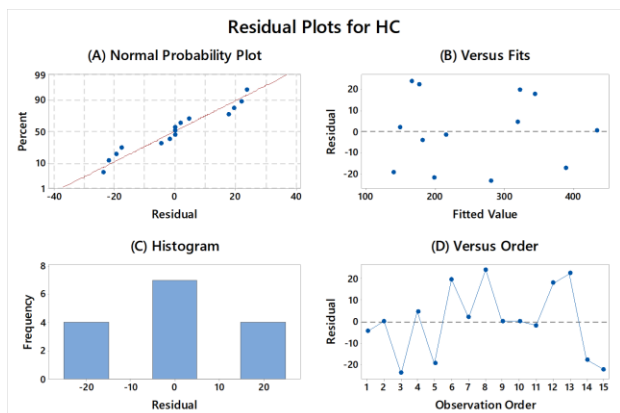


Ilustración 6. Gráficos residuales para los Hidrocarburos no quemados (HC).

Con el objetivo de identificar las variables más influyentes en relación con el HC, se realiza un análisis mediante el diagrama de Pareto. La Ilustración 7 presenta los efectos estandarizados en términos de sus valores absolutos, y la línea roja, con un valor de 2.57, señala la significancia estadística con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$). Los factores que excedan este límite se consideran significativos para el HC. De donde el conjunto formado por los factores e interacción entre ellos es AA, A, BC, CC, BB, C, sobrepasan la línea roja. Lo que muestra que estos factores son significativos para este gas. Destaca el factor adelanto al encendido como el de mayor significancia.

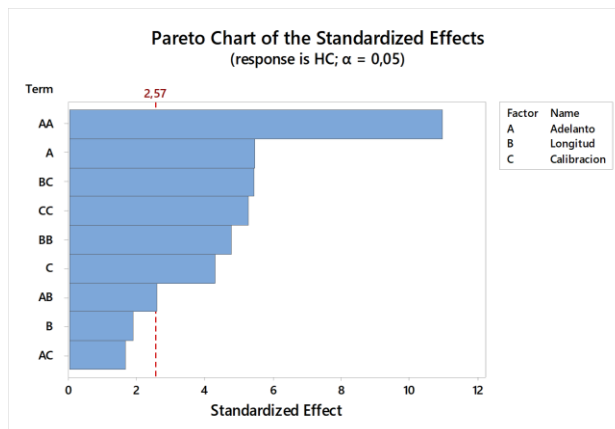


Ilustración 7. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado del (HC).

En la Ilustración 8, se analiza la relación entre la longitud de las bujías y los niveles de concentración de HC en partes por millón (ppm). Esta gráfica destaca los efectos principales asociados al HC. Se evidencia que la concentración más baja, llega a 351 ppm, al emplear bujías con una longitud de 21 mm. Por otro lado, las concentraciones más elevadas, se registran en 435 ppm, con bujías de longitudes entre 24 y 25 mm.

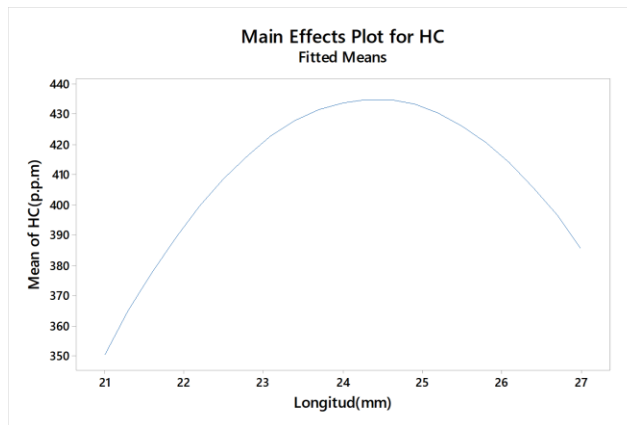


Ilustración 8. Gráfico de efectos principales para los Hidrocarburos no quemados (HC).

3.3 Estudio de los óxidos de nitrógeno (NOx)

En la Ilustración 9, se observa que en la gráfica de Residuos versus Porcentaje de NOx, los puntos coinciden con la línea roja, lo cual confirma la asunción de normalidad. Además, el histograma respalda la normalidad en la

distribución de los resultados. En la Ilustración 9B, que representa el Valor Ajustado versus Residuo, se destaca que los residuos carecen de un patrón discernible y están distribuidos de manera aleatoria respecto al valor ajustado. En la gráfica de Orden de Observación versus Residuo, se nota que los puntos no muestran un patrón específico, sino que están dispuestos aleatoriamente alrededor de la línea cero. Este patrón respalda la independencia de los residuos, validando así la suposición de independencia de los resultados respecto a los errores de muestreo.

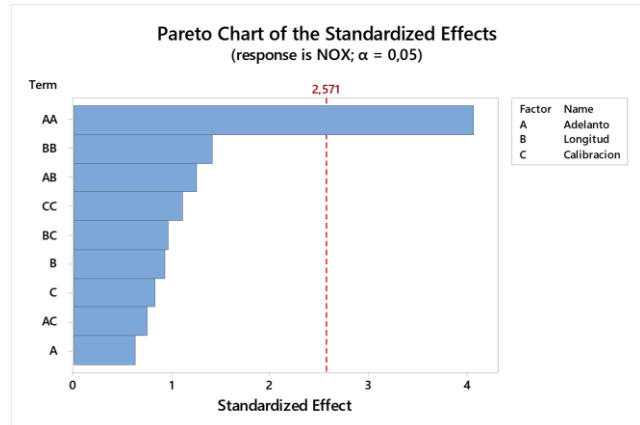


Ilustración 10. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado del (NOx).

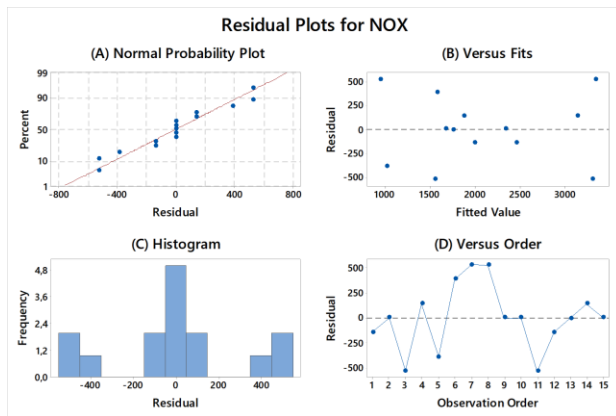


Ilustración 9. Gráficos residuales para el óxido de nitrógeno (NOx).

El diagrama de Pareto presentado en la Ilustración 10, exhibe los valores absolutos de los efectos estandarizados para el NOx, organizados según su nivel de influencia, desde el más significativo hasta el menos significativo. La línea de tendencia, con un valor de 2,57 detona la significancia estadística con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$). Se destaca que la interacción del factor AA, que representa el adelanto de encendido, supera el límite, he indica la combinación más influyente en relación con el NOx.

En la Ilustración 11, se analiza la relación entre la longitud de las bujías y los niveles de concentración de NOx en (ppm). Esta gráfica destaca los efectos principales asociados a dichos compuestos. Se evidencia que las concentraciones más elevadas, con un valor de 2935 ppm, se alcanzan al emplear bujías con una longitud de 21 mm. Por otro lado, las concentraciones más bajas, se registran en 2330 ppm, este valor se obtiene con bujías de 24 y 25 mm.

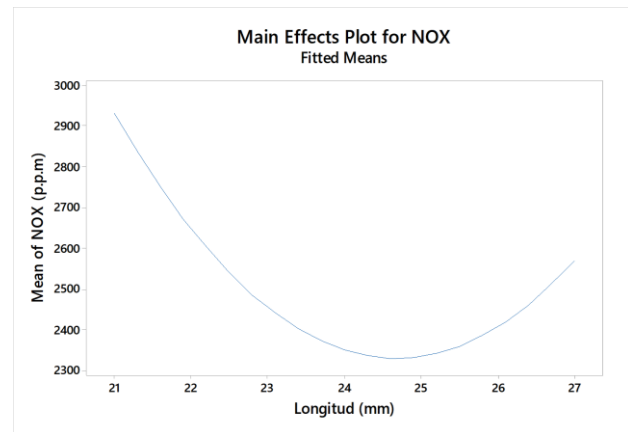


Ilustración 11. Gráfico de efectos principales para el óxido de nitrógeno (NOx).

3.4 Gráficas de comparación de las variables identificadas como óptimas para minimizar el CO, HC y NOx.

En la Ilustración 12 se han identificado los valores óptimos, en el marco de este estudio, para minimizar las emisiones de CO, HC y NOx, que son los siguientes: un adelanto de encendido de 14°, una longitud de bujía de 23.18 mm y una calibración de electrodos de 1.30 mm. Estos parámetros representan la combinación más efectiva para alcanzar los objetivos de reducción de las principales emisiones contaminantes, y sirven como referencia para la optimización de sistemas relacionados con bujías y su calibración.

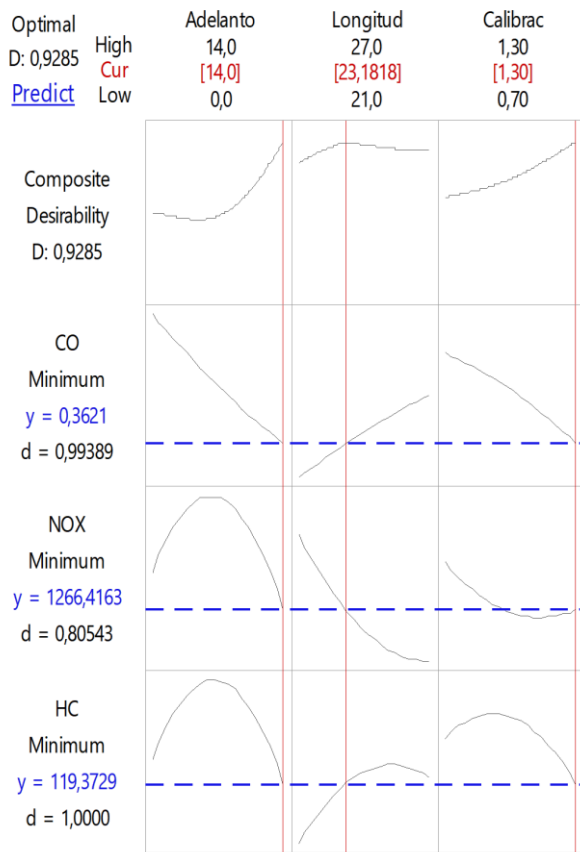


Ilustración 12. Variables identificadas como óptimas para minimizar el CO, HC y NOx.

Con respecto al cumplimiento de los límites establecidos por la EURO 4 y normativa NTE INEN 2204, los resultados de la optimización con un adelanto al encendido de 14°, una longitud de bujía de 23,1818 mm y una

calibración de 1,3, cumple con los estándares de emisiones nacionales para, CO y HC los cuales son:

1. El ajuste de CO de 0,3621% con un rango objetivo de 0,36 a 0,7 % cumple con los requisitos de la normativa.
2. La emisión de HC se encuentra dentro de los límites establecidos, con un registro de 119.4 ppm para una longitud de 23.18 mm. No obstante, al maximizar las variaciones de adelanto y calibración, se observa que la emisión de este gas supera los estándares reglamentarios. Este fenómeno sugiere una correlación directa entre las variaciones en adelanto y calibración con el incremento de las emisiones de HC, lo que indica la necesidad de ajustes específicos para cumplir con las normativas.

4. Conclusiones

Los resultados del DOE han demostrado ser suficientes para determinar la influencia de las variables de Calibración de los electrodos, Adelanto de encendido y Longitud de la bujía en las emisiones contaminantes de un MCI, consolidando así la efectividad de la propuesta metodológica aplicada en esta investigación. Esta metodología se presenta como una alternativa viable para investigaciones experimentales centradas en la minimización de gases contaminantes en MCI, con un número reducido de ejecuciones experimentales (15 corridas), optimizando el tiempo de ejecución y recursos económicos asociados al experimento.

Se ha identificado que un adelanto de encendido de 14°, una longitud de bujía de 23.18 mm y una calibración de electrodos de 1.30 mm, vistos en la Ilustración 12, son los parámetros óptimos para minimizar las emisiones de CO, HC y NOx. Estos parámetros cumplen con los requisitos de emisiones nacionales establecidos por la normativa.

Por medio de los diagramas de Pareto, se han identificado las variables mas influyentes en

las emisiones de CO, HC y NOx. Para el CO de la Ilustración 4, la interacción entre el adelanto al encendido y calibración de la bujía destaca como la más significativa. En el caso del HC, múltiples factores e interacciones mostradas en la Ilustración 7, sobresalen, lo que destaca especialmente el adelanto al encendido como el factor más influyente. Por último, el NOx de la Ilustración 10, la interacción del adelanto de encendido, se presenta como la más influyente.

Las gráficas de los efectos principales de las Ilustración 5,8 y 11 revelan diferentes curvas en relación entre la longitud de las bujías y el porcentaje de CO como los niveles de concentración de HC y NOx en MCI. Estos resultados subrayan la importancia de la longitud de las bujías en la variación de las emisiones.

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, nº 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, nº 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, nº 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] C. G. Jerez Guamán , *Estudio de los Parámetros de Funcionamiento de un Motor Ciclo Otto Mediante la Variación de la Longitud de las Bujías y Adelanto al Encendido*, Cuenca, 2023.
- [13] 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.
- [14] 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 I, 4l 2012.*, 2012.
- [15] 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*, nº 23, pp. 30-39, 2020.