



# POSGRADOS

## MAESTRÍA EN INGENIERÍA AUTOMOTRIZ CON MENCIÓN EN NEGOCIOS AUTOMOTRICES

RPC-SO-42-NO.769-2019

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL

TEMA:

ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE  
FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR  
CICLO OTTO MEDIANTE LA VARIACIÓN  
DE LA LONGITUD DE LAS BUJÍAS Y  
ADELANTO AL ENCENDIDO

AUTOR:

CRISTIAN GEOVANNY JEREZ GUAMÁN

DIRECTOR:

RAFAEL WILMER CONTRERAS URGILES

CUENCA – ECUADOR

2023

**Autor:****Cristian Geovanny Jerez Guamán**

Ingeniero Mecánico Automotriz.

Candidato a Magíster en Ingeniería Automotriz con Mención en Negocios Automotrices por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

[cjerezg@est.ups.edu.ec](mailto:cjerezg@est.ups.edu.ec)

**Dirigido por:****Rafael Wilmer Contreras Urgilés**

Ingeniero Mecánico Automotriz.

Magíster en Sistemas Automotrices.

[rcontreras@ups.edu.ec](mailto:rcontreras@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA - ECUADOR- SUDAMERICA

CRISTIAN GEOVANNY 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

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi madre y hermanos, cuyo inquebrantable apoyo ha sido la brújula que guió mis pasos a lo largo de estos años de estudio y crecimiento. Su constante aliento y amor han sido el motor que impulsa este logro académico. A ustedes les debo la fuerza para superar los desafíos y la alegría de compartir los triunfos. Gracias por ser mi mayor inspiración y sostén incondicional.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Wilmer Contreras por su invaluable contribución a este trabajo. Su apoyo durante la recolección de información fue fundamental para la realización de este proyecto. Además, agradezco sinceramente todas las sugerencias que amablemente compartió a lo largo de este proceso. Su experiencia y orientación fueron pilares esenciales que enriquecieron este trabajo y lo hicieron posible. Estoy profundamente agradecido por su dedicación y generosidad.

ESTUDIO DE LOS  
PARÁMETROS DE  
FUNCIONAMIENTO DE UN  
MOTOR CICLO OTTO  
MEDIANTE LA VARIACIÓN  
DE LA LONGITUD DE LAS  
BUJÍAS Y ADELANTO AL  
ENCENDIDO

AUTOR:

CRISTIAN GEOVANNY JEREZ GUAMÁN

# DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

---

La ciudad de Cuenca, asentada a una altitud notable de 2531 metros sobre el nivel del mar, presenta un entorno con desafíos particulares en el desempeño de los motores atmosféricos. La menor densidad del aire en esta altitud, conlleva un impacto directo en la entrada de oxígeno en la cámara de combustión, lo que genera disminuciones respecto del funcionamiento eficiente del motor de combustión interna (MCI).

Este estudio tiene como objetivo abordar las implicaciones de la altitud en el rendimiento de los MCI, destaca la importancia de considerar factores como el adelanto inadecuado, que puede desencadenar problemas como autoencendido, detonación y pérdida de potencia. La investigación se enfoca en dos aspectos para resolver esta problemática: la elección adecuada de bujías y el ajuste óptimo del encendido.

Para resolver estos problemas, en este trabajo se investiga la elección adecuada de las bujías y el ajuste del encendido óptimo para el funcionamiento del motor. Se comparará el rendimiento de las bujías originales y alternativas y se evalúa, cómo el ajuste del encendido afecta el rendimiento del motor en estas condiciones. Además, se proporcionarán recomendaciones para mejorar el rendimiento del motor y reducir las emisiones de gases contaminantes para esta condición de altura.

Esta investigación, al seleccionar la longitud de las bujías de manera adecuada, busca contribuir a la disminución de las emisiones contaminantes, en conformidad con los objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. En particular, esta investigación contribuye al ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), al buscar formas de mejorar la eficiencia de los MCI en condiciones de alta altitud. Al optimizar el rendimiento de estos motores, se espera una reducción en el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. Estas acciones permiten combatir el cambio climático y mejorar la calidad del aire en la región.

Además, este estudio está alineado con el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), ya que explora nuevas tecnologías y enfoques para abordar los desafíos específicos que enfrentan las comunidades en áreas de gran altitud como el caso de la ciudad de Cuenca. Al mejorar el rendimiento de los motores, se contribuye al desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles en el sector automotriz, lo que a su vez tiene un impacto positivo en la economía local.

# ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR CICLO OTTO MEDIANTE LA LONGITUD DE LAS BUJÍAS Y ADELANTO DE ENCENDIDO

## STUDY OF THE OPERATING PARAMETERS OF AN OTTO CYCLE ENGINE BY MEANS OF SPARK PLUG LENGTH AND IGNITION TIMING

Cristian Geovanny Jerez Guamán<sup>1</sup>, Rafael Wilmer Contreras Urgilés<sup>2</sup>

### Resumen

En la presente investigación se evalúan los parámetros de la longitud de las bujías y el adelanto al encendido de un motor de combustión interna (MCI), para mejorar su rendimiento y reducir las emisiones contaminantes. Los objetivos de estudio incluyen, determinar la influencia de la altitud (2538 msnm), de la provincia del Azuay, con diferentes variaciones en la longitud de la bujía, al considerar las curvas de potencia y torque reales del motor, medidas mediante un banco dinamométrico. La metodología científica emplea un diseño experimental factorial (DOE) con tres combinaciones, tanto de bujías como de adelanto al encendido. El DOE indica, 15 corridas experimentales replicadas, con lo cual se garantiza la consistencia de los datos. Los valores fueron adquiridos con equipos de investigación automotriz como del banco dinamométrico. Elaborada la matriz de datos, se procedió a su análisis estadístico. Del análisis se extrae una relación entre los parámetros de funcionamiento del motor y el cambio de las variables. La relación que mayor influencia presentó, fue la longitud de la bujía con la fuerza tractora en rueda. Las características como, longitud de la bujía de 25.6 mm, y calibración de electrodos de 0.94 mm, demostraron un incremento en 6 % de la fuerza.

**Palabras Clave:** Avance de punto de encendido; consumo específico de combustible; emisiones contaminantes; relación aire/combustible; tipos de bujías.

### Abstract

In the present research, the parameters of spark plug length and ignition timing of an internal combustion engine (ICE) are evaluated to enhance its performance and reduce pollutant emissions. The study objectives include determining the influence of altitude (2538 meters above sea level) in the Azuay province, with different variations in spark plug length, considering the actual power and torque curves of the engine measured using a dynamometer. The scientific methodology employs a factorial experimental design (DOE) with three combinations of both spark plugs and ignition timing. The DOE indicates 15 replicated experimental runs, ensuring data consistency. Values were acquired using automotive research equipment and the dynamometer. Once the data matrix was compiled, statistical analysis was conducted. The analysis reveals a relationship between engine performance parameters and the variation of variables. The most influential relationship identified was between spark plug length and wheel traction force. Characteristics such as a spark plug length of 25.6 mm and electrode calibration of 0.94 mm demonstrated a 6% increase in Force.

**Keywords:** Spark advance, Specific fuel consumption, Pollutant emissions, Air/fuel ratio, Types of spark plugs.

---

<sup>1</sup> Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

# 1. Introducción

Los motores de combustión interna (MCI), han presentado variaciones negativas en su funcionamiento cuando se encuentran en ambientes de altura. La región sierra del Ecuador al encontrarse en una zona montañosa es propensa a esta particularidad. Estudios como el de Vargas Martínez y Robles [1] recorrieron 5 provincias del Ecuador y realizaron pruebas estáticas y dinámicas desde cero hasta 4500 msnm, y encontraron que el vacío del motor disminuye aproximadamente 7.7 kPa, por cada 1000 metros de altura. Esto disminuye tanto la potencia efectiva como el par efectivo del motor, y aumenta el consumo específico de combustible, lo que a su vez incrementa la emisión de gases nocivos para la atmosfera, como hidrocarburos no combustionados (HC) y el monóxido de carbono (CO). Estas emisiones son perjudiciales para el medio ambiente y en especial el ser humano. Con el fin de mitigar estos problemas, se realizó un estudio en Amaya y Torres [2] sobre los cambios en la relación de compresión del motor, la relación aire/combustible, el avance de la chispa y la duración de la combustión para reducir las emisiones contaminantes. Los resultados han demostrado que una relación aire-combustible de 14:1, un adelanto al encendido de  $15^\circ$ , y una relación de compresión (RC) de 9 fueron valores óptimos para reducir los gases contaminantes, como HC, CO y mejorar el consumo de combustible del motor.

Distintas investigaciones se han llevado a cabo para mejorar el rendimiento y reducir la contaminación producida por los motores, donde las bujías toman importancia en este proceso. Según Serpa y Zumba [3], demostraron que, al variar el tipo de bujías, se mejora el rendimiento del motor y reducir las emisiones, en un motor con un cilindraje de  $2000\text{ cm}^3$ , donde destaca la bujía NGK BKR5E-11 que logró aumentar el rendimiento del motor en un 18%, reducir la concentración de gases de efecto invernadero, mejorar el desempeño en frío y reducir el consumo de combustible en un 14,4%. En otro estudio,

realizado por Simsek y Alagoz [4], se utilizó un modelo de aprendizaje de red neuronal artificial para representar el comportamiento del motor. Con lo cual, se logró determinar los estados operativos óptimos del motor y reducir las emisiones contaminantes en un 2%. Además, se ha propuesto un sistema de bujías con doble chispa en Petrescu y Astanei [5], para mejorar la eficiencia y reducir el voltaje necesario para el salto de la chispa que es de unos 3 kV/mm debido a la forma plana de los electrodos. En un estudio comparativo realizado entre las características eléctricas de la bujía de iridio y la bujía estándar en Chimpai y Parnklang [6], se encontró que la primera requiere menos voltaje para producir el salto de la chispa y tiene un tiempo de retardo un 4% menor que la bujía estándar. Por otro lado, en Yufeng y Zongde [7], se estudió la capacidad de ajuste de los espacios de las bujías en diferentes sistemas de encendido para encontrar el espacio óptimo de la bujía en el motor BN492QA. Los experimentos realizados indican que el sistema de encendido tradicional solo aplica bujías con un espacio de 0,7 mm debido a su baja energía de chispa, mientras que el sistema de encendido de alto rendimiento trabaja con un espacio de 1,3 mm.

En el estudio de Chang y Han [8], se analizó la relación entre el radio mínimo del núcleo de la llama y la relación aire-combustible óptima para alcanzar la máxima velocidad de llama turbulenta, lo cual es relevante para mejorar los procesos de combustión en motores de combustión interna. Se ha encontrado que la máxima velocidad de llama turbulenta se logró con una relación aire-combustible cercano a 13:1. Por otro lado, Mello et al. [9], realizaron pruebas experimentales en un motor de combustión interna, y demostraron que la velocidad de propagación de la llama en la cámara de combustión cambia significativamente con la variación de  $\lambda$  y la relación de compresión. Estudio del cuál se ha obtenido que el mejor comportamiento es con una relación de compresión de 12:1 y con un  $\lambda$  entre 0.8-0.9. En otro estudio realizado por Kociszewski [10], presentó un modelado 3D de la combustión en un motor de



sistema de inyección (SI), de bujías múltiples, el cual fue realizado mediante el software de simulación KIVA-3V, que considera la turbulencia y la transferencia de calor en la cámara de combustión. Los resultados de esta investigación demostraron que el ángulo máximo de presión de combustión asciende a  $24^\circ$  y  $15^\circ$  después del punto muerto superior (TDC), para motores con una y dos bujías, respectivamente, y que la combustión de mezcla pobre afecta negativamente la velocidad de combustión y la vida útil del motor.

En diferentes estudios sobre motores de combustión interna, se han evaluado diversos factores para mejorar el rendimiento y la eficiencia del motor. Por ejemplo, Junsun y Yonggyu [11], descubrieron que al aumentar la relación de compresión de 10 a 14 se reduce el consumo de combustible, pero también se produce una detonación del motor. A medida que la relación de compresión aumentaba, la sincronización de la chispa para la supresión de detonación se retrasaba de  $27^\circ$  a  $9^\circ$  de adelanto al encendido, lo que resultaba en la supresión de golpes en el lado del escape y una disminución en el consumo de combustible. Litak et al. [12], por otro lado, estudiaron las variaciones de ciclo a ciclo de la presión máxima de combustión y el ángulo de encendido en un motor de gasolina con diferentes ángulos de avance de la chispa y encontraron que las condiciones óptimas de combustión eran con el ángulo de avance de la chispa a  $15^\circ$ .

Otros estudios se han centrado en analizar distintos aspectos del desempeño de motores térmicos mediante modificaciones en su combustible. Rocha et al. [13], evaluaron el desempeño de un Volkswagen 1800  $cm^3$  con aditivos organometálicos y combustible de 87 octanos en condiciones de alturas elevadas, donde se ha obtenido una reducción del 59% en la emisión de CO en la condición de ralentí. Por otro lado, Assad et al. [14], investigaron la combustión de mezclas hidrogenadas y encontraron que el uso de mezclas enriquecidas con hidrógeno aumentó significativamente la propagación de la llama. Por último, Zheng et al. [15], estudiaron las

correlaciones de la corriente de iones y la presión del cilindro en condiciones de encendido por chispa con nitrógeno enriquecido, que obtiene resultados que indican que la presión máxima del cilindro y la presión efectiva media indicada disminuyen con los aumentos de apertura del acelerador.

En conjunto, los estudios presentados demuestran que las bujías y el ángulo de inicio de la chispa son importantes para optimizar el rendimiento del motor y reducir emisiones contaminantes en motores de combustión interna. Además, buscan mejorar los procesos de combustión y contribuir al desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles en el sector automotriz. Sin embargo, estas investigaciones presentan una limitación, al no analizar la característica geométrica de la bujía, respecto de su longitud e influencia en las emisiones contaminantes. En respuesta a esta limitación, el presente estudio aborda esta problemática y propone realizar variaciones en la longitud de la bujía dentro de la cámara de combustión en un motor atmosférico con un cilindraje de 2000  $cm^3$ , como una posible estrategia para mejorar la eficiencia de la combustión y reducir las emisiones contaminantes. Por otro lado, la relación aire-combustible óptima y la relación de compresión, aunque fuera del alcance de este trabajo, constituyen un reto futuro para el planteamiento mejorado del estudio.

## 2. Materiales y métodos

En esta sección, se proporcionará una explicación detallada del proceso metodológico utilizado en la investigación, junto con una descripción de los materiales y herramientas que se emplearon.

### 2.1. Metodología

Este estudio sigue la metodología mostrada en el flujograma de la

Ilustración 1. El flujograma se desarrolla en tres fases que son: preproceso, proceso y postproceso.

En la primera fase se realiza una revisión general de la unidad experimental de estudio, lo que implica, la puesta a punto del motor y mantenimiento general de elementos como: filtros de aire y combustible, bujías, lubricantes y refrigerante. Se preparan las variables de longitud y calibración de electrodos de la bujía como del adelanto de encendido. También, se realiza el diseño experimental DOE que consiste en realizar una secuencia de ejecuciones o pruebas, durante las cuales se introducen cambios simultáneos en las variables de entrada, para luego observar las respuestas resultantes, el cual es factorial y cuenta con 3 niveles. Los niveles se refieren tanto a la longitud de las bujías como del adelanto al encendido. El DOE indica, 15 corridas experimentales replicadas, con lo cual se garantiza la consistencia de los datos.

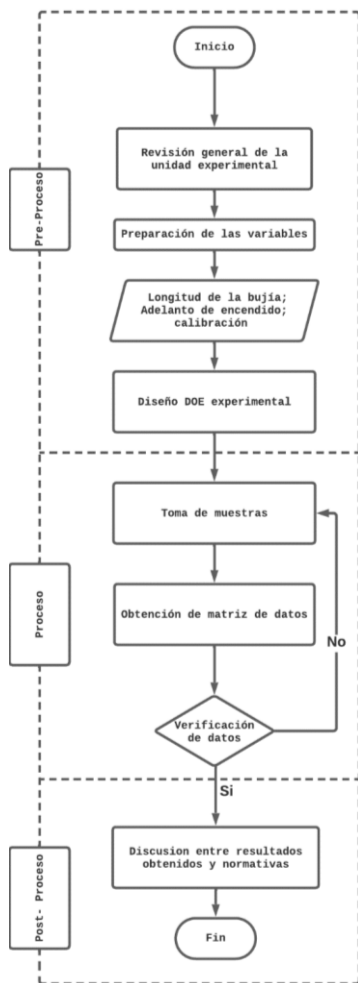


Ilustración 1. Flujo de metodología aplicada.

La fase del proceso, consta de la toma de muestras que se lleva a cabo con la recolección de datos. Esto implica realizar los experimentos y pruebas planificadas en la fase del DOE. Referente a la obtención de los datos, se realiza con equipos de investigación automotriz. Estos equipos se detallan en la sección 2.2. Los datos recopilados de las pruebas, forman una matriz general de resultados. La matriz es verificada para garantizar su precisión y consistencia de análisis. En el caso de existir datos atípicos o fuera de rango, se repite el proceso.

Respecto de la fase de postproceso, los resultados de las pruebas experimentales, se discuten en relación con las normativas estatales aplicables y las metas de la investigación. Esto implica comparar los resultados con estándares de emisiones o rendimiento previamente establecidos.

Definida la metodología, a continuación, se describen los materiales para el desarrollo del trabajo.

## 2.2. Materiales

Los equipos y materiales de investigación automotriz, se presentan en la Ilustración 2, también, se incluye una breve descripción de los materiales empleados en este estudio.

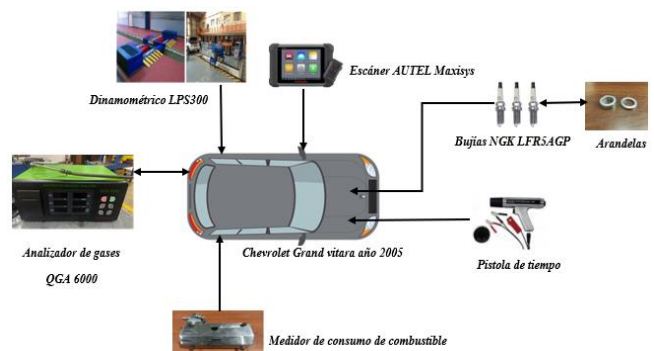


Ilustración 2 Equipos que se utilizarán en la experimentación del vehículo.

Con el fin de presentar el detalle de las características de los equipos se elabora la Tabla 1.

Tabla 1: Especificaciones técnicas de los equipos.

Nombre del Equipo	Especificaciones técnicas																																								
<b>Analizador de gases QGA 6000</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medición de (CO, HC, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, λ, NOX opcional)</li> <li>Respuesta en menos de 10 Segundos</li> <li>Bomba trabajo pesado y larga duración con bajo consumo energía</li> <li>Regulación de la temperatura automática (2-8 min)</li> <li>Tiempo calentamiento aproximado 2~8 min.</li> <li>Alimentación 220V o 110V CA ±10% 50 o 60 Hz</li> </ul>																																								
<b>AIC 5008 master de flujo de combustible</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medidor de flujo continuo</li> <li>Trabaja con presiones de -1 a 5 bar</li> <li>Temperatura de trabajo entre los -30°C a 90°C</li> <li>Tiene una protección IP67</li> <li>Se alimenta con voltajes de 8 - 25 VDC</li> <li>Señal de pulso rectángulo NPN.</li> <li>Accesorio de banco dinamométrico Maha LPS300</li> </ul>																																								
<b>Dinamométrico LPS300</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Característica</th> <th>Rango</th> <th>Sensibilidad</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Potencia</td> <td>0 – 520</td> <td>0.1</td> <td>KW</td> </tr> <tr> <td>Fuerza Tractora</td> <td>0 – 12000</td> <td>1</td> <td>N</td> </tr> <tr> <td>Monóxido de Carbono</td> <td>0 – 10</td> <td>0.01</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>Dióxido de Carbono</td> <td>0 – 16</td> <td>0.1</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>Oxígeno</td> <td>0 – 21</td> <td>0.01</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>Hidrocarburos no combustiónados</td> <td>0 – 5000</td> <td>1</td> <td>Ppm</td> </tr> <tr> <td>Óxidos Nitrosos</td> <td>0 – 5000</td> <td>1</td> <td>Ppm</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>0 -2</td> <td>0.001</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Consumo de combustible</td> <td>0 – 120</td> <td>0.01</td> <td>l/h</td> </tr> </tbody> </table>	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
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																																						
<b>Escáner AUTEL Maxisys</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sistema operativo Android 4.4.2, KitKat</li> <li>Procesador Samsung Exynos T5260</li> <li>Memoria 2GB RAM y 32 GB ROM</li> <li>Alimentación y Batería se carga con 12 V y batería de 10.000 mAh</li> </ul>																																								
<b>Equipo electroboscópico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Avance 0-60 grados</li> <li>Dimensiones 8.50 x 34.00 x 24.00 mm</li> <li>Tacómetro 200-10 000 RPM</li> <li>Voltaje 0-16V</li> </ul>																																								
<b>Bujías NGK LFR5AGP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bujía de 5/8 (16MM)</li> <li>Diámetro de Hilo Bujía (Mm) 14</li> <li>Largo de Hilo Bujía (Mm)26.5</li> <li>Material Electrodo PLATINO</li> </ul>																																								
<b>Arandelas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grosor: de 3mm y 6 mm</li> <li>Material: Aluminio</li> </ul>																																								
<b>Unidad Experimental</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Motor con cilindrada: 2000 cm<sup>3</sup></li> <li>Relación de compresión: 9 a 1</li> <li>Número de cilindros: 4</li> <li>Número de válvulas: 16</li> <li>Sistema de inyección electrónica controlado por ECU</li> <li>Caudalímetro de aire de admisión por MAF</li> <li>Sistema de ignición controlado por ECU</li> </ul>																																								

### 3. Resultados y discusión

A continuación, se presenta en la Tabla 2, los valores de las variables de entradas y salidas, obtenidas de la aplicación del DOE, con total de 15 corridas. Durante estas corridas, se llevaron a cabo variaciones en los parámetros de entrada, que comprenden 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 variaciones permitieron la obtención de los parámetros de salida que son objeto de estudio en este trabajo, a saber, la fuerza tractora en rueda, la potencia del motor y el consumo medio de combustible. Los datos resultantes se presentan de manera estructurada en la Tabla 2, a continuación.

Tabla 2: Entradas y salidas obtenidas

Orden de Corrida (N <sup>o</sup> )	Adelanto (°)	Longitud (mm)	Calibración (mm)	Fuerza [N]	Potencia [KW]	Consumo medio [l/100Km]
1	14	21	1,0	1211,0	21,2	22,355
2	7	24	1,0	1317,0	21,7	19,660
3	7	27	0,7	1296,0	21,5	39,899
4	0	27	1,0	1291,7	21,7	19,810
5	14	24	1,3	1179,0	19,6	42,173
6	0	24	0,7	1253,0	20,9	18,047
7	14	27	1,0	1281,0	21,3	19,008
8	7	21	1,3	1167,0	21,4	34,607
9	7	24	1,0	1319,0	21,8	19,680
10	7	24	1,0	1319,2	21,7	19,661
11	0	21	1,0	1171,0	20,5	18,820
12	7	27	1,3	1243,0	21,0	20,902
13	14	24	0,7	1237,0	21,0	18,996
14	7	21	0,7	1255,0	21,5	25,379
15	0	24	1,3	1267,0	22,9	13,295

A continuación se procede al estudio de cada variable de salida.

### 3.1. Estudio de Fuerza Tractora

Para validar la muestra obtenida, se procede a realizar el análisis de los residuos, que es la diferencia entre el valor estimado sobre el medido. La Ilustración 3, presenta el histograma de la distribución de los residuos y se observa que los errores estén bajo la curva de normalidad. En la gráfica de probabilidad normal, se observa que la distribución de errores es uniforme, ya que la mayoría de los puntos azules coinciden con la línea roja. En la gráfica de residuos versus el valor ajustado los datos no muestran patrones y están dispersos de manera aleatoria lo que significa que las mediciones fueron tomadas correctamente. Finalmente, en la gráfica de orden, se garantiza que los errores son aleatorios y el experimento no depende de terceras variables.

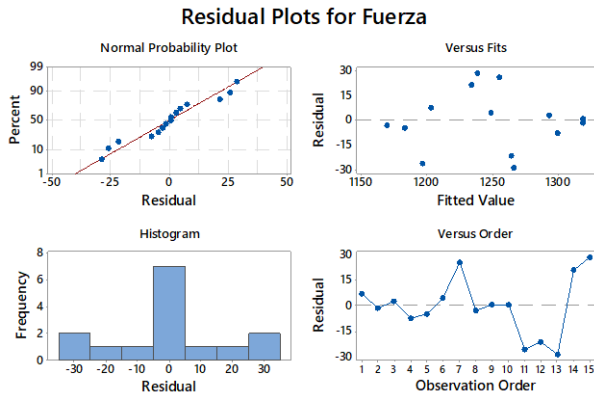


Ilustración 3 Gráficos residuales para la Fuerza Tractora.

Con el fin de analizar la correlación entre variables, se realiza la Ilustración 4. En esta gráfica, se presenta la variable de longitud versus fuerza con una correlación lineal (línea roja). Se observa que su comportamiento es directamente proporcional. Este es un efecto coherente y esperado, ya que es producto de un ligero aumento en la relación de compresión, dado por el ingreso de la bujía en la cámara de compresión.

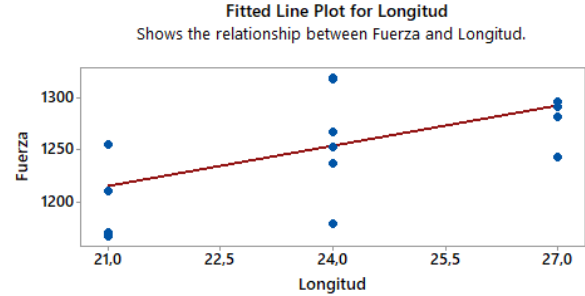


Ilustración 4 Regresión múltiple para Fuerza Tractora, a través del informe de construcción de modelos.

Además, el estudio de regresión múltiple para la fuerza, que se muestra en la Ilustración 5, corrobora que la variable de longitud, es la más representativa. La relación entre la fuerza y variables de: adelanto al encendido, longitud y calibración de electrodos, en el modelo es estadísticamente significativa con un ( $p=0.033$ ).

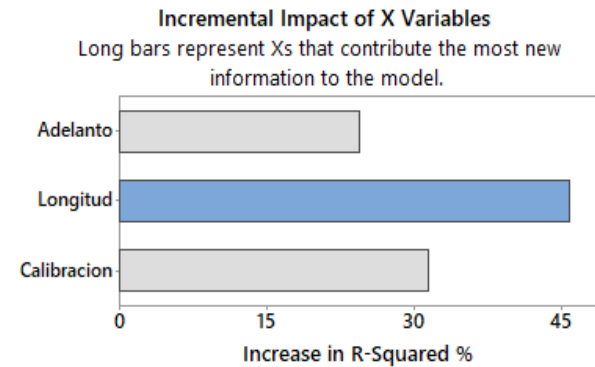
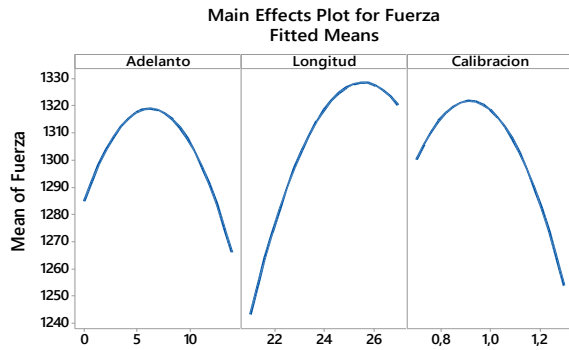


Ilustración 5 Importancia de variables para estudio de la Fuerza Tractora.

Del estudio estadístico resulta que el 30.45 % de la variación en la fuerza se explica por la expresión 1.

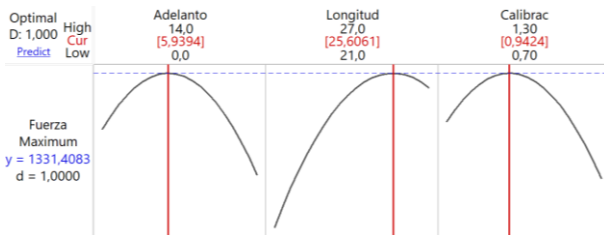
$$\text{Fuerza [N]} = 1033 - 1,33 \cdot \text{Adelanto} + 12,82 \cdot \text{Longitud} - 77,1 \cdot \text{Calibracion} \quad (1)$$

Las gráficas de efectos principales como de maximización, vistas en la Ilustración 6 e Ilustración 7, respectivamente, muestran de manera individual, como el adelanto, la longitud de la bujía y la calibración de los electrodos, influyen sobre la fuerza.



**Ilustración 6** Gráficos de efectos principales para Fuerza Tractora. Medias ajustadas.

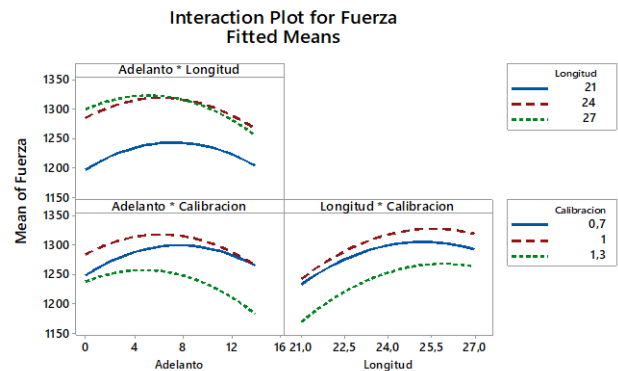
Destacan en la Ilustración 7, los puntos de maximización, correspondientes a cada variable, respecto de la mayor fuerza. Los mejores valores obtenidos para maximizar la fuerza son: adelanto de 5.9°, longitud de la bujía de 25.6 mm y calibración de electrodos de 0.94 mm.



**Ilustración 7** Variables de Fuerza Tractora máxima según las variables de: adelanto, longitud y calibración.

Además de obtener el mejor punto de funcionamiento para la fuerza, la Ilustración 8 presenta, las gráficas de interacción para esta resultante. La interacción de cada variable, proporciona una visión detallada de su comportamiento, cuando se modifican simultáneamente. Se observa que la longitud de la bujía, al variarla de 24 a 27 mm, ejerce una influencia significativamente mayor sobre la fuerza en comparación con una bujía de longitud estándar de 21 mm. Además, se destaca que una calibración de bujía de 1 mm muestra una mayor afectación en la fuerza en comparación con calibraciones de 0.7 mm o 1.3 mm. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar las interacciones entre las variables en el análisis de la fuerza, lo que demuestra la implicación significativa en la

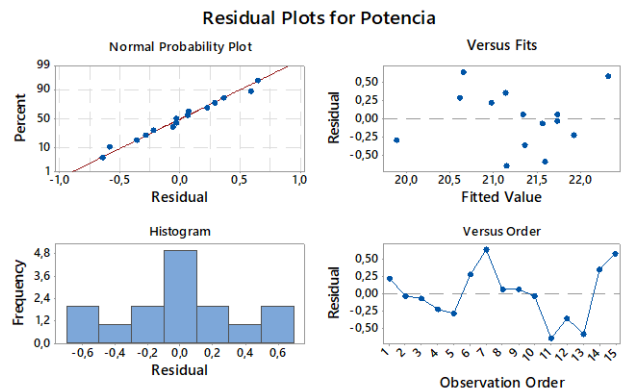
optimización de los sistemas relacionados con las bujías.



**Ilustración 8** Gráficos de interacción de variables, para Fuerza Tractora.

### 3.2. Estudio de Potencia

Para validar la representatividad de la muestra adquirida respecto de la potencia, se lleva a cabo un análisis de residuos. La visualización del histograma de la Ilustración 9, revela la distribución de estos residuos, y se verifica que los errores se encuentren bajo la campana de Gauss. En la gráfica de probabilidad normal, la mayoría de los puntos azules se sitúan sobre la línea roja, lo que demuestra la distribución normal del error, lo que asegura que los errores son aleatorios y no están vinculados a diversas variables.



**Ilustración 9** Gráficos de residuos para la potencia.

En la Ilustración 10, la representación gráfica de los residuos en función del valor ajustado, no se observan patrones discernibles, y los datos están

dispersos de manera aparentemente aleatoria. Esta ausencia de patrones indica que las mediciones fueron realizadas de manera precisa. En términos de contribución al modelo, las barras más extensas, vistas en la Ilustración 10, señalan las variables que aportan significativamente información al modelo. En este caso, la calibración de la bujía y el adelanto al encendido, se destacan como las más influyentes, en relación con la potencia.

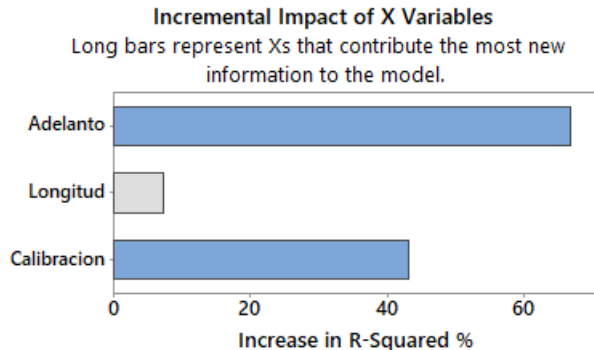


Ilustración 10 Impacto incremental de las variables para estudio de potencia.

La significancia estadística de la relación entre la potencia y las variables (adelanto al encendido, longitud y calibración de bujía) en el modelo se evidencia mediante un valor de p igual a 0.030. En este contexto específico, el p-valúe es menor al nivel de significancia, lo que resulta en la aceptación de la hipótesis alternativa, con un nivel de confianza del 95%. Además, el 54.31 % de la variación en la potencia, se explica mediante la expresión 2.

$$\text{Potencia [KW]} = 20,78 - 0,0518 \cdot \text{Adelanto} + 0,0375 \cdot \text{Longitud} - 0,00001 \cdot \text{Calibración} \quad (2)$$

La Ilustración 11, presenta las gráficas de efectos principales, sea del adelanto, la longitud de la bujía o la calibración de los electrodos, y su afectación a la potencia.

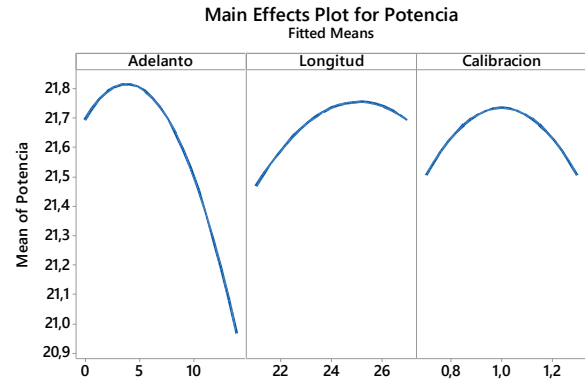


Ilustración 11 Diagrama de efectos principales de potencia.

Respecto de la interacción de variables, en la Ilustración 12, se exhibe el comportamiento de un efecto cruzado, que difiere de las conmutaciones individuales de las variables. En esta instancia, se observa que el adelanto y la calibración de los electrodos, presentan un efecto cruzado más pronunciado, esto implica que al incrementar ambas variables, se genera una disminución en la potencia. En consecuencia, se recomienda mantener el adelanto al mínimo e incrementar la longitud de la bujía al máximo para lograr la máxima potencia.

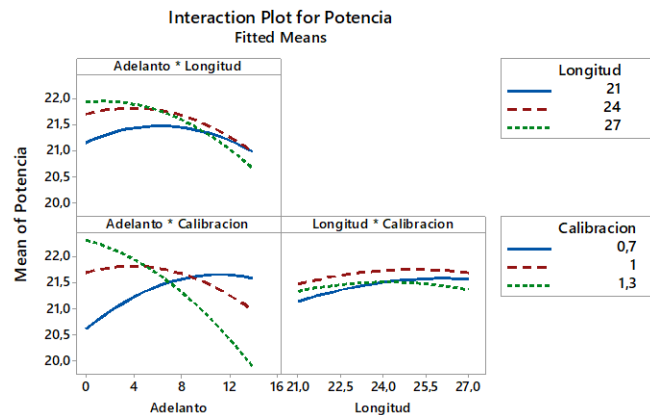
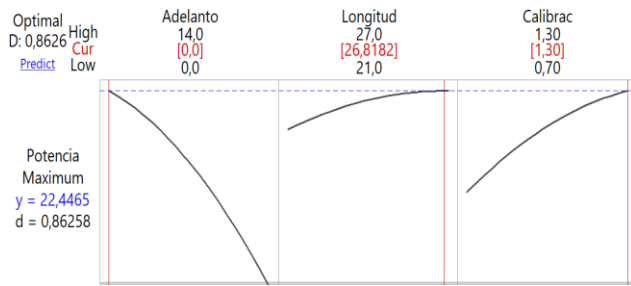


Ilustración 12. Gráficos de interacción para Potencia.

Se observa en la Ilustración 13, que las variables obtenidas para maximizar la potencia resultan de: un adelanto nulo al encendido, la longitud de la bujía de 26.8 mm y la calibración de electrodos de 1.3 mm.

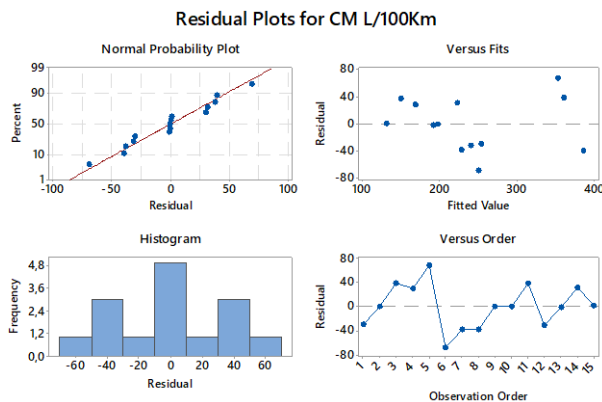


**Ilustración 13.** Gráficos sobre las variables obtenidas para maximizar la Potencia.

Estos resultados subrayan la importancia de abordar las interacciones entre las variables en el análisis de la potencia, lo que demuestra su implicación significativa en la optimización de los sistemas relacionados con las bujías.

### 3.3. Estudio de Consumo medio de combustible

Similar a los estudios de la fuerza y la potencia, en la Ilustración 14, el análisis de residuos del consumo de combustible, tiene una distribución y probabilidad normal. Este patrón se refleja también en el valor ajustado, sin mostrar indicios de patrones, asimismo, en la sección del histograma, se observa que tiene una forma característica de campana de gauss.



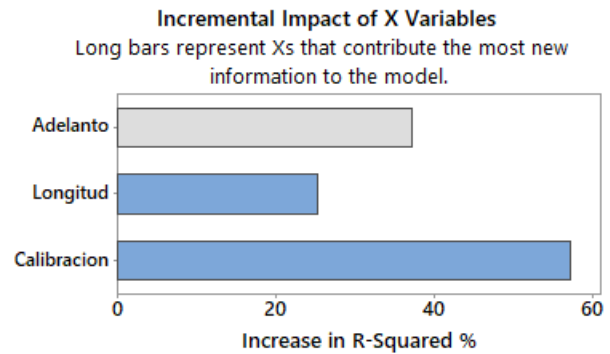
**Ilustración 14.** Gráficos residual por CM L/100 km.

La relación entre el consumo medio y las variables de adelanto al encendido, longitud y calibración de bujía, presenta una significancia estadística, con un p-valor de 0.44. Además, la expresión 3, revela que el 20.75% de la variabilidad

en el consumo medio de combustible es explicado por estas variables.

$$\text{Consumo medio}[l/100Km] = 174 + 5,81 \cdot \text{Adelanto} - 0,6 \cdot \text{Longitud} + 36 \cdot \text{Calibración} \quad (3)$$

Las barras extensas, vistas en la Ilustración 15, indican las variables que contribuyen de manera más significativa al modelo, como es el caso de la calibración de la bujía, que tiene una mayor influencia.



**Ilustración 15.** Gráfico de impacto incremental de las variables para consumo de combustible.

Del estudio de las gráficas de efectos principales, mostrado en la Ilustración 16, se indican la afectación del consumo medio de combustible, cuando se modifica cada variable, se revela el impacto en el consumo medio de combustible al variar cada variable. En particular, se observa que un aumento en el adelanto al encendido conlleva a un incremento en el consumo. En el caso de la variación en la longitud y calibración de la bujía, se observa un patrón en forma de campana invertida, donde los puntos centrales corresponden a los niveles que resultan en el menor consumo de combustible.

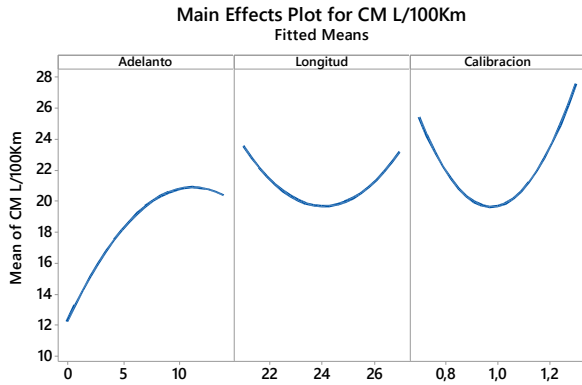


Ilustración 16. Gráfico de efectos principales para CM L/100 Km.

En la Ilustración 17, se muestra un comportamiento específico de efecto cruzado en relación con la interacción de variables, el cual se distingue de las variaciones individuales de dichas variables. En esta representación visual, se evidencia de manera destacada el impacto de la calibración de los electrodos.

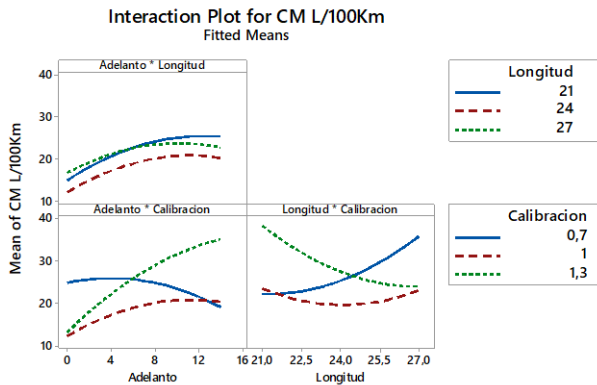


Ilustración 17. Gráficos de interacción para CM L/100 Km.

Resultado de las variables analizadas y vistas en la Ilustración 18, para minimizar el consumo medio de combustible, se obtiene con: nulo adelanto de encendido, longitud de la bujía de 25.7 mm y calibración de electrodos de 1.22 mm.

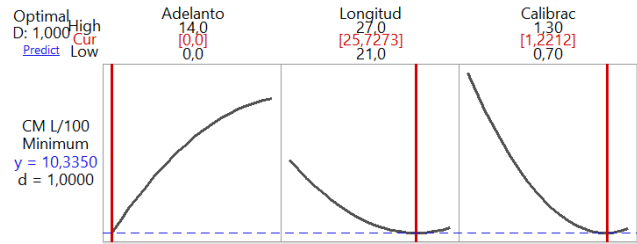


Ilustración 18. Gráficos sobre las variables obtenidas para minimizar CM L/100.

### 3.4. Optimización general

La Ilustración 19 presenta, las variables identificadas como óptimas para maximizar la fuerza, la potencia y minimizar el consumo medio de combustible en el contexto de este estudio son las siguientes: un valor de Adelanto de 1.2 °, una longitud de la bujía de 25.9 mm, y una calibración de electrodos de 1.13 mm. Estos parámetros representan la combinación que mejor cumple con los objetivos de rendimiento y eficiencia en el sistema analizado, y pueden servir como guía para la optimización y mejora de sistemas relacionados con bujías y su calibración en aplicaciones similares.

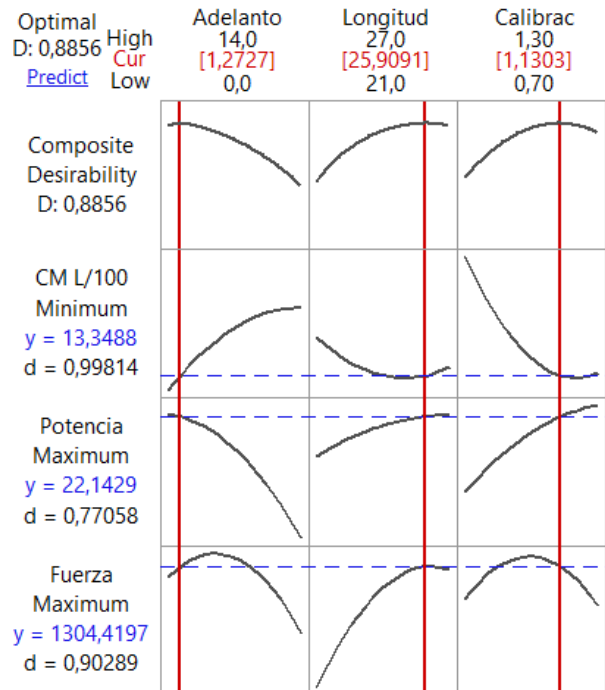


Ilustración 19. Gráficas de comparación de las variables identificadas como óptimas para maximizar la Fuerza, la Potencia y minimizar el Consumo medio de combustible.



## 4. Conclusiones

La culminación del diseño experimental (DOE), que involucra quince ejecuciones con ajustes en los parámetros de Adelanto, Longitud de la bujía y Calibración de los electrodos, destaca la obtención de datos críticos esenciales de análisis. Esta propuesta metodológica se presenta como una opción viable para la investigación experimental de potencia, fuerza y consumo de combustible en motores de combustión interna.

La validación de la muestra a través del análisis de residuos confirma la aleatoriedad de los errores y su independencia, que confirma la validez de las variables seleccionadas.

La longitud de la bujía destaca como la variable más influyente, que es concluyente para la fuerza. Las variables óptimas para maximizar la fuerza son Adelanto: 5.9°, longitud de la bujía: 25.6 mm, y calibración de electrodos: 0.94 mm. La marcada influencia de la longitud de la bujía y la calibración, sugiere que la optimización de estos factores tiene impactos significativos en la eficiencia y rendimiento de los motores con el incremento de 6 % de la fuerza.

La optimización del rendimiento del motor destaca la calibración de la bujía y el adelanto como las variables más influyentes en la potencia. Las condiciones ideales para maximizar la potencia son: adelanto: 0°, longitud de la bujía: 26.8 mm, y calibración de electrodos: 1.3 mm.

Se concluye que, mediante la implementación de un diseño de experimento (DOE), se ha verificado el objetivo de reducir el consumo de combustible en el motor de combustión interna ciclo Otto. Este objetivo se alcanzó al incrementar la longitud de la bujía, a 25.7 mm según análisis estadístico, en beneficio de la eficiencia energética dentro del alcance de este proyecto.

## 5. Bibliografía

- [1] J. E. Martínez Coral y L. F. Robles Morillo, *Estudio del comportamiento de las variables de un motor de inyección electrónica respecto a la altura sobre el nivel del mar*, Quito, 2010.
- [2] A. F. Duque Amaya, A. G. Díaz Torres y D. A. Acosta, «Control of emissions in an internal combustion engine: first approach for sustainable design,» *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 10, pp. 275-289, 2016.
- [3] G. F. Serpa Andrade y X. A. Zumba Tenezaca, *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.
- [4] B. B. Alagoz y O. I. Simsek, «A Computational Intelligent Analysis Scheme for Optimal Engine Behavior by Using Artificial Neural Network Learning Models and Harris Hawk Optimization,» in *2021 International Conference on information Technology*, pp. 361-365, 2021.
- [5] B. H. M. Hnatiuc y C. P. D. Astanei, «Ignition Modelling of a Double Sparking Plug for Internal Combustion Engines,» *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, pp. 226-230, 2014.
- [6] N. Chimpai y J. Parnklang, «The Electrical Effects of Iridium and Standard Spark Plug for Simple Spark Ignition Engine,» *International Conference on Control and Robotics Engineering*, vol. 3, pp. 70-73, 2018.

- [7] G. Yufeng y F. Zongde , «Experimental Study on Different Ignition System Matching Different Spark Plug Gap,» *International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing*, pp. 305-308, 2009.
- [8] Y. C. a. S. Han, «Characteristics of flame kernel radius in a spark ignition engine according to the electric spark ignition energy,» *International Journal of Automotive Technology*, vol. 15, n° 5, p. 715–722, 2014.
- [9] R. Cataluña, P. Mello, F. Wildner, G. Souza de Andrade y R. da Silva, «Combustion time of the oxygenated and non-oxygenated fuels in an Otto cycle engine,» *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 36, p. 403–410, 2014.
- [10] A. Kociszewski, «Three-dimensional modelling and experiment on combustion in multipoint spark ignition engine,» *International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design*, vol. 5, pp. 20-23, 2009.
- [11] J. Lee, Y. Lee, J. Kim, S. Oh, J Lee, J. Jung and J. Cha, «Effects of engine cooling strategy on knock suppression in high-compression ration spark-ignition engine,» *International Journal Of Automotive Technology*, vol. 23, n° 2, pp. 367-378, 2022.
- [12] G. Litak, T. Kaminski, J. Czarnigowski, A. K. Sen y M. Wendeker, «Combustion process in a spark ignition engine: analysis of cyclic peak pressure and peak pressure angle oscillations,» *Springer Science+Business Media B.V*, vol. 44, pp. 1-11, 2008.
- [13] J. C. Rocha-Hoyos, L. E. Tipanluisa, V. D. Zambrano y Á. A. Portilla, «Estudio de un Motor a Gasolina en Condiciones de Altura con Mezclas de Aditivo Orgánico en el Combustible,» *SciELO Chile* , vol. 29, n° 5, pp. 325-334, 2018.
- [14] M. S. Assad, V. V. Leshchevich, V. N. Mironov, O. G. Penyazkov, K. L. Sevruk y A. V. Skilond, «Burning of hydrogenous mixtures in the model of an internal-combustion-engine chamber,» *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 82, n° 6, p. 1031–1045, 2009.
- [15] S. Zheng, X. Zhang y . Z. Shen, «Study on Cycle-by-Cycle Variations of Ion Current Integral and Pressure in Spark Ignition Engine,» *International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, pp. 3404 - 3407 , 2011.

## Anexos

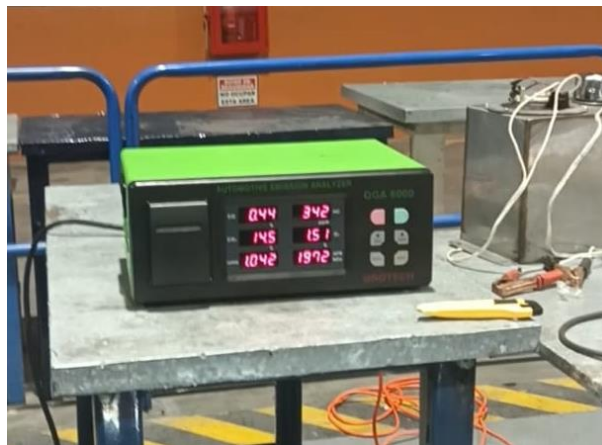


Ilustración 20. Toma de datos con el Analizador de gases.



*Ilustración 21. Datos obtenidos del Banco dinámico.*



*Ilustración 22. Alzas o arandelas de distintas medidas utilizadas (3mm y 6mm) en las bujías.*



*Ilustración 24. Bujías utilizadas con sus alzas.*



*Ilustración 23. AIC 5008 master de flujo de combustible.*



*Ilustración 25. Sonda para medir la temperatura del aceite del motor.*