



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**ANÁLISIS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UN MOTOR A GASOLINA DE 2.0
LITROS EN CONDICIÓN DE ARRANQUE EN FRÍO**

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

AUTORES: MIGUEL ANGEL MONTALVÁN MOROCHO
PAUL SEBASTIÁN MALLA QUITUIZACA
TUTOR: ING. RAFAEL WILMER CONTRERAS URGILÉS, MSc.

Cuenca - Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Miguel Angel Montalván Morocho con documento de identificación N° 0106979883 y Paul Sebastián Malla Quituzaca con documento de identificación N° 0105486500; 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.

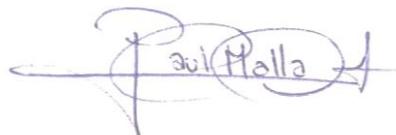
Cuenca, 25 de junio del 2024

Atentamente,



Miguel Angel Montalván Morocho

0106979883



Paul Sebastián Malla Quituzaca

0105486500

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

Nosotros, Miguel Angel Montalván Morocho con documento de identificación N° 0106979883 y Paul Sebastián Malla Quituzaca con documento de identificación N° 0105486500, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo académico: “Análisis del consumo de combustible de un motor a gasolina de 2.0 litros en condición de arranque en frío”, 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.

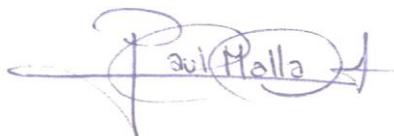
Cuenca, 25 de junio del 2024

Atentamente,



Miguel Angel Montalván Morocho

0106979883



Paul Sebastián Malla Quituzaca

0105486500

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Rafael Wilmer Contreras Urgilés con documento de identificación N° 0104463328, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UN MOTOR A GASOLINA DE 2.0 LITROS EN CONDICIÓN DE ARRANQUE EN FRÍO, realizado por Miguel Angel Montalván Morocho con documento de identificación N° 0106979883 y por Paul Sebastián Malla Quituzaca con documento de identificación N° 0105486500, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 25 de junio del 2024

Atentamente,



Ing. Rafael Wilmer Contreras Urgilés, MSc.

0104463328

ANÁLISIS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UN MOTOR A GASOLINA DE 2.0 LITROS EN CONDICIÓN DE ARRANQUE EN FRÍO

FUEL CONSUMPTION ANALYSIS OF A 2.0 LITER GASOLINE ENGINE IN COLD START CONDITION

Miguel Angel Montalván Morocho¹, Paul Sebastian Malla Quituzaca², Rafael Wilmer Contreras Urgilés³

Resumen

La presente investigación analiza el rendimiento de combustible en ruta en una ciudad de 2,560 m de altura. La unidad experimental fue un vehículo con motor a gasolina de 2.0 litros bajo condición de arranque en frío. Esta condición está referenciada a la normativa EURO 6 en el reglamento (CE) N.º 692/2008. La metodología aplicada está dividida en dos fases, estadística y práctica. La fase estadística, se realizó a través de la herramienta de ANOVA y regresión múltiple utilizando datos de los sensores MAP, TPS, IAT, ECT y CMP recopilados mediante una tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB-6212 y filtrados mediante software Matlab. En la fase práctica, se implementó un sensor de flujo GFS803 de señal tipo Hall en la línea de combustible, integrado con un sistema de adquisición de datos. De la fase estadística se obtuvo un algoritmo y sus resultados fueron validados con la implementación del sensor de flujo, donde se obtuvo una precisión del 88.69% en el algoritmo y un consumo de combustible de 34.82 L/100 km bajo condiciones específicas de funcionamiento. Esto demuestra que las metodologías pueden estimar con un alto grado de efectividad el consumo de combustible en condición de arranque en frío.

Palabras clave: Consumo, ANOVA, Regresión múltiple, Arranque en frío, Logaritmo de consumo.

Abstract

The present research analyzes fuel performance on the road in a city at an altitude of 2,560 meters. The experimental unit was a vehicle with a 2.0-liter gasoline engine under cold start conditions. This condition is referenced to the EURO 6 regulation in regulation (EC) No 692/2008. The applied methodology is divided into two phases, statistical and practical. The statistical phase was carried out using ANOVA and multiple regression tools, utilizing data from MAP, TPS, IAT, ECT, and CMP sensors collected through an NI USB-6212 DAQ data acquisition card and filtered using Matlab software. In the practical phase, a GFS803 Hall-type signal flow sensor was implemented in the fuel line, integrated with a data acquisition system. From the statistical phase, an algorithm was obtained, and its results were validated with the implementation of the flow sensor, where an accuracy of 88.69% was achieved in the algorithm, and a fuel consumption of 34.82 L/100 km was recorded under specific operating conditions. This demonstrates that the methodologies can estimate fuel consumption under cold start conditions with a high degree of effectiveness.

Keywords: Consumption, ANOVA, Multiple regression, Cold start, Consumption logarithm.

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

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

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

1. Introducción

El consumo de combustible es un aspecto crítico en la industria automotriz debido a su impacto directo en la eficiencia y sostenibilidad de los vehículos [1]. Es en esta línea que, a lo largo de los años, las metodologías para cuantificar la eficiencia energética han experimentado una evolución significativa [2]. Estas metodologías han transitado desde modelos teóricos [3] y prácticos hasta el uso de tecnologías avanzadas.

En el contexto de las metodologías teóricas para la estimación del consumo de combustible, el estudio [3] realizado en Madrid, España, implementó una metodología conocida como QuasiStatic Simulation-Toolbox. Esta herramienta permite al usuario ejecutar simulaciones para asumir que el sistema se encuentra en equilibrio en todo momento. El objetivo de esta investigación es optimizar mediante programación dinámica el consumo de combustible en función de la topografía del terreno. Este algoritmo optimiza el consumo en función de las condiciones de tráfico, calculando un perfil de velocidad promedio que evite las retenciones de tráfico y recupere el tiempo perdido en ellas. Las simulaciones han indicado que el ahorro de combustible puede llegar hasta un 8.9% para vehículos convencionales a gasolina.

Por otro lado, la investigación realizada por [4] en Colombia siguiendo una metodología práctica para evaluar el consumo de combustible, propuso la implementación de una metodología de pruebas basada en la Regulación CFR 40 (Code of Federal Regulations), una normativa de protección ambiental de los Estados Unidos, y en las normas de la COPANT (Comisión Panamericana de Normas Técnicas). Este estudio evaluó el consumo de combustible mediante pruebas de laboratorio LPDA (Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices) de la Universidad Tecnológica de Pereira, así como mediante pruebas de ruta, efectuando recorridos en horas pico y horas valle siguiendo los requerimientos de condiciones ambientales y operativas de las normativas internacionales [5] [6], utilizando un vehículo con motor de 1.6 L. Los resultados de esta investigación demostraron una mejora en el rendimiento del consumo de combustible del 15% en pruebas de laboratorio y del 20% en pruebas de ruta. En este mismo contexto metodológico, el trabajo de [7] demostró que la implementación de técnicas hyper efficient driving

mejora la eficiencia y reduce el consumo de combustible hasta en un 10%. Además, la investigación de [8] observó que, al practicar la conducción eficiente en ausencia de tráfico, se logra un ahorro de hasta un 35.39% en comparación con una misma ruta en condiciones de tráfico.

En investigaciones realizadas en Ecuador como las de [9, 10] que aplican ciclos de conducción como el FTP75 (Federal Test Procedure), que simula conducción urbana y el HWFET (Highway Fuel Economy Test Cycle) que simula conducción en carretera, se observó que la disminución del cilindraje del motor resulta en una reducción significativa del consumo de combustible. En el estudio de [9], se registró una diferencia del 35.13% en el consumo durante el ciclo urbano y del 35.58% en el ciclo de carretera al comparar vehículos con motores de 2.7 L y 1.0 L. De manera similar, en el estudio de [10], se observó una diferencia de consumo del 39.92% en el ciclo FTP75 y del 45.72% en el ciclo HWFET al comparar vehículos con motores de 2.0 L y 1.4 L. Estos resultados destacan que la disminución del cilindraje del motor es proporcional al consumo de combustible, lo cual es consistente con los hallazgos de ambas investigaciones.

En el mismo contexto de metodologías prácticas [11] estudia la influencia de la aerodinámica, en la investigación se demostró que un automóvil a 20 m/s con motor de 1.4 litros consume 6.41 L/100km. Con un motor más eficiente de 1.8 L, el consumo se reduce en un 29%. Además, al mejorar la aerodinámica del vehículo ($C_x = 0.27$) con el motor de 1.8 litros, el consumo disminuye un 37.8% en comparación con el motor de 1.4 litros, esta investigación subraya la significativa reducción en el consumo de combustible debido a mejoras en la eficiencia del motor y la aerodinámica. Por otra parte, en la investigación realizada por [12], se utilizó una simulación Model-in-the-Loop (MIL), la cual permite controlar el vehículo en diversas condiciones y escenarios sin necesidad de construir prototipos físicos. A través de ello, este estudio evaluó los efectos de la densidad del aire en diferentes regiones geográficas del Ecuador, específicamente comparando las ciudades de la región Costa y la Sierra. Los resultados revelaron que, en la Costa, el consumo promedio de combustible es de 7.214 L/100 km, mientras que en la Sierra es de 6.842 L/100 km, indicando que la menor densidad del aire en la Sierra contribuye a una reducción del consumo de combustible de aproximadamente un 5%.

En la línea de estudio realizado en nuestro país la investigación de [13] en Riobamba, desarrolla un modelo de predicción de consumo utilizando las señales de los sensores IAT, MAP, revoluciones y rendimiento volumétrico. Los resultados indicaron que el consumo de combustible aumenta en 0.15 litros en pendientes ascendentes en comparación con las descendentes. Dentro de esta línea de investigación [14], en la ciudad de Cuenca (Ecuador), se desarrolló un algoritmo mediante redes neuronales basado en las señales de los sensores para estimar el consumo de combustible además de utilizar un sensor de flujo para establecer el consumo real. El modelo mostró un error del 4% entre las estimaciones del algoritmo y los datos reales.

Continuando con las investigaciones en nuestro país, el trabajo de [15], realizado en la región de la Amazonía Ecuatoriana, evaluó el impacto del uso del aire acondicionado y diferentes tipos de combustible en el consumo de combustible vehicular. Se encontró que el menor consumo se produce en horarios normales, sin el uso de A/C y empleando gasolina súper, con una reducción del consumo entre un 4% y un 6% en comparación con gasolina extra. Además, el uso del aire acondicionado incrementa el consumo de combustible en aproximadamente un 15%, y el consumo durante la hora pico es en promedio un 13% mayor que en el horario normal. En la misma línea de las investigaciones del país en el trabajo de [16], realizada en la Sierra Ecuatoriana, se destaca la evaluación del consumo de combustible en vehículos con diferentes cilindradas de motor, implementando un elemento auxiliar externo como un depósito portátil de combustible. Se encontró que el consumo promedio aumenta significativamente con el tamaño del motor, con valores de 12.04 L/100km para un motor de 1.0L, incrementándose hasta 34.53 L/100km para un motor de 3.0L. Estos resultados indican una diferencia en el consumo del 35% al comparar el motor de 3.0L con el de 1.0L, destacando la importancia del tamaño del motor en la eficiencia del combustible.

Como se ha evidenciado en las investigaciones previamente mencionadas, estas han demostrado ser altamente efectivas en la estimación del consumo de combustible en motores de combustión interna. No obstante, aún existen áreas que requieren mejoras y un mayor desarrollo, especialmente en el contexto del arranque en frío. Este estudio tiene como objetivo no solo ampliar la base de datos existente, sino también explorar nuevas metodologías relacionadas al consumo de

combustible en arranque en frío. Para abordar esta deficiencia, el presente estudio se enfoca en examinar el consumo de combustible en un vehículo equipado con un motor de 2.0 L. Se aplica esta unidad experimental, por disponibilidad propia y por considerarse uno de los vehículos más vendidos a nivel provincial como lo evidencia la investigación de [17]. Esta investigación busca la precisión y confiabilidad de estimación a través de la determinación de un algoritmo en función a los parámetros de funcionamiento del motor de combustión interna, además de contribuir significativamente al desarrollo de técnicas avanzadas para la monitorización de la eficiencia del combustible.

2. Métodos y materiales

En la siguiente sección se detallará la metodología general de la presente investigación, los materiales aplicados para el estudio, la adquisición de los datos en arranque en frío, la ruta aplicada, la caracterización de los sensores, el diseño de un algoritmo para la obtención de datos, el algoritmo para obtener pulsos del sensor de flujo de combustible y algoritmo para el tratamiento de la señal de los sensores.

2.1. Metodología de la investigación

Para el desarrollo de la presente investigación se emplea el diagrama de flujo presentado en la En la primera fase del flujograma se emplea un método inductivo, comenzando con una revisión bibliográfica de diversas fuentes de datos con el propósito de identificar las variables y metodologías de interés relacionadas con el consumo instantáneo de combustible de vehículos en ruta. Como resultado se identificaron procedimientos experimentales y teóricos necesarios para aplicar a la investigación.

En la segunda fase del flujograma, se procede aplicar una metodología experimental. Esto incluye el uso de un vehículo en condiciones óptimas de funcionamiento, instrumentación del flujómetro y conexión de equipos de adquisición de datos. Además, en esta fase se registra los datos de los PID del vehículo, así como también del consumo de combustible bajo condiciones de arranque en frío.

En la tercera y última fase del flujograma, se valida los datos obtenidos en la fase anterior. Mediante estos datos se crea una matriz general con el objetivo de analizarlos

a través de técnicas estadísticas. Además, se desarrolla un algoritmo que estime el consumo de combustible en base a los PID del vehículo en condición de arranque en frío. Esto para su posterior comparación e interpretación de resultados en base a las metodologías seleccionadas en la primera fase.

En la primera fase del flujograma se emplea un método inductivo, comenzando con una revisión bibliográfica de diversas fuentes de datos con el propósito de identificar las variables y metodologías de interés relacionadas con el consumo instantáneo de combustible de vehículos en ruta. Como resultado se identificaron procedimientos experimentales y teóricos necesarios para aplicar a la investigación.

En la segunda fase del flujograma, se procede aplicar una metodología experimental. Esto incluye el uso de un vehículo en condiciones óptimas de funcionamiento, instrumentación del flujómetro y conexión de equipos de adquisición de datos. Además, en esta fase se registra los datos de los PID del vehículo, así como también del consumo de combustible bajo condiciones de arranque en frío.

En la tercera y última fase del flujograma, se valida los datos obtenidos en la fase anterior. Mediante estos datos se crea una matriz general con el objetivo de analizarlos a través de técnicas estadísticas. Además, se desarrolla un algoritmo que estime el consumo de combustible en base a los PID del vehículo en condición de arranque en frío. Esto para su posterior comparación e interpretación de resultados en base a las metodologías seleccionadas en la primera fase.

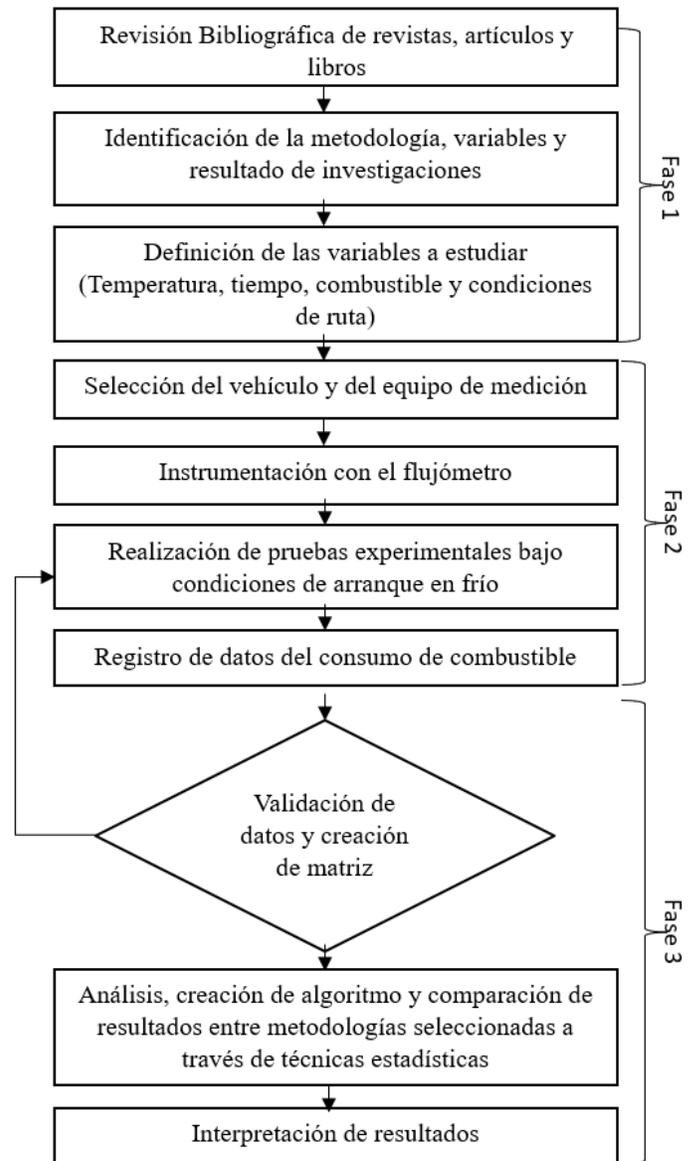


Figura 1. Diagrama de flujo.

Respecto de la metodología para la adquisición de datos se seguirá el flujograma de proceso que cuenta con dos líneas como se muestra en la Figura 2.

En la línea 1, la adquisición de datos parte de los principales sensores del sistema de inyección del vehículo tales como el TPS, MAP, CMP, IAT y ECT. Estos sensores envían una señal de voltaje a la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB-6212, en donde la señal se graba mediante los canales de entrada analógica configurada de manera diferencial, para posteriormente enviar estos datos a un equipo de registro programado mediante LabVIEW.

En cuanto a la línea 2, la adquisición de datos se da a través de un sensor de flujo. Este sensor esta interconectado a una línea digital y mediante esta línea

envía señales de pulsos que genera el sensor de flujo al ponerse en funcionamiento. Posteriormente por disposición propia del equipo se recolectan los pulsos con una tarjeta de adquisición de datos (Arduino) y son enviados a una matriz general de resultados del flujo.

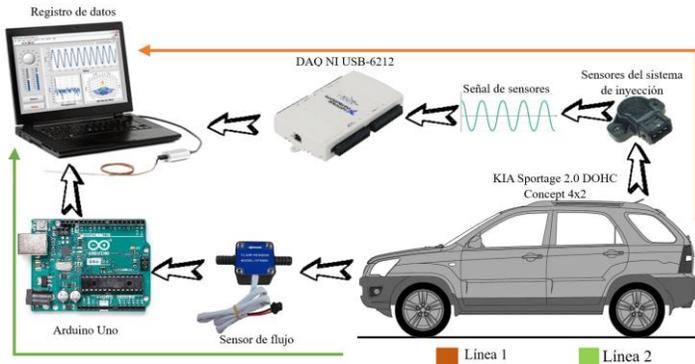


Figura 2. Diagrama para la adquisición de datos

Una vez descrita la metodología de la investigación, se indicará en la siguiente sección los materiales.

2.2. Materiales

En el presente apartado se detallará la unidad experimental y los equipos utilizados para la adquisición de datos, incluyendo el uso de la DAQ NI USB-6212, Arduino Uno y Sensor de Flujo.

- Unidad experimental.** La unidad seleccionada para la prueba es un vehículo con motor 2.0L como es el caso de la investigación [10, 17]. Este automóvil se encuentra con el motor en buen estado habiendo cumplido con los mantenimientos recomendados por el fabricante como, los cambios de aceite, filtros, bujías, limpieza del cuerpo de aceleración y cambio de refrigerante. A continuación, en la Tabla 1 se detallan las características técnicas del vehículo.

Tabla 1. Características técnicas de los materiales.

Marca	KIA
Modelo	Sportage 2.0 DOHC Concept 4x2 (2008-2010)
Consumo Extraurbano	6,6 l/100 km
Consumo Urbano	10,4 l/100 km
Consumo Medio	8 l/100 km

Combustible	Gasolina
Volumen del tanque	58 l
Alimentación	Inyección Indirecta
Cilindrada	1.975 cm ³
Disposición de los cilindros	En línea
Numero de cilindros	4
Potencia máxima	141 CV / 104 kW
Revoluciones potencia máxima	6.000 rpm
Par máximo	184 Nm
Revoluciones par máximo	4.500 rpm

- Adquisición de datos.** Los dispositivos que se utilizarán para la adquisición de datos son: Una tarjeta DAQ NI USB-6212 de National Instruments presentada en la Tabla 2, un Arduino Uno visto en la Tabla 3 y el sensor de flujo presentado en la Tabla 4.

Tabla 2. Características técnicas de la DAQ NI USB-6212.

Entrada de Potencia Soportada:	Energizado por Bus
Máximo Número de Canales de Entrada Analógica de Una Sola Terminal	16
Resolución de Entrada Analógica	16 bits
Máxima Velocidad de Muestreo	400 kS/s
Número de Canales de Salida Analógica:	2
Máxima Velocidad de Actualización:	250 kS/s
Conector de Bus	USB 2.0
Número de Contadores/Temporizadores	2
Tamaño del Búfer FIFO de Entrada Analógica	4095 muestras

Tabla 3. Características técnicas de Arduino Uno.

Modelo	Arduino Uno
Microcontrolador	ATmega328.
Voltaje de entrada	7-12V.
Pines digitales	14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).
Entradas análogas	6 entradas.
Memoria Flash.	32k
Velocidad	Reloj de 16MHz de velocidad.
Dimensiones	68.6mm x 53.4mm

Tabla 4. Características técnicas del Sensor GFS803.

	
Modelo	GFS803
Tipo de señal de salida	Hall
Rango de flujo:	5-600 L/H (1-30 L/min)
Fuente de alimentación	3,5-12 V
Frecuencia de pulso (Hz)	$F = (2,5 * Q) \pm 1\%$, Q = L/min, error: $\pm 1\%$
Rango de voltaje de funcionamiento	DC 5 ~ 18 V
Tensión de trabajo nominal:	DC 5-24 V
Capacidad de carga	≤ 10 mA (DC 5 V)
Presión del agua	$\leq 1,75$ MPa
Temperatura del líquido	0-80 °C (0-176 °F)
Rango de humedad de funcionamiento	35% ~ 90% RH (sin heladas)
Tamaño	85 mm x 47 mm x 38 mm (largo x ancho x alto)
Cable	50 cm Cable rojo: VCC (+) Cable negro: GND (-) Cable amarillo: salida de señal de pulso

Presentado los materiales de la investigación, se realiza la condición para la adquisición de datos en arranque en frío.

2.3. Condición para adquisición de datos

La condición para la adquisición de datos se basó en el arranque en frío del vehículo y su efecto en el consumo de combustible. La prueba se llevó a cabo con el motor del vehículo a una temperatura inicial de 24 grados Celsius (temperatura ambiente) y se continuó hasta que el motor alcanzó los 75 grados Celsius, esto considerando que la normativa Euro 6, específicamente en el reglamento (CE) N.º 692/2008 de la comisión, donde se proporciona detalles sobre los procedimientos de ensayo y las condiciones específicas, incluyendo las temperaturas de ensayo [18], establece que un vehículo está "frío" cuando la temperatura del motor es inferior a 70 grados Celsius.

Para determinar la temperatura y obtener datos precisos de los sensores del vehículo, se utilizó la tarjeta DAQ de la Tabla 2. Además, para medir el consumo de combustible se programó un Arduino para registrar los pulsos del sensor de flujo, lo que permitió calcular el consumo final. La Tabla 5 resume los parámetros medidos en las pruebas y sus abreviaturas.

Tabla 5. Parámetros medidos.

Parámetro	Abreviación	Unidad
Tiempo	Tiempo	s
Sensor TPS	TPS	%
Sensor MAP	MAP	kPa
Sensor IAT	IAT	°C
Sensor ECT	ECT	°C
Revoluciones	Rpm	rpm
Consumo de combustible	Consumo	mL/s

Una vez desarrollado la condición para la adquisición de los datos de la investigación, se detalla la ruta establecida.

2.4. Ruta.

La ruta establecida para la prueba incluye segmentos con y sin pendientes como en la investigación de [13]. Debido a que el vehículo alcanza su temperatura óptima de funcionamiento en alrededor de 4 minutos, la distancia de ruta es de 1.6 km. En la Tabla 6 se detallan las características específicas de la ruta.

Tabla 6. Ruta urbana de tipo asfalto.

Características Técnicas (Ruta de prueba)	
Tiempo	4 minutos
Distancia	1.6 km

Establecidas las variables y la ruta para ejecutar la investigación, posteriormente se realiza la caracterización de los sensores del vehículo debido a que la adquisición es de voltaje, sin embargo, se analizan sus valores de magnitud física.

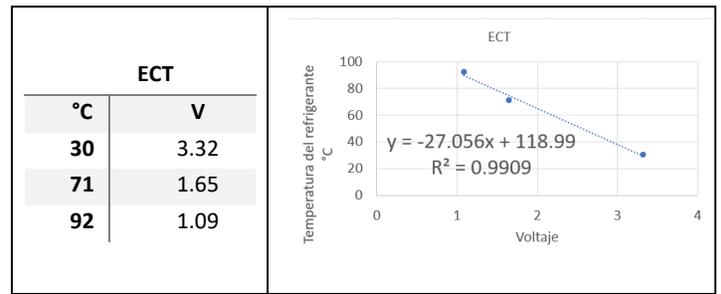
2.5. Caracterización de sensores del vehículo.

En cuanto a la caracterización de los sensores del vehículo, primero se identificó los pines de cada sensor a

estudiar, asegurando una correcta conexión y funcionamiento. Posteriormente, se procedió a variar sistemáticamente las unidades de medida, con el fin de obtener dos o más puntos que describieran el comportamiento del sensor bajo diferentes condiciones de funcionamiento del motor. Durante este proceso, se recopilaron los datos en una hoja de cálculo, para obtener sus graficas con sus ecuaciones, facilitando el análisis y la visualización de los resultados. Así como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Caracterización

Sensor		Ecuación característica										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">TPS</th> </tr> <tr> <th>%</th> <th>V</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5.9</td> <td>0.27</td> </tr> <tr> <td>85.1</td> <td>4.22</td> </tr> </tbody> </table>		TPS		%	V	5.9	0.27	85.1	4.22			
TPS												
%	V											
5.9	0.27											
85.1	4.22											
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">MAP</th> </tr> <tr> <th>KPA</th> <th>V</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>74</td> <td>2.93</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>0.89</td> </tr> </tbody> </table>		MAP		KPA	V	74	2.93	22	0.89			
MAP												
KPA	V											
74	2.93											
22	0.89											
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">CMP</th> </tr> <tr> <th>HZ</th> <th>rpm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.8</td> <td>1200</td> </tr> <tr> <td>3.5</td> <td>2000</td> </tr> <tr> <td>4.5</td> <td>3500</td> </tr> </tbody> </table>		CMP		HZ	rpm	2.8	1200	3.5	2000	4.5	3500	
CMP												
HZ	rpm											
2.8	1200											
3.5	2000											
4.5	3500											
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">IAT</th> </tr> <tr> <th>°C</th> <th>V</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30</td> <td>3.36</td> </tr> <tr> <td>34</td> <td>3.16</td> </tr> <tr> <td>38</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>		IAT		°C	V	30	3.36	34	3.16	38	3	
IAT												
°C	V											
30	3.36											
34	3.16											
38	3											



Con la caracterización de los sensores de la investigación desarrollada, se realiza el diseño del algoritmo para la obtención de datos.

2.6. Diseño del algoritmo para la obtención de datos.

Se desarrolló un algoritmo computacional, en LabVIEW 2019 como en la investigación [19]. Se utilizó las ecuaciones obtenidas en la sección 2.5 para calcular y convertir las lecturas de voltaje de los sensores en magnitudes físicas. Este proceso incluyó la utilización de matrices para la recolección y organización de los datos obtenidos durante las mediciones.

Además, se programó un sistema que permitió la transferencia automática de los datos almacenados en las matrices hacia una hoja de cálculo en Excel.

En la Figura 3 se presenta el esquema de la programación para la obtención de los datos de los sensores.

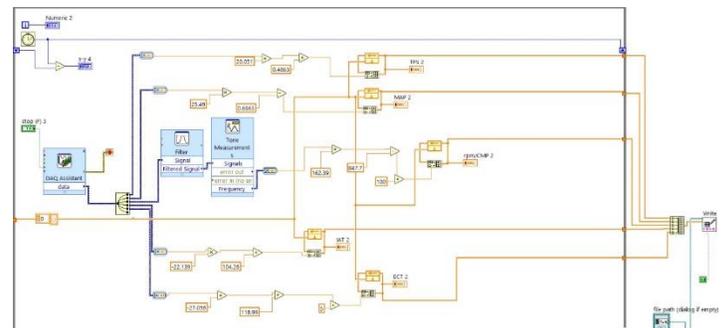


Figura 3. Programación en LabVIEW para obtención de las señales de los sensores.

Una vez desarrollado el diseño del algoritmo para la obtención de datos de la investigación, se realiza el algoritmo para obtener pulsos del sensor de flujo de combustible.

2.7. Algoritmo para obtención de pulsos del sensor de flujo de combustible.

Para capturar los pulsos del sensor de combustible, se implementó un programa en Arduino Uno. Utilizando la función “attachInterrupt ()” con el modo “RISING”, de tal manera que el Arduino Uno pueda detectar los cambios de voltaje de 0V a 5V como en la Figura 4. Esta configuración permite que cada transición de bajo a alto en el pin digital específico genere una interrupción, facilitando así la contabilización precisa de los pulsos generados por el sensor.

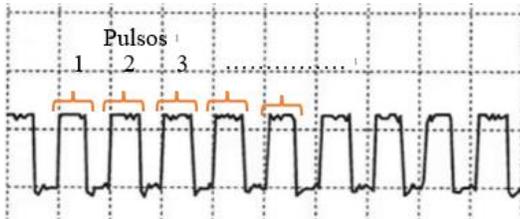


Figura 4. Señal del sensor de combustible

El delay de 200 ms integrado en el programa garantiza un intervalo suficiente para capturar y procesar los pulsos sin saturar al Arduino Uno, asegurando un funcionamiento estable y eficiente del sistema.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el esquema de la programación para la obtención de los pulsos del sensor de combustible.

```
// Definimos el pin donde conectamos el sensor de efecto Hall
const int hallSensorPin = 2; // Pin digital 2

// Variables para el conteo de pulsos
volatile unsigned long pulseCount = 0;
unsigned long lastTime = 0;
const unsigned long interval = 200; // Intervalo de tiempo en milisegundos (0.2 segundos)

void setup() {
  // Inicializamos el monitor serie
  Serial.begin(9600);

  // Configuramos el pin del sensor de efecto Hall como entrada
  pinMode(hallSensorPin, INPUT);

  // Asociamos la interrupción al pin del sensor de efecto Hall
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(hallSensorPin), countPulse, RISING);

  lastTime = millis();
}

void loop() {
  unsigned long currentTime = millis();

  // Si han pasado 0.2 segundos (200 ms)
  if (currentTime - lastTime >= interval) {
    // Desactivamos la interrupción para leer de manera segura el conteo de pulsos
    noInterrupts();
    unsigned long pulses = pulseCount;
    pulseCount = 0;
    interrupts();

    // Mostramos el conteo de pulsos en el monitor serie
    Serial.print("");
    Serial.println(pulses);

    // Actualizamos el tiempo
    lastTime = currentTime;
  }
}
```

Figura 5. Programación en ARDUINO ONE para obtener los pulsos del sensor de combustible

La Figura 3 esquematiza la conexión del Arduino diseñado para la recolección de pulsos generados por el sensor de combustible, conforme a la programación especificada.

Establecido el algoritmo para obtener pulsos del sensor de flujo de combustible de la investigación se realiza un algoritmo para el tratamiento de la señal de los sensores.

2.8. Algoritmo para el tratamiento de la señal de los sensores.

Debido a diversos factores que pueden introducir ruido en las señales, como interferencias electromagnéticas o movimientos de los cables, es crucial mitigar estos efectos para obtener una mejor resolución de los datos obtenidos. Para abordar este problema, y como se detalla en la investigación [20], se implementó un algoritmo diseñado para filtrar y suavizar las señales adquiridas.

Este algoritmo tiene como objetivo eliminar picos extremadamente altos o bajos en las señales, los cuales pueden ser causados por perturbaciones externas, y al mismo tiempo suavizar la curva de la señal. El resultado es una representación más gradual y continua de los datos, lo que facilita un análisis más preciso y fiable de la información recogida.

En la Figura 6, se muestra el proceso de filtrado y suavizado de la señal.



Figura 6. Aplicación del filtro a la señal de los sensores

Respecto al tratamiento de las señales, se implementaron dos etapas de filtrado para optimizar su calidad. En la primera etapa, se aplicó la función de Media Móvil Exponencial (EMA), la cual proporciona un método eficiente para suavizar las fluctuaciones rápidas y atenuar el ruido de alta frecuencia en la señal.

En la segunda etapa, se empleó la función "sgolayfilt" con un polinomio de segundo grado. Este filtro de Savitzky-Golay mejora la señal al realizar un ajuste polinómico por mínimos cuadrados dentro de una ventana de datos móviles. La combinación de estos

métodos proporciona una señal procesada con una reducción significativa del ruido, manteniendo la integridad de las características originales de la señal.

3. Resultados y Discusión

3.1. Validación de la base de datos

Para determinar el consumo de combustible durante el arranque en frío, se desarrolló una base de datos inicial con las variables de los sensores mencionadas en la sección 2.1, como se ilustra en la Figura 7.

TIEMPO	TPS	MAP	IAT	ECT	RPM	Tiny	CAUDAL SENSOR
0.2	6.26209	34.35325	22.337769	20.654583	1222.3623	3.2221011	0.17460
0.4	6.08762	34.316146	22.334021	20.652081	1222.617	3.216976	0.174142817
0.6	6.08535	34.212567	22.329132	20.647968	1223.245	3.2055948	0.174813111
0.8	6.25528	34.025629	22.323101	20.642243	1224.2464	3.1860664	0.17661046
1	6.56911	33.792513	22.315491	20.634245	1225.7177	3.162414	0.179373358
1.2	7.11114	33.62574	22.307265	20.625212	1227.4314	3.1476823	0.183462168
1.4	7.79949	33.666528	22.298796	20.616162	1229.2551	3.1571372	0.188867771
1.6	8.50765	33.988134	22.289959	20.608114	1231.242	3.1982174	0.195642245
1.8	9.08029	34.52795	22.28082	20.601926	1233.7204	3.2630496	0.203919825
2	9.53771	35.16389	22.271457	20.597926	1237.1696	3.3382312	0.213843135
2.2	10.07570	35.801284	22.261669	20.596084	1242.0969	3.414526	0.225336587
2.4	10.83282	36.470001	22.251604	20.596013	1248.8832	3.4962515	0.238077302
2.6	11.81572	37.274362	22.241376	20.597101	1257.7988	3.5952157	0.251575287
2.8	12.92990	38.308933	22.231046	20.598769	1269.0125	3.7214778	0.265334009
3	13.94997	39.53001	22.220552	20.600623	1282.6875	3.8688012	0.278958324
3.2	14.79563	40.797647	22.209901	20.602384	1298.948	4.0210539	0.292146291
3.4	15.56235	42.011846	22.198801	20.603928	1317.8896	4.1676576	0.304744028
3.6	16.42657	43.191974	22.18727	20.605316	1339.4828	4.3118627	0.316857169
3.8	17.41231	44.415242	22.175354	20.606618	1363.579	4.4624193	0.328855476
4	18.48218	45.693251	22.163547	20.607882	1389.8837	4.6203018	0.341206509
4.2	19.45694	46.983868	22.151945	20.609129	1418.0119	4.7795653	0.354253274
4.4	20.13781	48.220782	22.140601	20.610326	1447.5679	4.9314328	0.367991771
4.6	20.38259	49.327542	22.129442	20.611345	1478.2313	5.0663658	0.382164877
4.8	20.11953	50.192889	22.118524	20.612232	1509.7925	5.1713952	0.396404339
5	19.29029	50.687653	22.107785	20.613254	1542.1106	5.2316506	0.41029609

Figura 7. Base de datos

Con el fin de validar las bases de datos, se empleó estadística inferencial para la aceptación de la hipótesis [19]. En este contexto, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) con el objetivo de evaluar la significancia estadística de cada uno de los valores recolectados, conforme se detalla en la investigación [21].

En la Figura 8 (a) se muestran los residuos (puntos azules) distribuidos en su mayoría sobreponiendo a la línea roja de regresión, lo que demuestra la normalidad de los datos. Además, en la Figura 8 (b) el perfil de la distribución en el histograma de los residuos muestra una distribución normal en forma de campana con un pico individual en la media lo que corrobora la normalidad de los datos. Mientras que en la Figura 8 (c y d) de acuerdo con las gráficas de Residuos versus ajustes y orden, los residuos están dispersos aleatoriamente alrededor de cero (valores positivos y negativos). Por lo que, se garantiza la aleatoriedad del experimento.

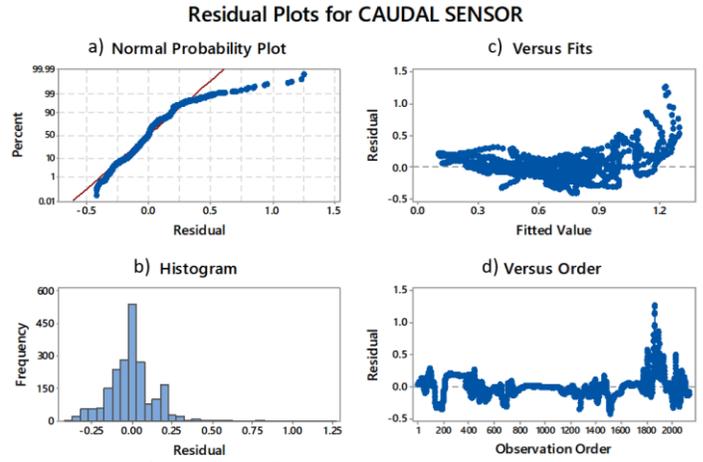


Figura 8. Grafica de residuos del Caudal Sensor.

Obteniendo la validación de los datos de la investigación, se realiza el algoritmo de consumo de combustible.

3.2. Algoritmo de consumo de combustible

Para determinar el algoritmo estadístico que explica el consumo de combustible en condiciones de arranque en frío, se realiza un análisis de regresión lineal multivariable con los datos de los sensores del vehículo obtenidos de la tarjeta DAQ, como se muestra en la Figura 7. La variable de salida es el caudal del sensor, y las variables de entradas son los datos de TPS, MAP, IAT, ECT, RPM y Tiempo de Inyección. Se realizó una interacción de estas variables hasta encontrar un valor óptimo de validación para el modelo.

La Figura 9, presenta las interacciones entre diferentes predictores en función de la variable de respuesta, que es el caudal de combustible. En la fila 3, columna 2, se ilustra el producto de MAP y ECT, donde se observa que a medida que su valor aumenta, el caudal de combustible se incrementa. Por otro lado, en la fila 4, columna 2, se evidencia curvas procedentes de MAP y el tiempo de inyección, donde se muestra que la multiplicación de estas dos variables es proporcional al caudal del combustible. A medida que el valor del tiempo de inyección crece, el efecto de MAP sobre el caudal de combustible se intensifica. Otra relación se evidencia en la fila 4, columna 4, donde el ECT por el Tiempo de inyección muestran un comportamiento equivalente al caudal de combustible.

Estas ilustraciones establecen que variables como MAP, ECT y tiempo de inyección tienen un impacto significativo sobre el caudal del combustible, con

interacciones particularmente notables entre las ya mencionadas.

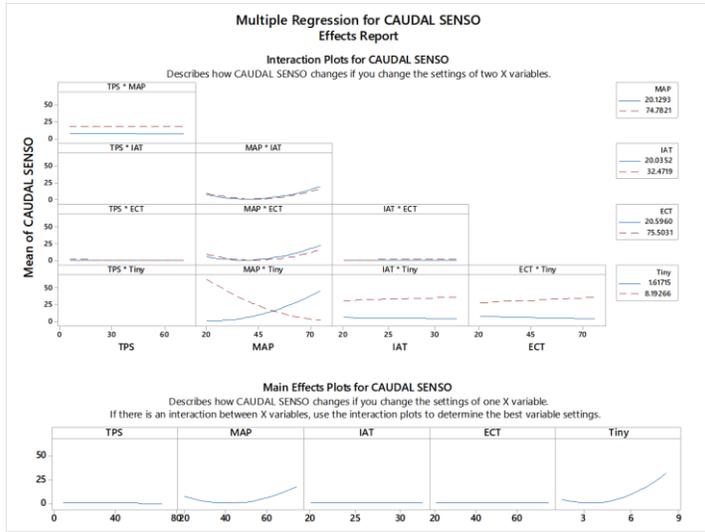


Figura 9. Ventana de la interacción de variables.

En la Figura 10 se observa el valor de R^2 y p-valor los mismos que validan el modelo lineal que cumple con los supuestos estadísticos. En p-valor se observa un nivel de significancia menor al 0.001 demostrando la fiabilidad del resultado de estudio, además, se indica que el modelo es estadísticamente significativo, con un ajuste reflejado en un R^2 ajustado de 88.69% lo que sugiere que la variable puede ser explicada con este porcentaje de validación.

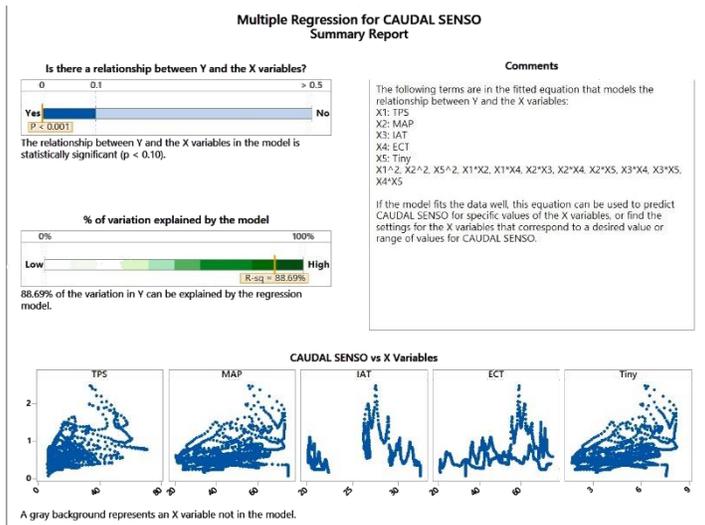


Figura 10. Valores de R^2 y p-valor

Una vez completado el análisis de regresión múltiple, la ecuación del modelo final incluye los términos con sus respectivos coeficientes. Este modelo considera interacciones entre las 5 variables (TPS, MAP, IAT, ECT y Tiempo de inyección) como se muestra en la ecuación

de la Figura 11, además se observa que la inclusión de ciertas variables mejora considerablemente el ajuste del modelo, mientras que otras tienen un impacto menor.

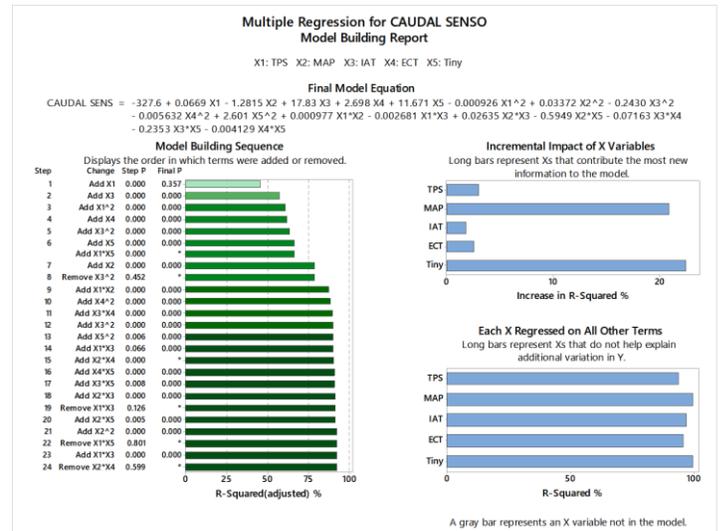


Figura 11. Ecuación de regresión lineal multivariable

El modelo de regresión múltiple para CAUDAL SENSOR se extrajo de la Figura 11 y es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 Caudal = & -1.057 + 0.0088x_1 + 0.2046x_2 + \\
 & 0.02769x_3 + 0.00448x_4 - 1.686x_5 - 0.000047x_1^2 + \\
 & 0.01574x_2^2 + 1.3801x_3^2 - 0.000098x_1x_2 - \\
 & 0.000198x_1x_4 - 0.008796x_2x_3 - 0.003491x_2x_4 - \\
 & 0.2955x_2x_5 + 0.000834x_3x_4 + 0.07852x_3x_5 + \\
 & 0.03119x_4x_5
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Donde;

- $Caudal = mL$
- $x_1 = TPS$ (%)
- $x_2 = MAP$ (kPa)
- $x_3 = IAT$ (°C)
- $x_4 = ECT$ (°C)
- $x_5 = \text{Tiempo de inyección}$ (ms)

Para validar la funcionalidad de la ecuación obtenida, se calculó el error entre los datos medidos y los extraídos de la ecuación. A fin de verificar el consumo real, se hace uso de una probeta para medir la cantidad en mililitros que se consumieron en la ruta. Los resultados demuestran una efectividad del 91% en comparación con el consumo de combustible calculado. Además, se contrastó los valores obtenidos por el sensor de combustible con el 88.7% de efectividad con respecto a los mismos resultados del algoritmo. Obteniendo un consumo promedio de 34.82 L/100 km. En la Tabla 8 se presentan la variación de resultados de 4 pruebas realizadas.

Tabla 8. Variación de resultados de las 4 pruebas.

	MEDIDO (mL)	SENSOR (mL)	EC1 (mL)
PRUEBA 1	595	591.74	611.27
PRUEBA 2	655	650.08	584.09
PRUEBA 3	615	692.73	565.23
PRUEBA 4	545	541.23	468.01

Estos resultados indican que la ecuación desarrollada exhibe un alto grado de precisión y confiabilidad, demostrando un desempeño consistente al comparar las mediciones directas del consumo de combustible y los datos proporcionados por el sensor de combustible. Sin embargo, para validar el modelo, se realizó un análisis ANOVA ya mencionado en la sección 3.1, utilizando los valores de la Tabla 8.

En la Figura 12 (a) se presenta la distribución de los residuos, los cuales se superponen a la línea de regresión, lo que evidencia la normalidad en las mediciones de consumo. De la misma forma en la Figura 12 (b y d) los valores de las mediciones muestran un comportamiento aleatorio, indicando la ausencia de valores atípicos. La Figura 12, muestra que el histograma no sigue la distribución esperada, sin embargo, este hecho no compromete la validez de las mediciones del consumo de combustible durante el arranque en frío.

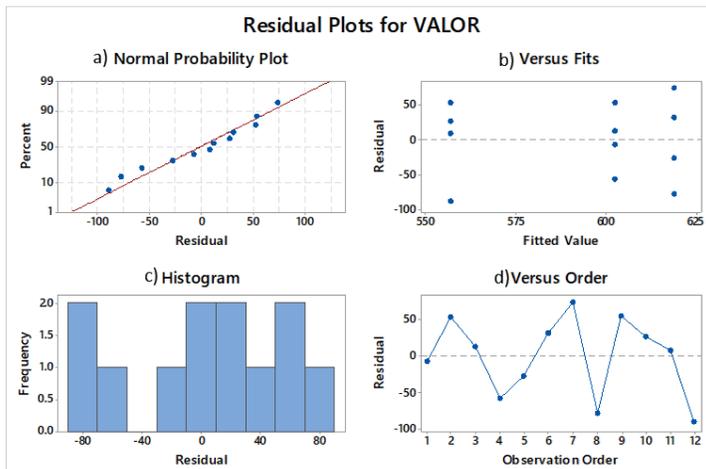


Figura 12. Grafica de residuos de los resultados

Continuando con el análisis, en la Figura 13, las medias obtenidas confirman la validación de los resultados, debido a que los intervalos de confianza (bigotes) se superponen, indicando que no hay diferencias significativas. De manera similar, en la Figura 14, el análisis de Tukey muestra que los valores son

equivalentes. Esto se debe a la proximidad de los bigotes y los puntos a la línea de referencia (línea interpuntada), además de compartir el mismo grupo. Estos resultados corroboran que las mediciones realizadas con la probeta, el sensor y el algoritmo son consistentes y equivalentes.

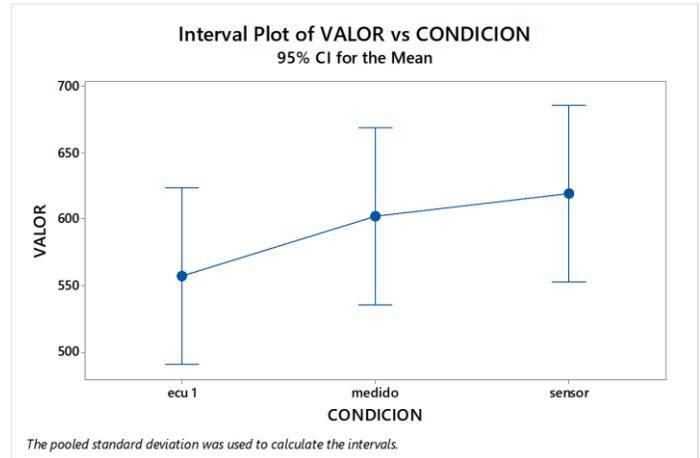


Figura 13. Grafica de las medias de los resultados.

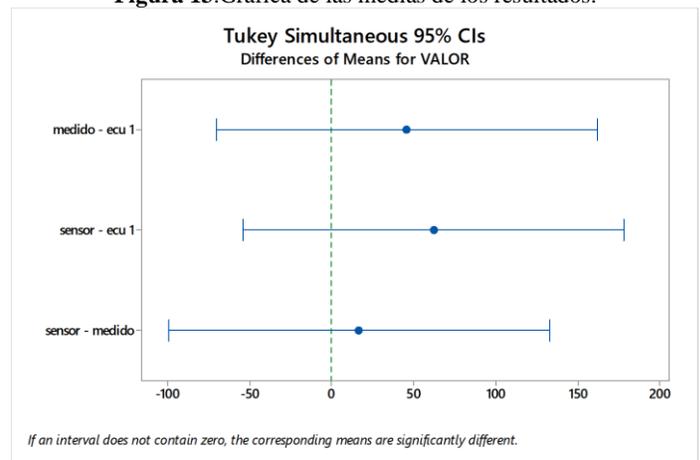


Figura 14. Grafica de Tukey de los resultados.

4. Conclusiones

La metodología utilizada ha permitido determinar que el consumo de combustible del motor durante el arranque en frío es de 34.82 L/100 km, mientras que cuando el motor está caliente, el consumo es de 10.4 L/100 km. Esto implica un aumento del 334% en el consumo de combustible en comparación con un motor caliente, lo que equivale a triplicar el consumo. Estos datos sustentan la recomendación de esperar a que el motor alcance su temperatura óptima de funcionamiento antes de iniciar una ruta.

Se verificó la efectividad del modelo con una validación del 88.69% tal como se muestra en la Figura 10, en relación con el consumo de combustible durante el

arranque en frío. Este resultado indica una alta precisión y eficacia del modelo.

Se comprobó la precisión de las mediciones de consumo de combustible con un análisis ANOVA, como se ilustra en la Figura 13 y Figura 14 las cuales demuestran que los valores obtenidos mediante el algoritmo, el sensor y la probeta son consistentes y estadísticamente pertenecen al mismo conjunto.

Se elaboró una nueva base de datos que permitió la creación de un algoritmo (1) para la condición de arranque en frío de un vehículo con motor 2.0L, explicado en la Sección 3.2. Este algoritmo considera una temperatura de hasta 75°C, basándose en la normativa Euro 6.

5. Referencias

- [1] J. Villacobos and G. Wilmsmeier, "Estrategias y herramientas para la eficiencia energética y la sostenibilidad del transporte de carga por carretera.," *Boletín FAL*, 2016.
- [2] M. Aresti, M. Tanco, D. Jurburg, M. Diego and J. Villalobos, "Evaluación de tecnologías para la eficiencia energética en vehículos de carga por carretera," *Memoria investig. ing. (Facultad Ing., Univ. Montev.)*, no. 14, pp. 35-47, 2016.
- [3] C. Montiel, "Optimización del consumo de combustible de un vehículo dependiendo de las condiciones de la carretera," 2015.
- [4] J. Castillo, Restrepo Álvaro, J. Tibaquirá and L. Quirama, "Estrategias de eficiencia energética en vehículos livianos del transporte por carretera en Colombia," *Revista UIS Ingenierías [En línea]*, vol. 18, no. 3, pp. 129-139, 2019.
- [5] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Medição do consumo de combustível - Método de ensaio.," p. 15, 2017.
- [6] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Veículos rodoviários automotores leves — Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento," p. 49, 2012.
- [7] A. Rionda, D. Martínez, X. Pañeda, D. Arbesú, J. Jiménez and F. Fernández, "Sistema de tutoría para la conducción eficiente de vehículos de combustión," *Dialnet. Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, vol. 7, no. 3, pp. 133-140, 2013.
- [8] J. Espinoza, C. Castro, J. Villamarín, D. Pantoja and J. Sangovalin, "Consumo de combustible frente a la eco conducción y tráfico en una ruta mixta en la ciudad de Quito," *Revista Científica Y Tecnológica UPSE*, vol. 9, no. 2, pp. 85-96, 2022.
- [9] P. Tapia, V. Tigre and F. Torres, "Determinación del consumo de combustible de vehículos en base a los ciclos de conducción EPA FTP75 y EPA HWFET, en dinamómetro de chasis. Casos de estudio: vehículos Hyundai Santa Fe 2.7L V6, 2009 y Chery QAC 1.0L, 2017," *Revista INFOCIENCIA*, vol. 11, no. 1, 2017.
- [10] H. Zamora and D. Terán, "Determinación del consumo de combustible de vehículos en base a los ciclos de conducción EPA FTP 75 y EPA HWFET, en dinamómetro de chasis. Casos de estudio: Vehículos KIA Rio R 1.4L, 2012 Y KIA Carens Rondo 2.0L, 2012," *Facultad de ciencia y tecnología, Universidad del Azuay*, 2012.
- [11] R. Marchese and M. Golato, "El consumo de combustible," *cet ISSN 1668-9178*, vol. 33, 2011.
- [12] E. Grijalva, J. Acosta and E. Mancheno, "Influencia de la densidad del aire en el consumo de combustible en vehículos livianos," *Revista Digital Novasinergia*, vol. 4, no. 2, pp. 140-151, 2021.
- [13] A. D. Pilco Valente and H. D. Rodríguez Gaibor, "Análisis de un modelo de predicción del consumo instantáneo de combustible basado en señales de los sensores del sistema de inyección para el automóvil Chevrolet Aveo Family 1.5 L," ESPOCH, Riobamba, 2018.
- [14] E. J. Coronel Suárez, "Desarrollo de un algoritmo para la estimación del consumo

- de combustible en motores ciclo OTTO mediante un dispositivo de adquisición de datos a través de OBD II," Bachelor's thesis, 2018.
- [15] E. Llanes, J. Molina , S. Grefa and J. Rocha, "Incidencia del aire acondicionado automotriz en el índice de consumo de combustible en vehículo de encendido provocado en una ruta de la Amazonía ecuatoriana," *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 31, pp. 115-126, 2024.
- [16] B. A. Lima Oyola and E. J. Gálvez Sandoval, "Análisis de consumo de combustible de los vehiculos de categoría M1 que circulan en el centro histórico de la ciudad de Cuenca en horas de maxima demanda en función de ciclos de conducción," Bachelor's thesis, 2016.
- [17] B. D. Arpi Pañi and O. F. Ayora Loja , "Análisis de los niveles de CO en el habitáculo de vehículos subcategoría M1 en las rutas más transitadas de la ciudad de Cuenca. 2023," *Tesis de Licenciatura*, 2023.
- [18] E. Commission, Reglamento (CE) n.º 692/2008 de la Comisión, modificado por el Reglamento (UE) n.º 630/2012 de la Comisión, Official Journal of the European Union, L 173, 2008.
- [19] J. Morocho and D. Muñoz , "Propuesta metodológica para una conducción eficiente de vehículos tipo M1 a través de un análisis estadístico," Cuenca, 2019.
- [20] P. A. ZAPATA HERRERA, "Estudio comparativo de los algoritmos de filtrado adaptativo (LMS, NLMS, RLS) para la eliminación del ruido audible externo en tiempo real," Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, 2020.
- [21] F. Santana Robles, "Técnicas Estadísticas (DOE, RMS Y VRT) para el análisis de un modelo de simulación," Instituto de ciencias básicas e ingeniería, 2007.