



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

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA EN UN  
MOTOR CARBURADO COMO PLATAFORMA DE TRANSICIÓN HACIA EL USO  
DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS BASADOS EN HIDRÓGENO**

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

AUTORES: KLEBER JAVIER VILLÓN SUAREZ  
BYRON FRANCISCO ALCIVAR CALDERÓN  
TUTOR: ING. MARCELO ESTRELLA GUAYASAMÍN, PHD.

Guayaquil – Ecuador  
2026

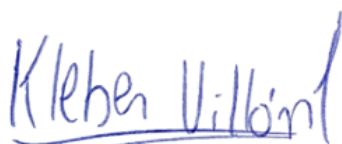
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Kleber Javier Villón Suarez con documento de identificación N° 0950080077 y Byron Francisco Alcivar Calderón con documento de identificación N° 0958283749; 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.

Guayaquil, 11 de Marzo del año 2026

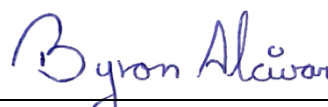
Atentamente,



---

Kleber Javier Villón Suarez

0950080077



---

Byron Francisco Alcivar Calderón

0958283749

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

Nosotros, Kleber Javier Villón Suarez con documento de identificación No. 0950080077 y Byron Francisco Alcivar Calderón con documento de identificación No. 0958283749 expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Implementación de un Sistema de Inyección Electrónica en un Motor Carburado como Plataforma de Transición Hacia el Uso de Combustibles Alternativos Basados en Hidrógeno”, 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.

Guayaquil, 11 de Marzo del año 2026

Atentamente,



---

Kleber Javier Villón Suarez

0950080077



---

Byron Francisco Alcivar Calderón

0958283749

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Marcelo Xavier Estrella Guayasamín con documento de identificación N° 1714460761, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA EN UN MOTOR CARBURADO COMO PLATAFORMA DE TRANSICIÓN HACIA EL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS BASADOS EN HIDRÓGENO , realizado por Kleber Javier Villón Suarez con documento de identificación N° 0950080077 y por Byron Francisco Alcivar Calderón con documento de identificación N° 0958283749, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 11 de Marzo del año 2026

Atentamente,



---

Marcelo Xavier Estrella Guayasamín

1714460761

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por darme la vida y la salud, permitiéndome superar cada reto académico y personal hasta llegar a este día.

A mi familia en general, porque su cariño ha sido el pilar sobre el cual he construido mi futuro. Especialmente a mi madre, María Suarez, por ser mi guía constante y mi ejemplo de perseverancia. Su enseñanza y apoyo han sido el motivo que ha impulsado cada uno de mis sueños.

A mi hermano, Eduardo Villón, por su apoyo constante, su lealtad y sus consejos oportunos que fueron mi motivación.

A mis abuelos, por inculcarme cada valor desde que era pequeño y por confiar siempre en mi capacidad. Su legado me acompaña en cada paso que doy.

Y finalmente, a Samantha, por ser mi compañera de ruta y mi apoyo en cada acierto y error, acompañándome con amor en cada paso de esta meta.

[Kleber Villón]

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, su guía ha sido fundamental para mantener la fe y la perseverancia durante todo este proceso.

A mis padres, Alexandra Calderón y Bairon Alcivar, quienes con su esfuerzo, sacrificio y amor incondicional han sido el pilar fundamental para que nuestra familia pueda salir adelante.

A mi hija, Alaia Alcivar Zapata, quien representa la mayor motivación de mi vida, su presencia ha sido una fuente constante de inspiración para seguir esforzándome, superándome cada día, con el propósito de brindarle un mejor futuro, demostrarle que con dedicación y esfuerzo es posible alcanzar las metas propuestas.

También dedico este logro a la madre de mi hija, por haber sido parte de este camino y de esta etapa importante de mi vida.

De manera muy especial, dedico este logro a mis abuelos, Silverio Calderón y Mariana Parrales, quienes fueron una parte fundamental en mi crianza y formación como persona. Sus enseñanzas, valores y amor dejaron una huella profunda en mi vida. Aunque hoy ya no se encuentran físicamente, su recuerdo permanece siempre presente en mi corazón.

Finalmente, dedico este logro a toda mi familia, quienes de una u otra manera han sido parte de mi crecimiento personal y profesional.

[Byron Alcivar]

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre, María Suarez, por ser quien hizo posible este sueño. Gracias por brindarme el estudio, por esforzarte siempre para que no me falte nada y por darme siempre lo mejor; este logro es el resultado de tu sacrificio y de la confianza que siempre pusiste en mí.

Agradezco a mi compañero y amigo, Byron Alcivar, por su compromiso inquebrantable y su trabajo constante. Gracias por apostar juntos por este tema de tesis, sabiendo que el camino no sería sencillo, y por ser el apoyo necesario en cada objetivo que nos propusimos alcanzar.

Agradezco al señor Lucho Cruz, por ser mi guía y mentor. Gracias por enseñarme con tanta paciencia cada secreto de los sistemas del vehículo, por resolver cada una de mis dudas y por estar siempre pendiente del desarrollo de mi tesis, ayudándome en todo lo que estuvo a su alcance en este proceso. Trabajar junto a usted permitió que todos los conocimientos teóricos y prácticos impartidos por los docentes cobraran vida y dieran fruto en la práctica.

Agradezco a mis familiares y conocidos, quienes depositaron su confianza en mis capacidades técnicas al permitirme intervenir y solucionar los fallos de sus vehículos durante este proceso, brindándome así la práctica necesaria para fortalecer mi criterio profesional.

Agradezco al Ing. Marcelo Estrella, por su invaluable orientación y por confiarme este tema de titulación. Agradezco profundamente su tiempo, su guía técnica en cada avance y, sobre todo, su motivación constante en esos momentos de bloqueo mental, impulsándome siempre a no rendirme y a superar cada desafío del proyecto.

Finalmente, agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana y a cada docente de la carrera de Ingeniería Automotriz, por compartir su conocimiento y ser parte de mi formación como profesional.

[Kleber Villón]

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, Alexandra Calderón y Bairon Alcívar, por su apoyo incondicional, sus enseñanzas, por ser el ejemplo de esfuerzo y dedicación que ha impulsado mi formación personal y profesional. Gracias por creer en mí, por brindarme siempre la motivación necesaria para continuar adelante.

A mi tía Mónica Calderón y a mi tío José Calderón, por sus consejos, apoyo, orientación en diferentes momentos de mi vida, los cuales contribuyeron significativamente a mi crecimiento personal.

Un agradecimiento especial a mi tutor de tesis, el Ingeniero Marcelo Estrella, por su orientación, paciencia y compromiso durante el desarrollo de este trabajo de titulación. A pesar de las dificultades presentadas durante el proceso, su apoyo constante y su confianza fueron fundamentales para lograr la culminación de este proyecto.

Asimismo, agradezco a mi amigo y compañero de tesis, Kleber Villón, con quien compartí esta experiencia académica llena de retos, aprendizajes, nuevas experiencias que contribuyeron al desarrollo y finalización de este trabajo.

Finalmente, expreso mi agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, así como a cada uno de los docentes que integran y representan la carrera de Ingeniería Automotriz en la ciudad de Guayaquil, quienes, con su conocimiento, experiencia, dedicación aportaron significativamente a mi formación académica y profesional.

[Byron Alcivar]

## RESUMEN

La descarbonización del transporte impulsa la necesidad de experimentar con nuevas fuentes de energía como el hidrógeno; sin embargo, la investigación en esta área requiere plataformas de prueba versátiles y de control preciso, una limitación común en motores carburados. Por ello, el presente proyecto se centra en la implementación de un sistema de inyección electrónica (EFI) programable en un motor estacionario, sustituyendo su carburador original para crear una base tecnológica apta para la transición hacia combustibles alternativos. El desarrollo metodológico se estructuró en fases secuenciales. Primero, se estableció una línea base operativa mediante el diagnóstico y la medición de emisiones del motor en su estado carburado. Segundo, se integró el hardware EFI compuesto por sensores (CKP, MAP, IAT, CHT, O<sub>2</sub>), actuadores y una ECU EMS Plus, realizando las adaptaciones mecánicas y el diseño del arnés eléctrico. Tercero, se llevó a cabo la calibración de los mapas de combustible y encendido, validando el sistema mediante pruebas comparativas de gases según la normativa técnica aplicable. Los resultados demostraron que la conversión a EFI permitió estabilizar la relación aire-combustible, logrando una reducción de emisiones de 67,39% de CO, 69,57% de reducción de HC y un incremento significativo en la concentración de CO<sub>2</sub> hasta alcanzar un promedio del 12% lo que evidencia una combustión mucho más completa y eficiente. Finalmente, se definieron los protocolos de seguridad y los mapas base para la futura inyección de mezclas gasolina-hidrógeno, brindando una plataforma experimental abierta para la investigación en transición energética.

**Palabras claves:** Conversión a EFI, Motor Estacionario, Hidrógeno, EMS Plus, Control de Emisiones.

## ABSTRACT

The decarbonization of transport drives the need to experiment with new energy sources such as hydrogen; however, research in this area requires versatile testing platforms and precise control, which is a common limitation in carbureted engines. Therefore, this project focuses on the implementation of a programmable electronic fuel injection (EFI) system in a stationary engine, replacing its original carburetor to create a technological base suitable for the transition toward alternative fuels. The methodological development was structured in sequential phases. First, an operational baseline was established by diagnosing and measuring engine emissions in its carbureted state. Second, the EFI hardware—consisting of sensors (CKP, MAP, IAT, CHT, O<sub>2</sub>), actuators, and a EMS Plus ECU—was integrated, performing mechanical adaptations and the electrical harness design. Third, the calibration of fuel and ignition maps was carried out, validating the system through comparative gas tests according to applicable technical regulations. The results showed that the switch to EFI stabilized the air-fuel ratio, achieving a 67.39% reduction in CO emissions, a 69.57% reduction in HC emissions, and a significant increase in CO<sub>2</sub> concentration to an average of 12%, indicating much more complete and efficient combustion. Finally, safety protocols and base maps were defined for the future injection of gasoline-hydrogen mixtures, providing an open experimental platform for research on energy transition.

**Key words:** EFI Conversion, Stationary Engine, Hydrogen, EMS Plus, Emissions Control.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>DEDICATORIA</b> .....	v
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	vi
<b>RESUMEN</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	x
<b>GLOSARIO</b> .....	xi
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xii
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	xiv
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES</b> .....	xv
<b>1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Descripción del Problema .....	2
1.2. Objetivos Generales y Específico .....	2
<b>2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b> .....	3
2.1. Plataforma Base, Motor Estacionario .....	3
2.2. Sistema de Inyección Electrónica .....	3
2.3. Selección del Sistema de Gestión Electrónica .....	12
2.4. Tipos de programación en la ECU (EMS Plus) .....	13
2.5. Mapa cartográfico .....	14
<b>3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA</b> .....	15
3.1. Cronograma .....	19
3.2. Presupuesto .....	19
<b>4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS</b> .....	20
4.1. Diagnóstico y línea base del motor en estado original. ....	20
4.2. Inspección y adecuación de componentes mecánicos. ....	20
4.3. Emisiones del motor con carburador. ....	21
4.4. Implementación del sistema de inyección electrónica (EFI). ....	22
4.4.2. Implementación del sistema de captación de giro. ....	25
<b>5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	38
5.1. Recomendaciones .....	39
<b>REFERENCIAS</b> .....	41

**GLOSARIO**

<b>ECU</b>	Unidad electrónica que gobierna inyección y encendido.
<b>EFI</b>	Inyección electrónica de combustible.
<b>VE</b>	Eficiencia Volumétrica.
<b>CKP</b>	Sensor de posición del cigüeñal.
<b>TPS</b>	Posición de mariposa del acelerador.
<b>MAP</b>	Presión absoluta del múltiple de admisión.
<b>IAT</b>	Temperatura del aire de admisión.
<b>CHT</b>	Temperatura de la culata (°C).
<b>O<sub>2</sub></b>	Sensor de oxígeno.
<b>TBI</b>	Cuerpo de aceleración Monopunto.
<b>IAC</b>	Control de aire de ralentí.
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto.
<b>AFR</b>	Relación aire–combustible.
<b><math>\lambda</math> (Lambda)</b>	AFR normalizado.
<b>CO</b>	Monóxido de carbono.
<b>HC</b>	Hidrocarburos no quemados.
<b>NO<sub>x</sub></b>	Óxidos de nitrógeno.
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrógeno.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1.</b> Motor estacionario 6.5 HP.....	3
<b>Fig. 2.</b> Cuerpo de aceleración TBI.....	4
<b>Fig. 3.</b> Sensor de posición del cigüeñal – CKP.....	5
<b>Fig. 4.</b> Sensor de presión absoluta del múltiple – MAP. ....	6
<b>Fig. 5.</b> Sensor de oxígeno – O <sub>2</sub> . ....	7
<b>Fig. 6.</b> Sensor de temperatura del motor – CHT.....	8
<b>Fig. 7.</b> Válvula de Control de Aire en Ralentí – IAC. ....	9
<b>Fig. 8.</b> Sensor de posición de la mariposa de aceleración – TPS.....	9
<b>Fig. 9.</b> Bobina de encendido. ....	10
<b>Fig. 10.</b> Inyector.....	11
<b>Fig. 11.</b> Unidades de control.....	12
<b>Fig. 12.</b> Matriz de decisión. ....	13
<b>Fig. 13.</b> Unidad de control programable EMS Plus.....	14
<b>Fig. 14.</b> Mapa cartográfico.....	15
<b>Fig. 15.</b> Flujograma metodológico.....	16
<b>Fig. 16.</b> Estado inicial del motor.....	20
<b>Fig. 17.</b> Carburador.....	21
<b>Fig. 18.</b> Motor estacionario adecuado para prueba de emisiones. ....	21
<b>Fig. 19.</b> Medición de emisiones del motor carburado. ....	22
<b>Fig. 20.</b> Adaptación y manufactura del sistema de admisión. ....	24
<b>Fig. 21.</b> Acople plenum de admisión. ....	24
<b>Fig. 22.</b> Montaje definitivo del sistema de admisión al bloque del motor.....	25
<b>Fig. 23.</b> Alineación e instalación del sensor CKP. ....	25
<b>Fig. 24.</b> Diagrama de distribución de pines del conector principal de la Ecu EMS Plus. ....	26
<b>Fig. 25.</b> Diagrama de alimentación de potencia y masas.....	26
<b>Fig. 26.</b> Diagrama de encendido por bobinas independientes. ....	27
<b>Fig. 27.</b> Diagrama de interconexión de sensores. ....	27
<b>Fig. 28.</b> Armado de arnés.....	28
<b>Fig. 29.</b> Configuración base del motor. ....	29
<b>Fig. 30.</b> Tabla de calibración tridimensional, tiempo de inyección.....	32
<b>Fig. 31.</b> Tabla de calibración tridimensional, avance de encendido. ....	32
<b>Fig. 32.</b> Tabla de calibración tridimensional, tiempo de inyección, Gasolina-H <sub>2</sub> .....	34

<b>Fig. 33.</b> Tabla de calibración tridimensional, avance de encendido, gasolina-H <sub>2</sub> . .....	35
<b>Fig. 34.</b> Medición de emisiones del motor con inyección electrónica.....	36

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>TABLA 1</b> FICHA TÉCNICA MOTOR ESTACIONARIO 200 CC.....	4
<b>TABLA 2</b> ESPECIFICACIONES TÉCNICAS BRAIN BEE AGS-688 .....	18
<b>TABLA 3</b> CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	19
<b>TABLA 4</b> GASTOS APROXIMADOS.....	20
<b>TABLA 5</b> EMISIONES CONTAMINANTES PROMEDIO DEL MOTOR CON SISTEMA DE CARBURADOR. ....	22
<b>TABLA 6</b> CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES .....	23
<b>TABLA 7</b> TABLA DE DATOS – CÁLCULO TIEMPO DE INYECCIÓN.....	30
<b>TABLA 8</b> EMISIONES CONTAMINANTES PROMEDIO DEL MOTOR CON SISTEMA EFI.....	36
<b>TABLA 9</b> LÍMITES MÁXIMOS DE EMISIONES PERMITIDAS PARA MOTOCICLETAS Y TRICIMOTOS. PRUEBA ESTÁTICA EN RALENTÍ.....	36

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1.</b> Determinación de la masa de aire .....	30
<b>Ecuación 2.</b> Masa de combustible requerido por ciclo .....	30
<b>Ecuación 3.</b> Constante de caudal de masa por unidad de tiempo .....	30
<b>Ecuación 4.</b> Determinación del tiempo de inyección base.....	31

## 1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La industria automotriz mundial se encuentra en una encrucijada tecnológica, impulsada por la urgente necesidad de reducir la huella de carbono y mejorar la calidad del aire en los entornos urbanos. Si bien la movilidad eléctrica gana terreno, la realidad de muchos países en desarrollo es que los motores de combustión interna continuarán siendo una tecnología predominante durante las próximas décadas. Por lo tanto, el reto ingenieril actual no es solo reemplazar estos motores, sino optimizarlos para que operen con la máxima eficiencia posible y sirvan como puente hacia el uso de combustibles limpios.

En este escenario, la tecnología de Inyección Electrónica de Combustible (EFI) se ha establecido como el estándar indiscutible frente a los sistemas tradicionales de carburación. A diferencia del carburador, que depende exclusivamente de principios mecánicos y de la depresión del aire para dosificar el combustible lo que a menudo resulta en mezclas imprecisas y mayores emisiones, la inyección electrónica utiliza una gestión digital basada en sensores. Esto permite calcular la cantidad exacta de combustible necesaria milisegundo a milisegundo, adaptándose a las condiciones cambiantes de carga, temperatura y presión atmosférica.

Sin embargo, la importancia de dominar esta tecnología va más allá de la simple eficiencia con gasolina. La inyección electrónica es el requisito técnico indispensable para experimentar con combustibles alternativos, específicamente el hidrógeno. El uso de hidrógeno en motores de combustión ( $H_2ICE$ ) presenta desafíos técnicos complejos, como el riesgo de pre-ignición y la necesidad de mezclas extremadamente pobres, que son imposibles de gestionar de manera segura con un carburador convencional.

En el ámbito académico, es fundamental que los estudiantes de ingeniería no solo comprendan la teoría de estos sistemas, sino que tengan acceso a plataformas abiertas donde puedan modificar y controlar los parámetros de inyección. A menudo, los equipos didácticos comerciales son "cajas negras" cerradas que no permiten la experimentación profunda. Este trabajo propone la modernización de un motor estacionario común, transformándolo de una máquina mecánica obsoleta a una plataforma de investigación digital y programable, sentando las bases prácticas para futuras investigaciones en tecnologías de hidrógeno y descarbonización.

## 1.1. Descripción del Problema

En la actualidad, la industria automotriz opera casi en su totalidad con sistemas de inyección electrónica (EFI) para cumplir con los estándares de eficiencia y emisiones. Sin embargo, esta masificación tecnológica presenta una barrera significativa en el entorno académico: los motores y vehículos disponibles en los laboratorios universitarios cuentan con Unidades de Control Electrónico (ECU) de arquitectura cerrada o "caja negra". Estos sistemas comerciales no permiten el acceso a los mapas de gestión del motor, impidiendo que los estudiantes e investigadores modifiquen parámetros críticos como los tiempos de inyección o las curvas de encendido en tiempo real [1]

Esta restricción tecnológica se convierte en un obstáculo mayor cuando se busca incursionar en el uso de combustibles alternativos, específicamente el hidrógeno. La operación segura de un motor con mezclas de hidrógeno requiere estrategias de control muy específicas y flexibles para mitigar riesgos como la detonación (knock) o el retroceso de llama, algo que es imposible de configurar en una ECU convencional de fábrica bloqueada [2]

Por otro lado, aunque los motores estacionarios pequeños (como el utilizado en este proyecto) son ideales para la experimentación por su bajo costo y simplicidad mecánica, estos suelen venir equipados de fábrica con sistemas de carburación mecánica. En su estado original, esta tecnología resulta obsoleta para fines de investigación moderna, ya que carece de la precisión y la capacidad de adquisición de datos necesarias para validar estudios científicos [3, 4]

## 1.2. Objetivos Generales y Específico

### Objetivo General

- Implementar un sistema de inyección electrónica en un motor de combustión interna carburado como base tecnológica para su futura adaptación a combustibles alternativos

### Objetivos específicos

- Implementar el sistema EFI en el motor carburado, incorporando sensores MAP, IAT, CHT, O<sub>2</sub> y una ECU programable para la dosificación de la mezcla.
- Evaluar el impacto ambiental del sistema implementado cuantificando CO, CO<sub>2</sub> y HC, mediante comparativa estadística bajo condiciones de motor carburado vs motor EFI.

- Proponer un mapa cartográfico que potencie la mejora hacia mezclas gasolina-H<sub>2</sub> definiendo parámetros y lineamientos de seguridad para futuras pruebas orientadas a H<sub>2</sub>

## 2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Plataforma Base, Motor Estacionario

Este es un motor monocilíndrico de encendido provocado, de válvulas en cabeza (OHV) y refrigerado por aire como se muestra en la Figura 1, ampliamente utilizado en aplicaciones estacionarias como generadores, bombas y equipos de jardinería, de fábrica, este motor emplea un sistema de carburador sencillo, un encendido por magneto transistorizado y un gobernador mecánico de velocidad que le permite mantener un régimen de giro constante bajo distintas cargas. Además, destaca por su durabilidad y facilidad de mantenimiento, lo que lo convierte en una opción popular en entornos donde se requiere un motor confiable y de larga vida útil [5].



**Fig. 1.** Motor estacionario 6.5 HP [6].

Los datos técnicos y las principales características del motor estacionario 200cc se presentan en la Tabla 1, donde se detallan los parámetros fundamentales de diseño y operación que servirán como referencia para el análisis desarrollado en este estudio.

### 2.2. Sistema de Inyección Electrónica

Para la gestión integral de la mezcla aire-combustible, se seleccionó e implementó un cuerpo de aceleración tipo TBI (Throttle Body Injection), el cual reemplaza al carburador original del motor. Como se observa en la Figura 2, este componente fue elegido por su diseño

compacto y su alta integración tecnológica, características ideales para la adaptación en un motor estacionario. La unidad no solo incorpora la válvula mariposa para el control volumétrico del flujo de aire, sino que también aloja directamente el inyector de combustible y un módulo de sensores [7].

**TABLA 1** FICHA TÉCNICA MOTOR ESTACIONARIO 200 CC [5].

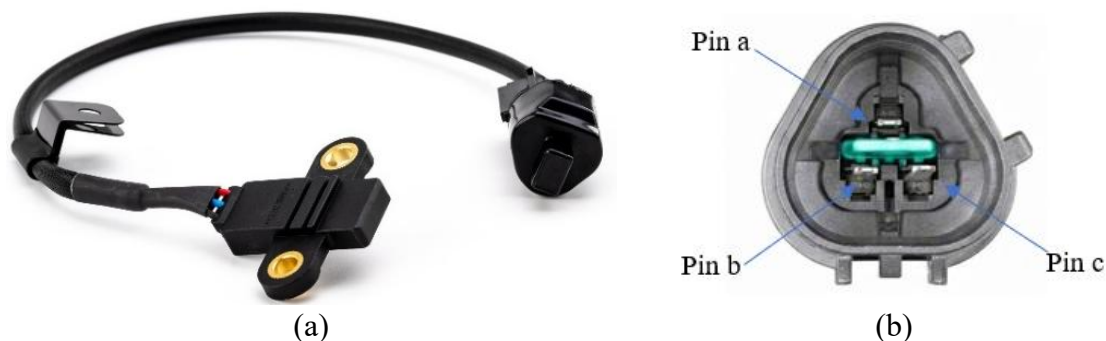
<b>Categoría</b>	<b>Descripción</b>
Cilindrada	196 cm <sup>3</sup>
Diámetro x carrera	68 mm × 54 mm
Relación de compresión	8.5:1
Potencia máxima	4.8 kW (6.5 HP) a 3600 rpm
Par máximo	13.2 N·m a 2500 rpm
Sistema de arranque	Manual por cuerda retráctil
Sistema de encendido	Magneto transistorizado
Sistema de alimentación	Carburador de chorro fijo
Consumo específico	Aprox. 395 g/kWh
Capacidad de aceite	0.6 L
Régimen nominal de operación	3600 rpm
Sentido de giro	Antihorario
Peso aproximado	16 g



**Fig. 2.** Cuerpo de aceleración TBI.

#### 2.2.1. Sensor de Posición del Cigüeñal.

En el sistema EFI propuesto para el motor estacionario se emplea un conjunto de sensores automotrices que convierten magnitudes físicas en señales eléctricas compatibles con la ECU EMS Plus. El sensor de posición del cigüeñal es del tipo efecto Hall de tres cables, enfrentado a una rueda fónica solidaria al cigüeñal [8]. (Figura 3a)



**Fig. 3.** Sensor de posición del cigüeñal – CKP, a) Imagen del sensor y b) Pines de conexión, Pin a: +5 V, Pin b: Masa, c) Pin c: Señal

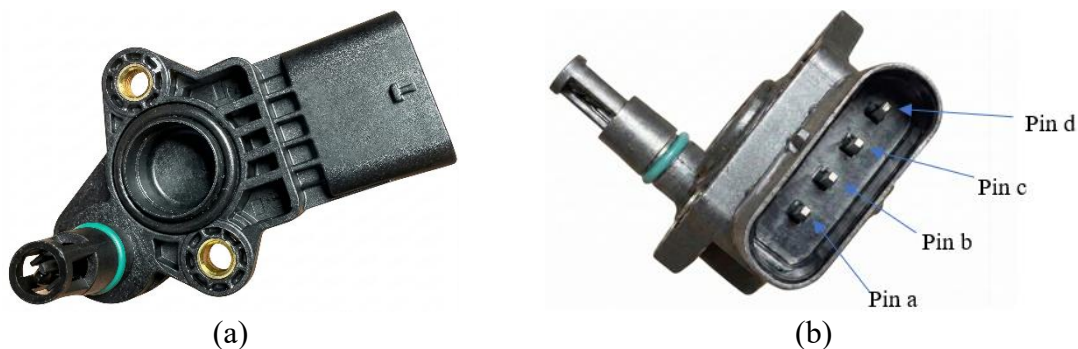
El sensor de posición del cigüeñal (CKP) de efecto Hall constituye el componente crítico para la sincronización del encendido y la inyección, operando mediante una configuración de tres conexiones que permite la generación de una señal digital precisa y estable frente a las variaciones de régimen; en este contexto, el Pin de Alimentación de Potencia recibe un voltaje continuo, de 5V DC dependiendo del diseño, para energizar el circuito integrado interno y el elemento semiconductor.

Pin de Tierra retorna a la masa aislada de la ECU para cerrar el circuito de alimentación sin introducir ruido eléctrico que pueda degradar la lectura. Finalmente, el Pin de Señal envía una onda cuadrada de frecuencia variable directamente hacia el circuito acondicionador de entrada de la unidad de control, permitiendo que la ECU EMS Plus interprete el paso de los dientes de la rueda fónica para determinar con exactitud la posición angular del cigüeñal y las revoluciones por minuto del motor, garantizando una entrega de chispa sincronizada incluso en condiciones de alta exigencia, tal como se ilustra en la Figura 3b.

### 2.2.2. Sensor de Presión Absoluta del Múltiple.

Es un transductor piezorresistivo de presión que, mediante una membrana deformable y un puente de galgas, tal como se aprecia en la Figura 4a; este sensor ayuda a la ECU estimar la carga del motor [9].

Este sensor es el principal indicador de carga del motor en los sistemas de gestión que utilizan el algoritmo de estimación de flujo de aire por Densidad-Velocidad.



**Fig. 4.** Sensor de presión absoluta del múltiple – MAP, a) Imagen del sensor y b) Pines de conexión, Pin a: Masa, Pin b: señal sensor IAT, Pin c: +5 V, Pin d: Señal sensor MAP

El sensor MAP integra sus funciones mediante una interfaz de cuatro conexiones que permite una gestión precisa del flujo y la densidad del aire; inicialmente, el Pin 1 - Masa (Ground) proporciona la tierra de referencia que proviene directamente de la ECU, mientras que el Pin 2 - NTC / Temperatura (IAT) transmite la señal de temperatura operando mediante un termistor donde el voltaje recibido por la unidad de control varía en función de los cambios térmicos.

Este sensor es el principal indicador de carga del motor en los sistemas de gestión que utilizan el algoritmo de estimación de flujo de aire por Densidad-Velocidad.

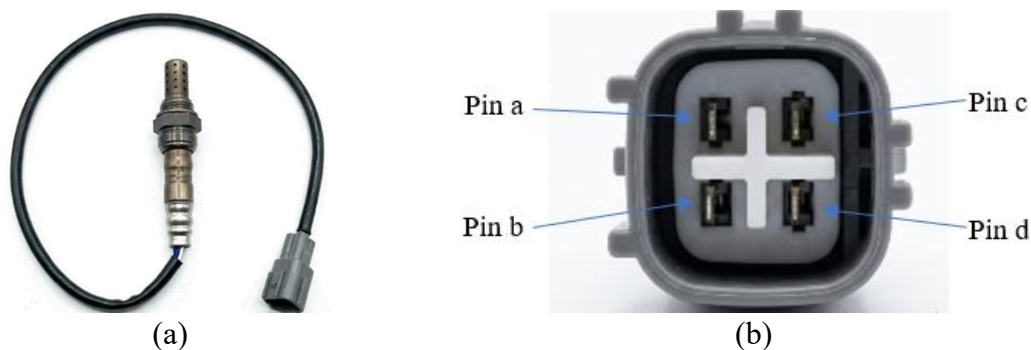
El sensor MAP integra sus funciones mediante una interfaz de cuatro conexiones que permite una gestión precisa del flujo y la densidad del aire; inicialmente, el Pin 1 - Masa (Ground) proporciona la tierra de referencia que proviene directamente de la ECU, mientras que el Pin 2 - NTC / Temperatura (IAT) transmite la señal de temperatura operando mediante un termistor donde el voltaje recibido por la unidad de control varía en función de los cambios térmicos.

Todo esto alimentado a través del Pin 3 - Alimentación (+5V) que entrega un voltaje de referencia constante para el circuito interno, y finalmente el Pin 4 - Señal de Presión (MAP) emite un voltaje de salida que fluctúa según el vacío presente en el cuerpo de aceleración para indicar a la ECU la carga del motor y así calcular el tiempo de inyección, tal como se detalla en la Figura 4b.

### 2.2.3. Sensor de Oxígeno.

Para el control de la mezcla se utiliza una sonda de oxígeno ( $O_2$ ) de circonio calefaccionada, de tipo banda ancha, instalada en el escape, según se muestra en la Figura 5a. Esta sonda mide la concentración de oxígeno residual y, a través de un módulo controlador, proporciona

a la ECU una señal que permite mantener la relación aire-combustible cercana al valor objetivo [10].



**Fig. 5.** Sensor de oxígeno – O<sub>2</sub>, a) Imagen del sensor y b) Pines de conexión, Pin a: Señal analógica, Pin b: Tierra de señal, Pin c: Alimentación de potencia, Pin d: Tierra de potencia.

El sensor de oxígeno de banda estrecha opera mediante una configuración de cuatro terminales que garantiza una lectura precisa de la mezcla estequiométrica incluso desde el arranque en frío, gracias a su sistema de calefacción integrado; en este esquema, el Pin de Señal envía un voltaje oscilante de entre 0.1V y 0.9V a la ECU para indicar la concentración de oxígeno en los gases de escape.

El Pin de Tierra de Señal establece la referencia de masa necesaria para que la unidad de control interprete dicho voltaje sin interferencias. Para alcanzar rápidamente la temperatura de régimen (aproximadamente 300°C), el Pin de Calentador recibe alimentación eléctrica de 12V desde el relé principal del sistema, permitiendo que la resistencia interna caliente el elemento cerámico de dióxido de zirconio, cerrando finalmente el circuito a través del segundo Pin de Calentador que actúa como masa para la resistencia calefactora, todo lo cual asegura un control de lazo cerrado eficiente y una reducción significativa de las emisiones contaminantes, tal como se detalla en la Figura 5b.

#### 2.2.4. Sensor de Temperatura del Motor.

Las variables térmicas se registran mediante sensores de temperatura de tipo termistor NTC, como se indica en la Figura 6a. El sensor de temperatura (CHT) reduce su resistencia eléctrica al aumentar la temperatura, lo que se traduce en una tensión que la ECU interpreta para enriquecer la mezcla en frío y proteger el motor a alta temperatura [11].

El sensor de temperatura del refrigerante (ECT) basa su funcionamiento en un termistor de coeficiente de temperatura negativo (NTC) que permite a la unidad de control monitorear la eficiencia térmica del motor mediante una configuración de dos terminales de alta

precisión; en este esquema, el Pin 1 (Señal y Alimentación) se conecta a la entrada analógica específica de temperatura de la ECU, la cual suministra internamente un voltaje de referencia de 5V que experimenta una caída de tensión proporcional a la resistencia del sensor según varía el calor del motor.



**Fig. 6.** Sensor de temperatura del motor – CHT, a) Imagen del sensor y b) Pines de conexión, Pin a: Alimentación, Pin b: Tierra.

El Pin 2 (Tierra de Sensor) retorna a la línea de masa aislada y exclusiva para sensores de la ECU con el fin de garantizar una medición estable y libre de ruidos eléctricos o interferencias generadas por otros componentes de potencia, permitiendo así que el sistema de gestión motor ajuste con exactitud el enriquecimiento de la mezcla y el tiempo de encendido durante la fase de calentamiento, tal como se ilustra en la Figura 6b.

#### 2.2.5. Válvula de Control de Aire en Ralentí.

La función de este actuador electromecánico es regular de manera precisa el volumen de aire que ingresa al múltiple de admisión cuando la mariposa del acelerador se encuentra totalmente cerrada, permitiendo a la unidad de control mantener un régimen de ralentí estable bajo cualquier condición. (Figura 7a).

Actúa mediante un émbolo o válvula de aguja que se desplaza linealmente para abrir o restringir el paso de aire en el conducto de derivación. En los cuerpos de aceleración de este tipo, el mecanismo este accionado por un motor paso a paso. El motor paso a paso permite un control micrométrico de la posición del émbolo, otorgando a la ECU la capacidad de realizar ajustes muy finos en el flujo de aire [12].

La válvula de control de aire de marcha mínima (IAC) de tipo motor a pasos basa su funcionamiento en una configuración de doble devanado que permite un control extremadamente preciso sobre el flujo de aire en derivación; en este sentido, los Pines de la

Bobina A (A+ y A-) reciben pulsos eléctricos de polaridad alternante enviados directamente desde el controlador de la ECU, mientras que, de manera simultánea.



**Fig. 7.** Válvula de Control de Aire en Ralentí – IAC, a) Imagen del sensor y b) Pines de conexión, Pin a-Pin b: Bobinado 1, Pin c-Pin d: Bobinado 2.

Los Pines de la Bobina B (B+ y B-) reciben pulsos desfasados electrónicamente respecto a la Bobina A, lo cual es fundamental para generar el campo magnético rotativo necesario que obliga al rotor interno a girar en pasos discretos y, mediante un mecanismo interno de tornillo sin fin, desplaza el émbolo hacia adelante o hacia atrás para obturar o liberar el conducto de bypass de aire, garantizando así la estabilidad del motor en diversas condiciones de carga, tal como se ilustra detalladamente en la Figura 7b.

#### 2.2.6. Sensor de Posición del Acelerador.

Representado esquemáticamente en la Figura 8a, es un potenciómetro rotativo de tres terminales acoplado al eje del acelerador; al variar la apertura de la mariposa cambia la fracción de tensión que llega a la ECU, indicando tanto la posición instantánea del pedal como los cambios bruscos de carga [9].



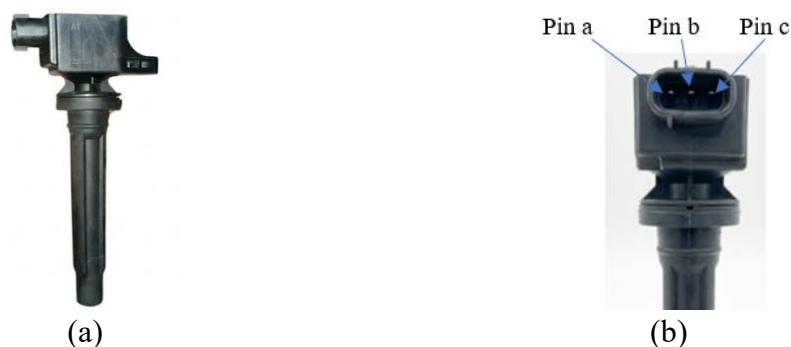
**Fig. 8.** Sensor de posición de la mariposa de aceleración – TPS, a) Imagen del sensor y b) Pines de conexión, Pin a: Alimentación, Pin b: Señal, Pin c: Tierra.

El sensor de posición del acelerador opera mediante una configuración de tres terminales que permite monitorear con precisión la carga del motor; en primera instancia, el

Pin de Alimentación recibe un voltaje de referencia estabilizado y regulado de 5V DC suministrado directamente por la unidad de control, mientras que el Pin de Señal Analógica emite el voltaje resultante hacia la ECU, el cual varía de forma proporcional a la apertura de la válvula registrando típicamente un valor cercano a 0.5V en ralentí y elevándose de manera progresiva hasta alcanzar aproximadamente 4.5V en aceleración a fondo, todo esto referenciado al Pin de Tierra que se conecta a la línea de retorno específica para sensores de la ECU, la cual se mantiene aislada de la masa del motor para evitar ruidos o interferencias eléctricas que puedan alterar la lectura, tal como se ilustra en la Figura 8b.

### 2.2.7. Bobina de Encendido.

En cuanto a los actuadores, el elemento principal del sistema de encendido es la bobina, que actúa como un transformador elevador como se ilustra en la Figura 9a. A partir de la señal de conmutación que entrega la ECU, la bobina acumula energía en su devanado primario y la descarga en el secundario, generando un pulso de alta tensión capaz de producir la chispa en la bujía en el momento definido por el mapa de encendido. La gestión electrónica del tiempo de carga o dwell permite asegurar una chispa estable incluso a altos regímenes de giro [10].



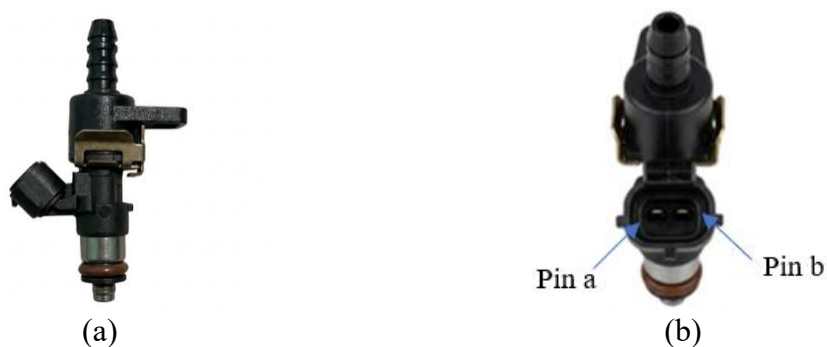
**Fig. 9.** Bobina de encendido, a) Imagen de bobina y b) Pines de conexión, Pin a: Alimentación, Pin b: Señal, Pin c: Tierra.

El sistema de encendido electrónico para el motor de pruebas se fundamenta en una bobina de alta eficiencia con módulo de potencia integrado, la cual opera mediante una configuración de tres terminales que permite una conmutación precisa y una descarga de chispa de alta energía; en este esquema, el Pin 1 (Alimentación de Potencia) recibe un voltaje continuo de 12V DC proveniente del relé principal de encendido para energizar el devanado primario.

Mientras que el Pin 2 (Tierra de Potencia) se conecta de forma firme y directa a la masa del bloque del motor o a la culata para cerrar el circuito de descarga y garantizar un retorno de corriente eficiente sin caídas de tensión significativas, todo esto coordinado a través del Pin 3 (Señal de Disparo), el cual recibe una señal lógica de baja corriente (TTL de 5V) emitida por el controlador de encendido de la ECU EMS Plus para determinar el momento exacto del salto de chispa y el tiempo de saturación, asegurando así una combustión óptima bajo las diversas condiciones de operación del motor, tal como se detalla en la Figura 9b.

#### 2.2.8. Inyector de Combustible Electromagnético.

Por su parte, el inyector de combustible es un actuador electromagnético de tipo solenoide, alimentado a 12 V, que abre una aguja al ser excitado por un pulso eléctrico proveniente de la ECU según se observa en la Figura 10a. La duración de este pulso determina el tiempo de apertura del inyector, por lo tanto, la masa de combustible pulverizada en el múltiple de admisión. El diseño del orificio y el ángulo de cono del chorro favorecen una adecuada atomización, mejorando la homogeneidad de la mezcla aire-combustible en el cilindro [13].



**Fig. 10.** Inyector, a) Imagen de inyector y b) Pines de conexión, Pin a: Alimentación, Pin b: Señal de control.

El inyector del sistema EFI se encuentra gobernado por una configuración de dos terminales que operan de manera coordinada para garantizar la atomización precisa del combustible; en el Pin 1, el componente recibe la alimentación de potencia mediante un voltaje continuo de 12V DC que proviene del relé principal del sistema desde el momento en que se energiza el circuito, mientras que el Pin 2 se conecta directamente a la etapa de potencia de la unidad de control, donde la ECU comanda la apertura del dispositivo mediante una señal de Modulación por Ancho de Pulso (PWM).

Este control se ejecuta mediante una conmutación a tierra, lo que significa que la ECU cierra el circuito a masa durante un intervalo de tiempo específico medido en milisegundos,

parámetro conocido técnicamente como ancho de pulso, tal como se detalla en la Figura 10b.

Conjuntamente, la información proporcionada por los sensores, el accionamiento preciso de la bobina y el inyector por parte de la ECU EMS Plus permiten obtener una imagen completa del estado de funcionamiento del motor estacionario, calcular el combustible y el avance de encendido adecuados en cada punto de operación.

### 2.3. Selección del Sistema de Gestión Electrónica



**Fig. 11.** Unidades de control. a) Megasquirt, b) EMS Plus, c) Fuel Tech

Para la implementación del sistema de control electrónico del motor monocilíndrico estacionario se evaluaron diferentes plataformas de unidades de control programables (ECU) ampliamente utilizadas en aplicaciones de investigación y modificación de motores, entre ellas tenemos: Megasquirt, FuelTech y EMS Plus. La comparación se realizó considerando criterios técnicos como la capacidad de procesamiento, compatibilidad con sensores y actuadores, facilidad de programación, flexibilidad para modificar estrategias de control y costos de implementación.

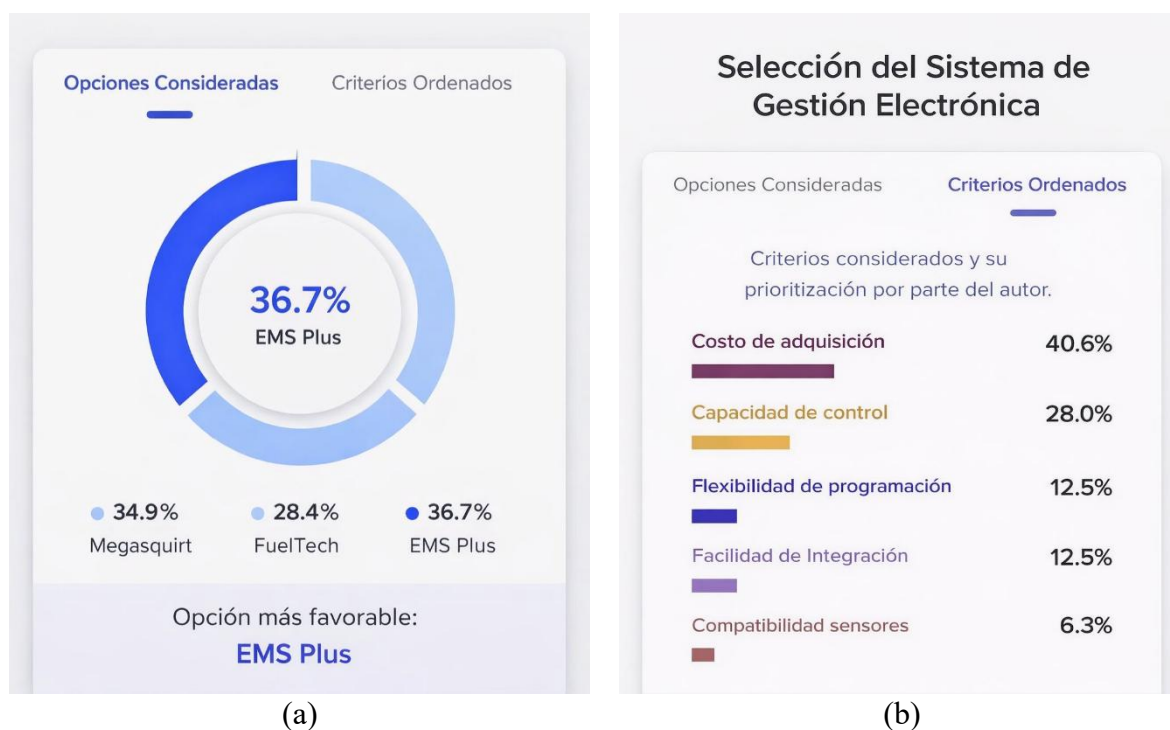
El módulo FuelTech (Figura 11c) se posiciona como solución comercial de alto desempeño, puesto que integra funciones avanzadas de monitoreo y visualización en sistemas cerrados que van orientados principalmente a aplicaciones de competición y alto rendimiento. Sin embargo, este tipo de sistemas implican mayores costos de adquisición y dependencia de periféricos propios de la marca, esto limita su uso en entornos experimentales o académicos donde se requiere mayor flexibilidad de configuración.

Por otro lado, el sistema de Megasquirt (Figura 11a) representa una alternativa ampliamente utilizada en proyectos de investigación y desarrollo debido a su arquitectura programable y su capacidad para gestionar tanto la inyección de combustible como el

encendido mediante mapas calibrables, permitiendo adaptar el control del motor a diferentes configuraciones y estrategias de combustión. Este tipo de ECU recibe información de sensores fundamentales como: presión absoluta del múltiple, posición del acelerador, temperatura y sensores de oxígeno, para calcular en tiempo real los parámetros óptimos de inyección y encendido del motor.

Así mismo, la EMS Plus (Figura 11b) se presenta como una solución intermedia que combina capacidad de control programable con una arquitectura más simple y económicamente accesible, lo que la convierte en la opción más adecuada para el presente proyecto ya que se busca mantener un equilibrio entre funcionalidad, facilidad de integración y viabilidad económica.

La opción más favorable para el estudio se muestra en la figura 12, la misma que se basa en una matriz de decisión multicriterio diseñada para justificar técnicamente la selección del módulo EMS Plus. La aplicación utilizada fue Decisión Mentor.



**Fig. 12.** Matriz de decisión. a) Opción considerada, b) Criterios ordenados.

#### 2.4. Tipos de programación en la ECU (EMS Plus)

La ECU EMS Plus (Figura 13) ofrece diferentes estrategias de cálculo de combustible que se adaptan a las características dinámicas del motor estacionario. En una programación basada en carga, comúnmente denominada estrategia Alpha-N, la unidad de control

determina la cantidad de combustible requerida principalmente a partir de la posición de la mariposa (TPS) y el régimen de giro (RPM). Este tipo de programación resulta útil en motores monocilíndrico donde la señal de presión en el múltiple de admisión suele presentar pulsaciones o inestabilidad, permitiendo una respuesta más directa y predecible ante cambios en la aceleración.

En la programación por volumen de aire, el cálculo se basa en la cilindrada del motor y en tablas de eficiencia volumétrica, que describen qué fracción del volumen teórico de aire entra realmente al cilindro en función del rpm y la carga; sobre esta base la ECU estima el volumen de aire aspirado y ajusta el tiempo de inyección [14].



**Fig. 13.** Unidad de control programable EMS Plus [15].

El uso del módulo EMS Plus facilita la integración de estas estrategias para optimizar la transición hacia el uso de combustibles alternativos. Al ajustar con precisión los mapas de inyección y el avance de encendido, la ECU permite compensar las variaciones en la densidad de la mezcla y la velocidad de llama, factores críticos en la plataforma de investigación de este proyecto. La correcta selección y calibración de estas metodologías de programación en la unidad electrónica es fundamental para mejorar el rendimiento térmico, reducir el consumo específico de combustible y minimizar las emisiones contaminantes del motor convertido a tecnología EFI [16].

## 2.5. Mapa cartográfico

El mapa cartográfico es la representación en forma de tabla o superficie tridimensional de los parámetros de control que utiliza la ECU de acuerdo con lo mostrado en la Figura 14, normalmente con el régimen de giro en un eje y la carga del motor (TPS o MAP) en el otro. En cada celda de este mapa se almacena un valor específico, como el tiempo de inyección

o el avance de encendido, que la EMS Plus interpola según las condiciones instantáneas de funcionamiento del motor estacionario [17].

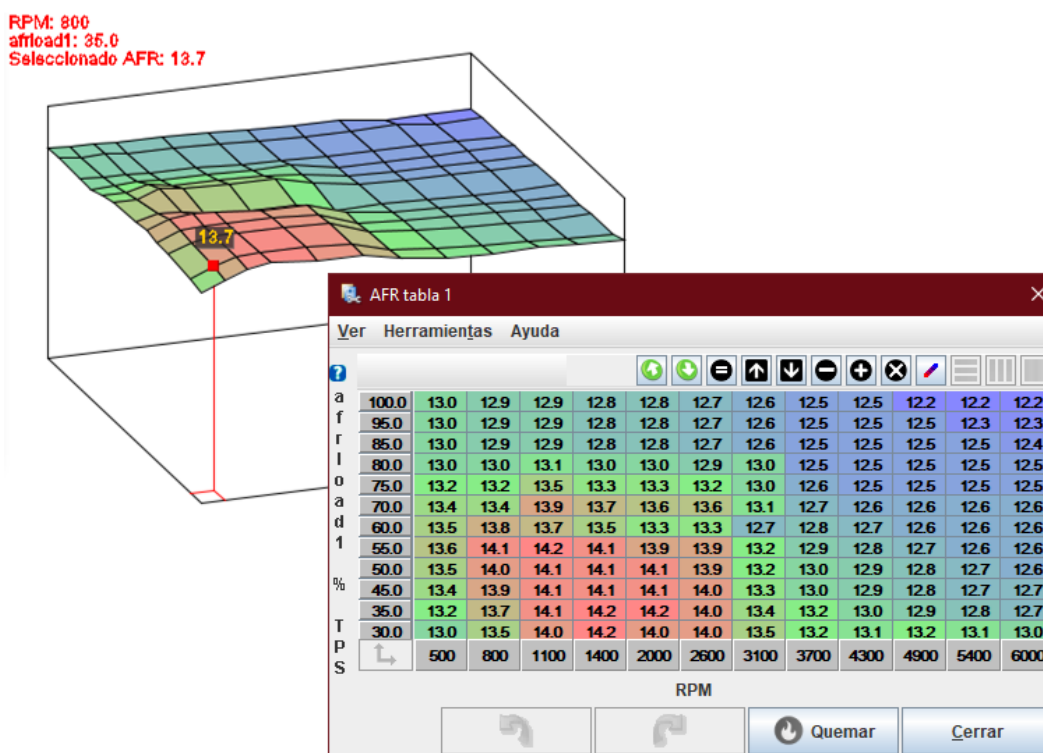


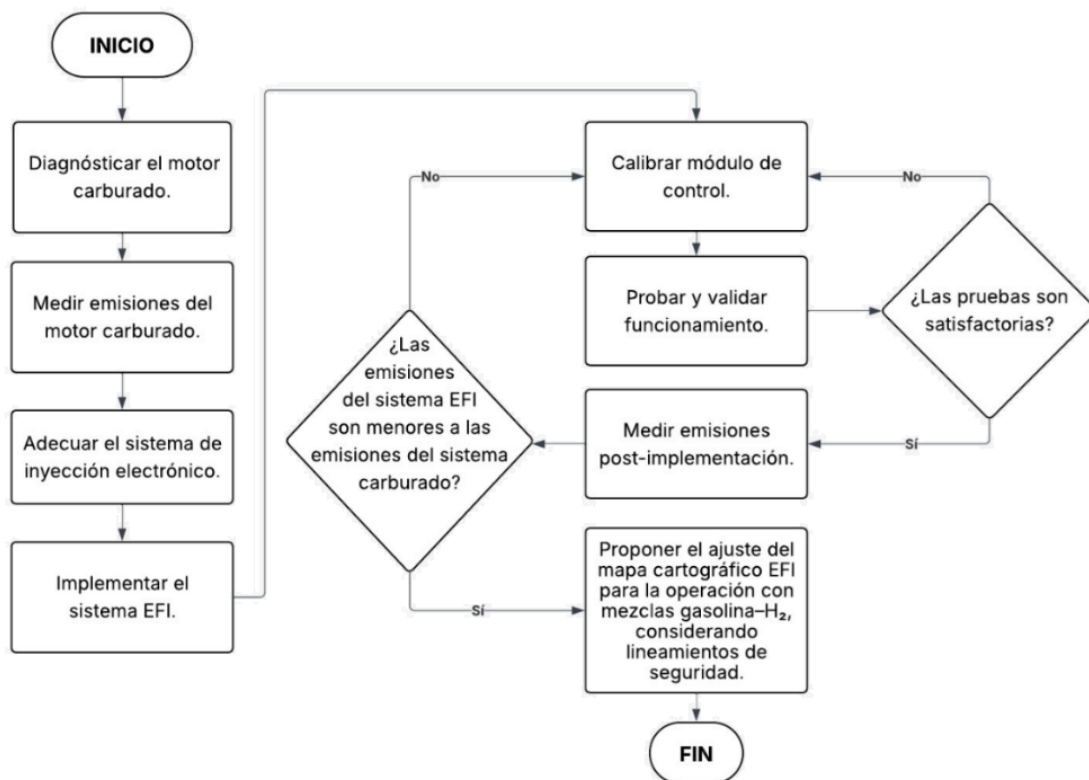
Fig. 14. Mapa cartográfico.

De este modo, para cada combinación de rpm y carga existe un punto de operación definido que busca la optimización de la potencia, consumo y emisiones. Durante el proceso de calibración del sistema EFI, el mapa cartográfico se va ajustando mediante pruebas iterativas en banco y mediciones de gases, corrigiendo aquellas zonas donde la mezcla resulta muy rica, muy pobre o el encendido provoca detonación o pérdida de rendimiento. El resultado final es un mapa afinado que convierte al motor estacionario en una plataforma estable y repetible para el estudio de mezclas convencionales y, posteriormente, de combustibles alternativos basados en hidrógeno [18].

### 3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

El proceso de conversión de un motor carburado a inyección electrónica (EFI) se organizó en ocho fases (Figura 15) las cuales permitieron alcanzar el objetivo de estudio. La plataforma se basó en una ECU programable modelo “EMS Plus” y un conjunto mínimo de sensores (CKP, TPS, MAP, IAT, CHT/ y sonda λ), configurada para operación en lazo cerrado.

Esta configuración implica un sistema de control con retroalimentación, donde la unidad de control ajusta continuamente la mezcla de aire y combustible en tiempo real basándose en la concentración de oxígeno residual medida por la sonda  $\lambda$  en el escape.



**Fig. 15.** Flujograma metodológico.

El proceso comenzó con el diagnóstico inicial del motor carburado, donde se realizó una inspección completa del estado operativo. Se verificaron parámetros como el funcionamiento del carburador, el estado de la bujía. Esta fase tuvo como finalidad establecer una línea base del rendimiento estándar, la cual sirvió para comparar los resultados obtenidos posteriormente con la incorporación del sistema de inyección. Durante esta etapa se buscó definir el valor mínimo de revoluciones registrando los valores de funcionamiento a ralentí y carga parcial, lo que permitió identificar posibles anomalías o pérdidas de eficiencia propias del sistema carburado.

Una vez completado el diagnóstico, se procedió a la medición de emisiones del motor en su estado inicial. Para ello se empleó un equipo de medición de gases (BRAIN BEE AGS-688) cuyas especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 2, con el cual se determinaron las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>),

hidrocarburos no quemados (HC), oxígeno (O<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) presentes en los gases de escape. Esta medición inicial es importante, ya que establece los niveles de contaminación generados por el sistema carburado y sirve como referencia comparativa para evaluar la efectividad del nuevo sistema EFI en la reducción de emisiones. Las pruebas se realizaron bajo condiciones estandarizadas de la norma RTE INEN 136 (R1), asegurando la reproducibilidad de los resultados.

Con los datos de referencia obtenidos, se desarrolló la etapa de selección e implementación del sistema de inyección electrónica. En esta fase se definieron los componentes necesarios para sustituir el sistema carburado, incluyendo inyector, bomba y regulador de presión de combustible, sensores electrónicos y la unidad de control electrónico (ECU). Los sensores que se utilizaron fueron: el sensor CKP, el sensor MAP, el sensor IAT, el sensor CHT y el sensor O<sub>2</sub>.

A continuación, se llevó a cabo la implementación del sistema EFI, reemplazando el carburador por el conjunto de inyección electrónica previamente seleccionado. En esta fase se instalaron físicamente todos los componentes, asegurando la correcta conexión eléctrica entre los sensores, inyectores, bobina de encendido y la EMS Plus. Se verificó el flujo adecuado hacia el inyector y la integridad del cableado. Asimismo, se configuraron los canales de entrada y salida de la ECU, asignando los pines correspondientes a cada sensor. Antes de iniciar las pruebas, se realizó una verificación mediante software especializado para confirmar que las lecturas de los sensores eran coherentes y que los actuadores respondían correctamente.

Luego, se procedió con la calibración y programación del módulo de control. En esta fase, la EMS Plus fue configurada con los parámetros específicos del motor, como la cilindrada, características del inyector, tiempos de apertura y avance de encendido. Se desarrollaron los mapas base de inyección y encendido, los cuales se ajustaron iterativamente mediante pruebas en diferentes condiciones de carga y velocidad. Durante este proceso se monitorearon las lecturas de los sensores, verificando la relación de las señales y la respuesta del motor ante variaciones de mezcla. Si se detectaban irregularidades, la calibración se repetía hasta lograr una estabilidad operativa adecuada. Esta etapa fue esencial para garantizar que el sistema EFI funcionara de manera precisa y segura bajo cualquier condición de operación.

Una vez finalizada la calibración, se realizaron las pruebas de funcionamiento y validación del sistema. El objetivo de esta etapa fue verificar la respuesta general del motor, la estabilidad de ralentí y el consumo de combustible. Si durante las pruebas se evidenciaban deficiencias o inconsistencias en la entrega de combustible o el control de encendido, se retornaba a la fase de calibración para efectuar los ajustes necesarios. Solo cuando las pruebas de funcionamiento fueron satisfactorias se procedió a la validación final mediante la medición de emisiones.

Posteriormente, se llevó a cabo la medición de emisiones post-implementación utilizando nuevamente el equipo de medición de gases, bajo las mismas condiciones de prueba aplicadas al motor carburado. En esta medición se registraron las concentraciones de CO, CO<sub>2</sub>, HC y O<sub>2</sub> con el fin de determinar la eficiencia del nuevo sistema de inyección en la reducción de contaminantes. Los resultados mostraron una disminución significativa en los niveles de emisiones respecto a las mediciones iniciales y se encontraban dentro de los límites máximos establecidos en el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 136 (1R) Motocicleta.

Tras validar la reducción de emisiones del sistema EFI, la fase final se centró en evaluar el potencial del motor para operar con mezclas gasolina-H<sub>2</sub> y definir su programación de inyección específica mediante el análisis de márgenes operativos, este proceso permitió establecer intervalos de operación segura. De este modo, se consolidó una plataforma experimental técnica, preparada para futuras investigaciones sobre el uso de hidrógeno en motores de combustión interna.

**TABLA 2** ESPECIFICACIONES TÉCNICAS BRAIN BEE AGS-688

<b>Parámetro</b>	<b>Rango de medición</b>	<b>Resolución</b>
Monóxido de Carbono (CO)	0 ÷ 9.99 % vol	0.01
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	0 ÷ 19.9 % vol	0.1
Hidrocarburos (HC)	0 ÷ 9999 ppm vol	1
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0 ÷ 25 % vol	0.01
Factor Lambda	0.5 ÷ 2.0	0.001
Revoluciones (RPM)	300 ÷ 9990 rpm	10
Temperatura del Aceite	20 ÷ 150 °C	1

### 3.1. Cronograma

En este apartado del cronograma, se detalla la secuencia temporal de las actividades del proyecto (Tabla 3). Asimismo, se muestra el plan de trabajo desde el inicio hasta la conclusión del estudio.

**TABLA 3 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES**

Actividades	Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero				Marzo
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1
Diseño del trabajo de titulación.	■	■	■	■																	
Desarrollo del anteproyecto.					■	■	■														
Diagnóstico inicial del motor carburado.							■	■													
Medición de emisiones del motor en su estado original.									■												
Implementación del sistema de inyección electrónica.										■			■								
Programación del módulo de control.														■							
Presentación de avance de la implementación.														■							
Pruebas de funcionamiento y validación del sistema.															■						
Analizar las mediciones de emisiones post-implementación del EFI.																■					
Defensa.																					■
Desarrollo del documento.			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				

### 3.2. Presupuesto

En esta sección se presenta el presupuesto financiero del proyecto (Tabla 4). Se detallan los costos unitarios, totales de los materiales y servicios requeridos, como la ECU, sensores y horas de laboratorio, reflejando una inversión total estimada de \$1600.00.

**TABLA 4 GASTOS APROXIMADOS.**

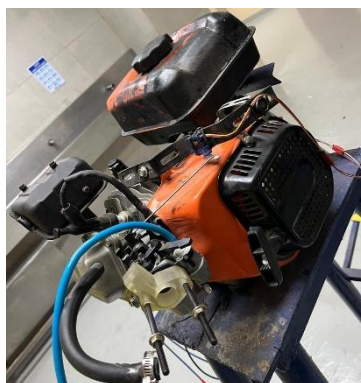
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Valor total</b>
ECU EMS Plus + Arnés	1	\$300.00	\$300.00
Caja de Fusibles Universal	1	\$35.00	\$35.00
Sensores y actuadores automotrices	1	\$180.00	\$180.00
Aceite 10W30	1	\$5.00	\$5.00
Movilización	1	\$70.00	\$70.00
Suministros de oficina	10	\$1.00	\$10.00
Uso de laboratorio	Hora	\$25.00	\$1000
<b>TOTAL</b>			<b>\$1600.00</b>

#### 4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto

##### 4.1. Diagnóstico y línea base del motor en estado original.

Previo a la conversión tecnológica, se estableció un protocolo de inspección y medición para determinar el estado operativo del motor estacionario en su configuración de fábrica, como se ilustra en la Figura 16. Esta fase permitió identificar las condiciones iniciales de los componentes mecánicos y cuantificar el nivel de emisiones contaminantes generado por el sistema de carburación, estableciendo así el punto de referencia para la evaluación comparativa.

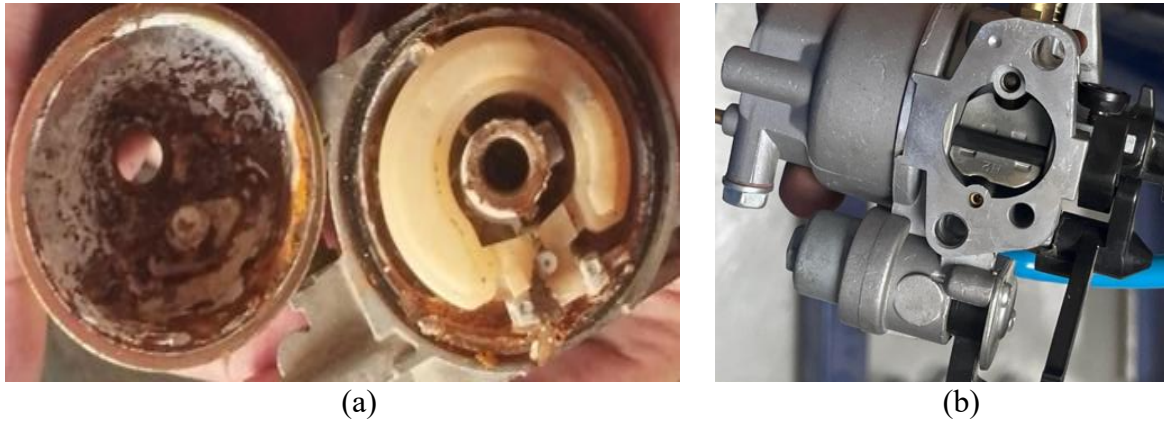


**Fig. 16.** Estado inicial del motor.

##### 4.2. Inspección y adecuación de componentes mecánicos.

Se llevó a cabo una inspección visual y funcional de los sistemas periféricos del motor, el diagnóstico se concentró en los sistemas de admisión y encendido, donde se identificaron y corrigieron las siguientes novedades para garantizar la validez de las pruebas posteriores:

El carburador original (Fig 17b) presentó acumulación de residuos, como se muestra en la (Figura 17a), por lo que se procedió a su desmontaje y limpieza integral para garantizar un flujo de combustible sin obstrucciones. Se verificó el estado de la bujía verificando que no exista depósitos de carbón excesivos.



**Fig. 17.** Carburador (a) en estado de deterioro inicial, y (b) en condiciones óptimas para su funcionamiento.

Como parte del acondicionamiento del motor para los ensayos, se instaló el sistema de filtrado de aire (depurador) y se configuró el varillaje de conexión entre el gobernador mecánico y el carburador. La integración de estos componentes, como se aprecia en la Figura 18, garantizó el correcto funcionamiento del control de revoluciones y protegió los elementos internos del motor durante las pruebas experimentales.



**Fig. 18.** Motor estacionario adecuado para prueba de emisiones.

#### 4.3. Emisiones del motor con carburador.

Una vez acondicionado el motor, se realizaron mediciones de gases de escape en condición de ralentí estabilizado (Figura 19). A partir de los datos obtenidos y procesados por el analizador de gases, se determinaron los siguientes valores promedio (Tabla 5) los cuales caracterizan el desempeño ambiental del motor antes de la conversión.



**Fig. 19.** Medición de emisiones del motor carburado.

**TABLA 5** EMISIONES CONTAMINANTES PROMEDIO DEL MOTOR CON SISTEMA DE CARBURADOR.

<b>Parámetro</b>	<b>Mues. 1</b>	<b>Mues. 2</b>	<b>Mues. 3</b>	<b>Mues. 4</b>	<b>Mues. 5</b>	<b>Promedio</b>
Régimen de giro (RPM)	960	965	971	976	983	971
Monóxido de Carbono (%Vol)	3.10	3,15	3,22	3,28	3,35	3,22
Hidrocarburos (ppm)	220	225	230	235	240	230
Oxígeno (%Vol)	1,4	1,43	1,46	1,48	1,53	1,46
Dióxido de Carbono (%Vol)	3.6	3.7	3.8	3.9	4	3.8

#### 4.4. Implementación del sistema de inyección electrónica (EFI).

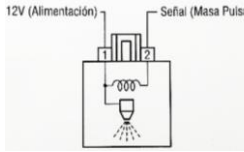
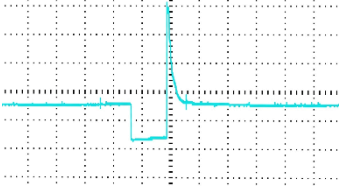
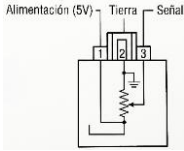
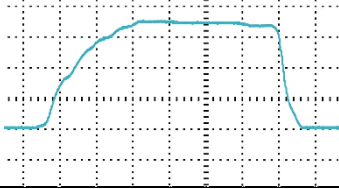
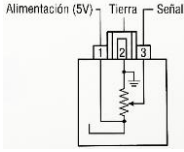
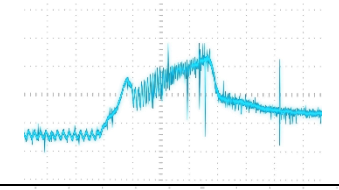
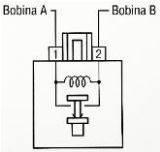
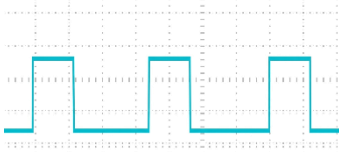
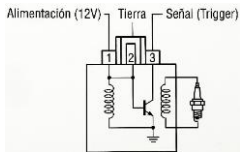
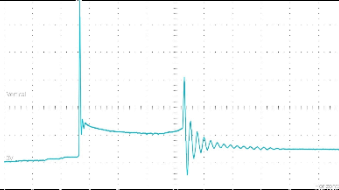
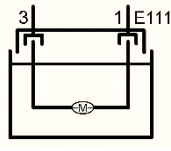
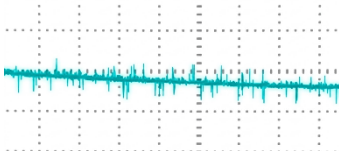
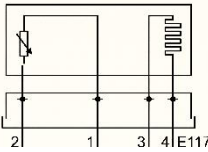
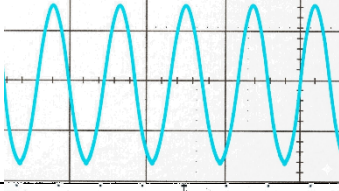
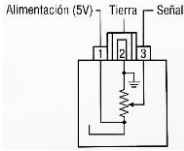
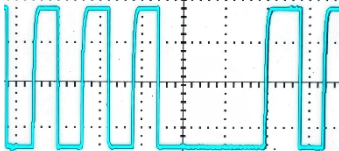
La fase de implementación consistió en la sustitución de los componentes mecánicos originales por los componentes del sistema EFI.

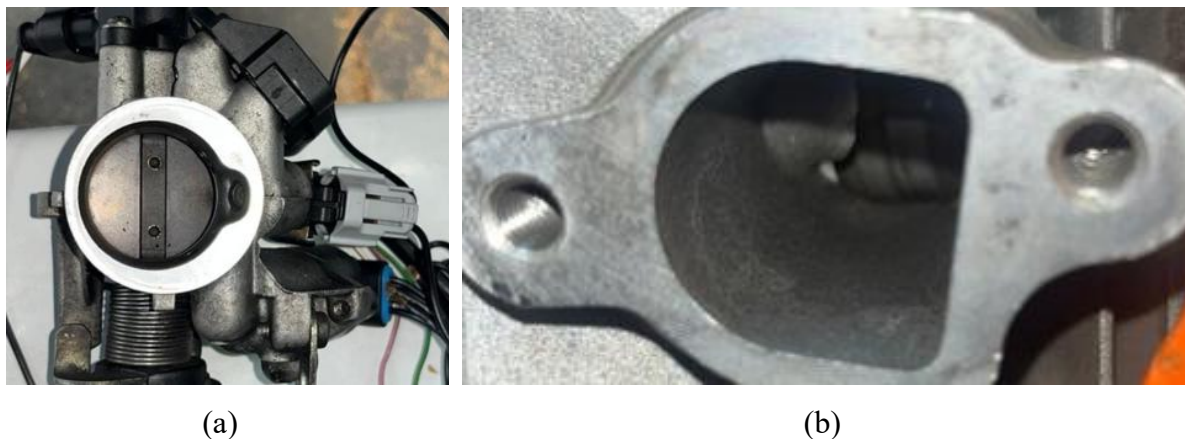
En la tabla 6 se presenta un resumen de la caracterización de los sensores implementados para el sistema EFI, con sus terminales, valores característicos y oscilograma de cada componente usado en la conversión.

##### 4.4.1. Adaptación y manufactura del sistema de admisión.

Para la gestión de la entrada de aire se seleccionó un cuerpo de aceleración tipo TBI, el cual integra la mariposa de admisión y el sensor de posición de esta. Sin embargo, su acople al puerto de admisión del motor estacionario necesito ser rediseñado debido a la incompatibilidad de diámetros y anclajes entre el cuerpo de aceleración en la (Figura 20a) con el puerto de la culata (Figura 20b).

**TABLA 6** CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES

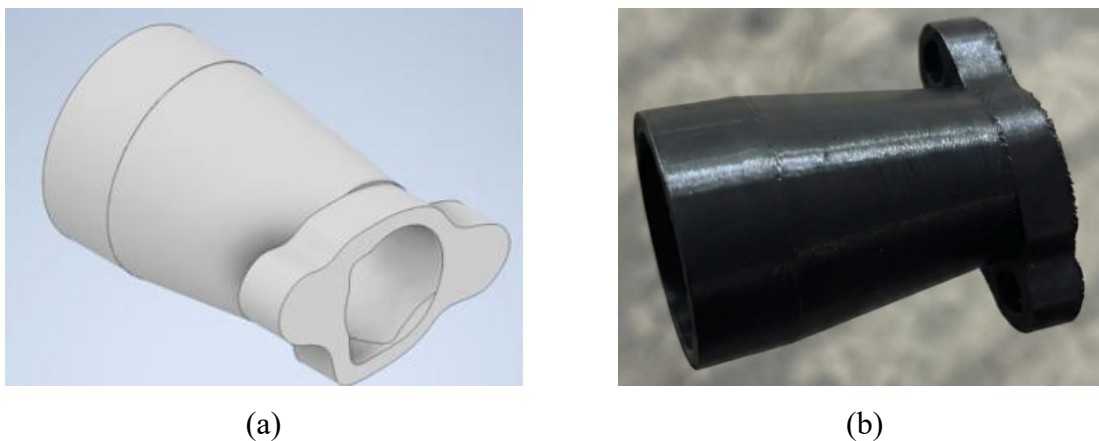
Elemento	Terminales	Valores Característicos	Oscilograma
Inyector		1 → 12 V 2 → 0.1 – 0.5 V	
Sensor de posición del acelerador		1 → 5 V 2 → 2.6 mV 3 → 0.5 – 4.5 V	
Sensor de Presión Absoluta del Múltiple		1 → 5V 2 → 2.6 mV 3 → 0.5 – 4.5 V	
Válvula de Control de Aire en Ralentí		1 → 12 V 2 → 0 – 12 V	
Bobina de encendido		1 → 12V 2 → 2.6mV 3 → 0.5 – 4.5V	
Sensor de Temperatura del motor		1 → 0.5 – 4.5V 2 → 2.6mV	
Sensor de Oxígeno		1 → 0 – 2.6 mV 2 → 0.1 – 0.9 V 3 → 3 – 12 V 4 → 4 – 0 V	
Sensor de posición de cigüeñal		1 → 5 V 2 → 2.6 mV 3 → 0.5 – 4.5 V	



**Fig. 20.** Adaptación y manufactura del sistema de admisión. (a) Cuerpo de aceleración TBI, y (b) admisión al motor.

Inicialmente, se proyectó la fabricación de una brida metálica mediante mecanizado en torno; no obstante, debido a la complejidad geométrica requerida y limitaciones de manufactura, se optó por una solución mediante manufactura aditiva (Impresión 3D).

La pieza de acople fue diseñada en Autodesk Inventor como se observa en la Figura 21a y fabricada utilizando Nylon reforzado con fibra de carbono (PA-CF) (Figura 21b). La selección de este material compuesto fue crítica, ya que el componente debe soportar las altas temperaturas transferidas por la culata del motor y la vibración operativa, condiciones que deformarían plásticos convencionales como el PLA o ABS.



**Fig. 21.** Acople plenum de admisión, (a) Diseño 3D -Autodesk Inventor y (b) Acople Manufacturado mediante impresión 3D

En la Figura 22, se detalla el montaje del sistema de admisión en el motor. La imagen muestra la disposición del cuerpo de aceleración, junto con sus sensores asociados, ya ubicado en su posición operativa. Esta configuración garantiza un sellado adecuado y una fijación firme de los componentes de admisión al motor.



**Fig. 22.** Montaje definitivo del sistema de admisión al bloque del motor.

#### 4.4.2. Implementación del sistema de captación de giro.

La instalación de la rueda fónica 30-2 (Figura. 23) para el sensor CKP.

En la Figura 23 se ilustra el montaje del sensor de posición del cigüeñal (CKP) sobre el soporte fabricado. Inicialmente, se verificó la alineación y el entrehierro (0,5mm) correcto respecto a la rueda fónica para asegurar una lectura precisa de la señal. Posteriormente, se procedió a la sujeción definitiva del componente mediante pernos, garantizando su estabilidad mecánica operativa.



**Fig. 23.** Alineación e instalación del sensor CKP.

#### 4.4.3. Diagrama eléctrico de la EMS Plus.

En la figura 24, se detalla la configuración del conector de 24 terminales, especificando la función de cada cable, su código de colores y la correspondencia lógica con la placa de circuito interno para la gestión electrónica.


Conector principal GNVPerformance EMS Plus										
Datos ECU			Datos conector				Datos ECU			
Pin Board	Grupo	Función	Color	Pin #	Conector	Pin #	Color	Función	Grupo	Pin Board
38	Aux	Tach	Blanco	24		12	Amarillo	Ignition 2	Output	22
29	Aux	TSC - Nitro in	Café	23		11	Gris	Ignition 1	Output	23
	Sensors	CMP+	Café	22		10	Gris	Boost - PWM aux	Aux	7
	Aux	QuickPower	Violeta	21		9	Verde	Injector 2	Output	9
	Sensors	CKP+	Azul	20		8	Azul	Injector 1	Output	8
	Sensors	IAT	Gris	19		7	Amarillo	Fuel Pump - PWM aux	Aux	4
	Sensors	CLT	Amarillo	18		6	Verde	PWM Idle	Aux	5
	Sensors	TPS	Blanco	17		5	Violeta	VVT - PWM aux	Aux	6
	Sensors	O2	Violeta	16		4	Negro	Ground	Power	
	Sensors	5v	Naranja	15		3	Negro	Ground	Power	
	Sensors	Ground sensor	Negro	14		2	Negro	Ground	Power	
	Aux	Launch - Flat shift	Azul	13		1	Rojo	12v	Power	

Fig. 24. Diagrama de distribución de pines del conector principal de la Ecu EMS Plus.

Antes de la integración de los actuadores, se establece el esquema de alimentación eléctrica de la unidad de control, detallado en la Figura 25. En este diagrama se observa que la EMS Plus recibe energía directamente de la batería, protegida por un portafusibles y gestionada por un relé de potencia activado por la llave de contacto.

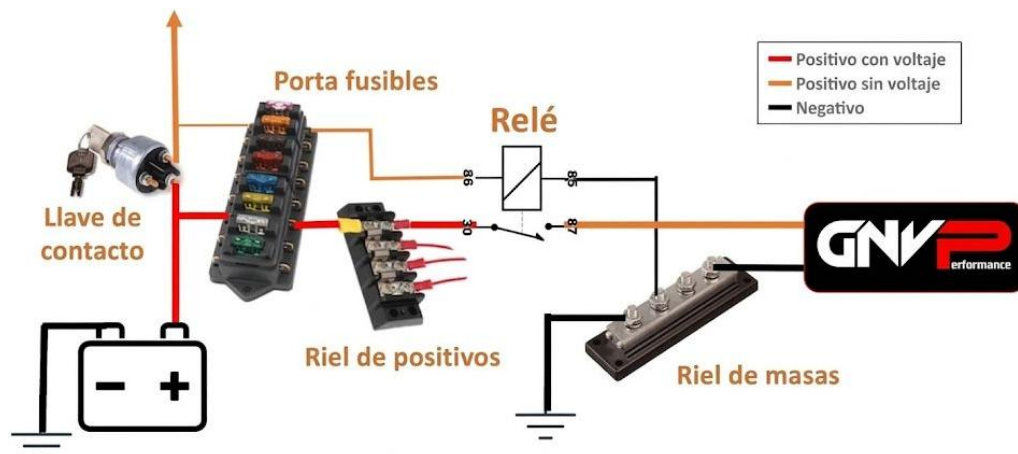
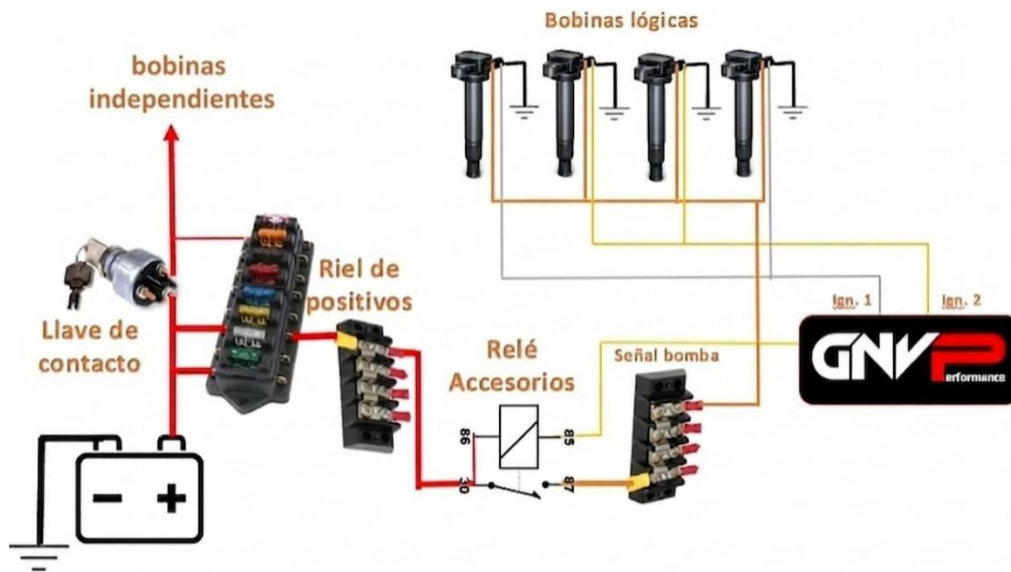


Fig. 25. Diagrama de alimentación de potencia y masas [19].

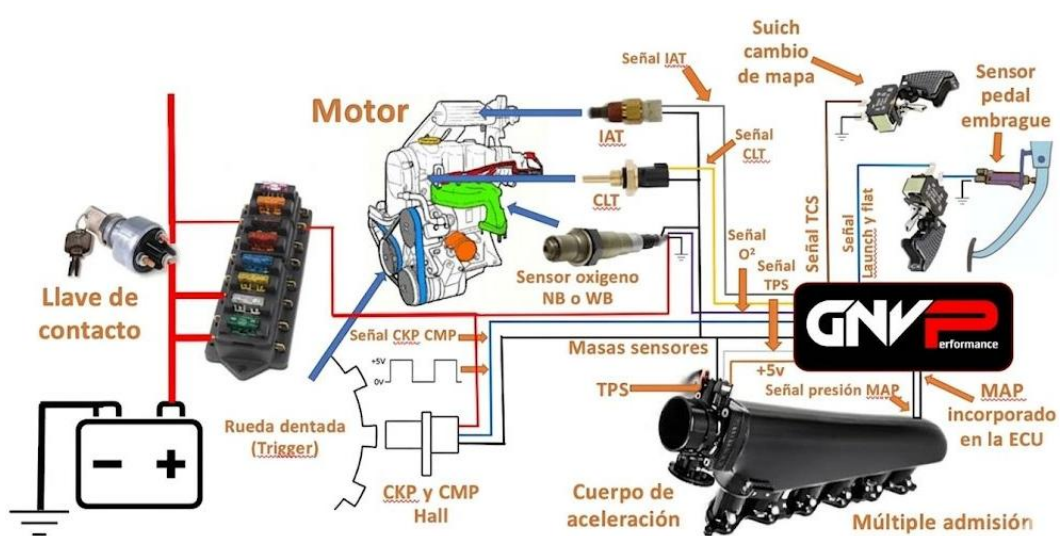
Una vez garantizada la estabilidad eléctrica, se procedió a la conexión de salida. En la Figura 26, se ilustra el esquema para bobinas independientes. El sistema utiliza las salidas

lógicas Ign. 1 (pin 11) e Ign. 2 (pin 12) de la ECU para enviar la señal de disparo a las bobinas. La alimentación de 12V para estas bobinas proviene de un relé independiente, asegurando que la alta demanda de corriente del encendido no interfiera con el voltaje de referencia de la placa interna.



**Fig. 26.** Diagrama de encendido por bobinas independientes [19].

Finalmente, la gestión electrónica se completa con la red de datos mostrada en la Figura 27. Este diagrama describe la conexión de los sensores críticos: temperatura de aire, temperatura de motor, posición de mariposa y el sensor de oxígeno. El sensor CKP es de tipo Hall, alimentado por la salida de 5V (pin 15) de la ECU.



**Fig. 27.** Diagrama de interconexión de sensores [19].

#### 4.4.4. Integración electrónica.

La fase culminante de la implementación física del sistema electrónico se centró en el armado del arnés eléctrico integral, cuya función principal es interpretar las señales de los sensores y ejecutar algoritmos de control para la inyección de combustible y el tiempo de ignición.

El armado del arnés (Figura 28), se basó en el diagrama de 24 terminales, estableciendo una arquitectura de interconexión lógica que vincula de manera eficiente a los sensores críticos de entrada, con los actuadores de salida, todos gobernados por la ECU EMS Plus.



**Fig. 28.** Armado de arnés.

#### 4.4.5. Modo de programación

Se implementó un sistema de gestión basado en el Algoritmo Alfa-N, el cual utiliza la posición del acelerador y el régimen de giro como variables independientes para determinar la Eficiencia Volumétrica. Este método de programación por tablas de búsqueda permite una dosificación de combustible estable, ignorando las pulsaciones de vacío características de los motores monocilíndricos que afectarían otros métodos de control [20].

#### 4.4.6. Configuración de la ECU.

La programación de la unidad de control electrónico para la conversión del motor estacionario de 6.5 hp comenzó con la definición de los parámetros fundamentales de operación dentro del software de gestión, un paso indispensable para establecer la base de datos que permite el cálculo preciso de la inyección.

Como se observa en la interfaz de usuario de la Figura 29, el acceso al menú de configuración básica permitió establecer el entorno de trabajo donde se cargaron las constantes

físicas del motor, iniciando con el uso de la calculadora de combustible requerido. En este apartado, se introdujeron los datos técnicos esenciales: una cilindrada de 196 CC para su único cilindro, un inyector con una capacidad de flujo de 170 CC/min y una relación aire-combustible objetivo de 14.7 para una mezcla estequiométrica, el resultado de este cálculo arrojó un valor de constante base de 7.7 ms, lo cual representa el tiempo de apertura del inyector necesario para llenar el cilindro a máxima eficiencia volumétrica.

Luego, en la configuración detallada del motor y los ciclos de inyección, se establecieron las definiciones operativas que dictan cómo la ECU interpreta el ciclo de cuatro tiempos, configurando un solo pulso por ciclo de motor. Esta decisión implica que el inyector disparará una vez por cada dos revoluciones del cigüeñal, optimizando el control en un motor monocilíndrico donde las señales de vacío en el colector suelen ser demasiado erráticas e inestables para un control preciso mediante el método de densidad de velocidad; por ello, se seleccionó el algoritmo de control Alfa-N.

Finalmente, al definir el tipo de motor como "Incluso fuego" y reconfirmar el tamaño de la máquina y del inyector en la pantalla de secuenciales, se garantiza que el microprocesador de la EMS Plus sincronice correctamente los eventos de inyección con la posición mecánica del pistón, permitiendo así una transición estable desde el estado de reposo hasta la plena carga.

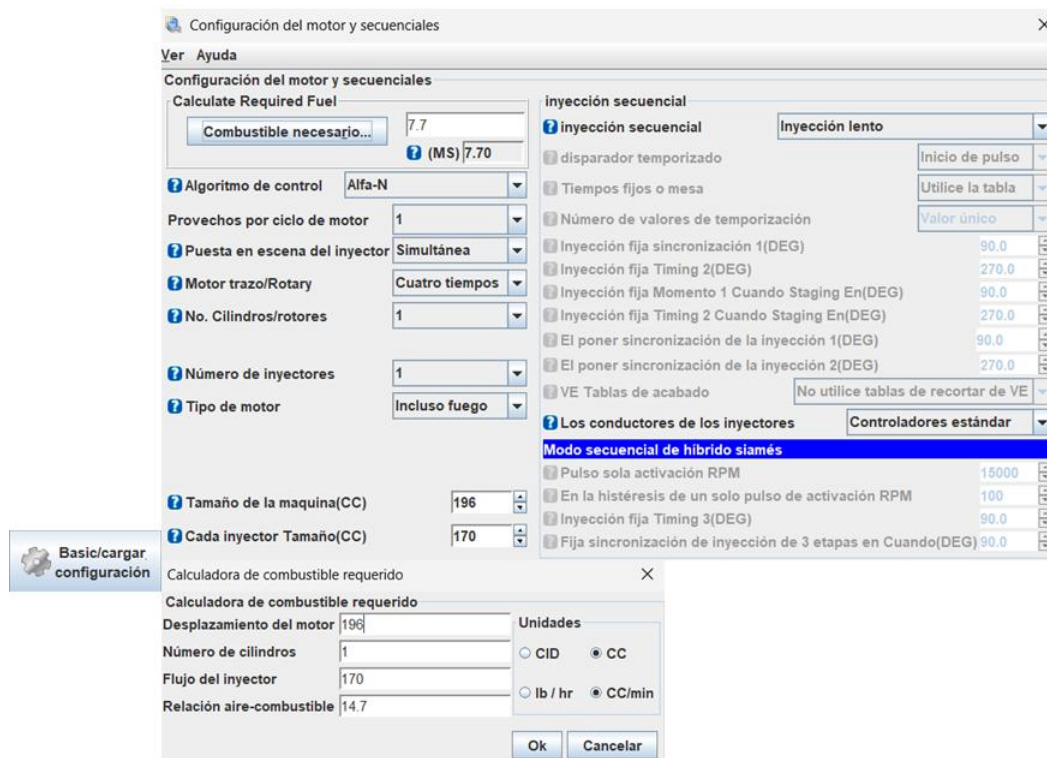


Fig. 29. Configuración base del motor.

#### 4.4.7. Cálculo del tiempo de inyección

En la tabla 7 se encuentra ilustrado los valores específicos usados para calcular la dosificación de combustible.

**TABLA 7** TABLA DE DATOS – CÁLCULO TIEMPO DE INYECCIÓN.

Desplazamiento	196 CC
Cilindros	1
Flujo del inyector	170 CC/min
AFR	14.7
Resultado del Software	7.7 ms

Para el cálculo de la Masa de Aire  $m_a$  al 100% VE, se utiliza la ecuación 1

$$m_a = V_d \times \rho_{aire} \quad (1)$$

Donde,  $\rho_{aire}$  es la densidad del aire ( $\approx 1.225 \text{ mg/cc}$ ) y  $V_d$  es el volumen del cilindro:

$$m_a = 196 \text{ cc} \times 1.225 \frac{\text{mg}}{\text{cc}} = 240.1 \text{ mg de aire}$$

El cálculo de la Masa de Combustible ( $m_f$ ) por ciclo necesaria para combustionar la mezcla en una relación estequiométrica (AFR = 14.7:1) está dada por la ecuación 2

$$m_f = \frac{m_a}{AFR} \quad (2)$$

$$m_f = \frac{m_a}{AFR} = \frac{240.1 \text{ mg}}{14.7} = 16.33 \text{ mg de gasolina}$$

Para determinar el Tiempo de Inyección ( $T_{inj}$ ), primero es indispensable establecer la constante de caudal de masa del inyector. El flujo volumétrico nominal del inyector es de 170 cc/min, el cálculo para convertir este valor a un flujo másico por milisegundo (mg/ms) está determinado por la ecuación 3

$$C_{mg/ms} = \frac{Q_{inj} \times \rho_f}{60000 \text{ ms/min}} \quad (3)$$

Para realizar esta conversión, se relaciona el flujo volumétrico con la densidad específica del combustible (en este caso, la gasolina, con una densidad de 0.74 g/cc).

Sustituyendo los valores en la ecuación, obtenemos el caudal de masa real:

$$\text{Caudal en } mg/ms = \frac{170 \text{ cc}/min \times 740 \text{ mg}/cc}{60000 \text{ ms}/min} = 2.096 \text{ mg}/ms$$

Este resultado indica que el inyector seleccionado suministra 2.096 mg de gasolina por cada milisegundo de apertura, este valor constante es el que se relacionará con la masa de combustible calculada en la ecuación 2 para hallar el tiempo final de inyección.

Una vez obtenida la masa total de combustible requerida por ciclo y la capacidad real de entrega del inyector por unidad de tiempo, el paso final es calcular el Tiempo de Inyección Base determinado por la ecuación 4

$$T_{inj} = \frac{m_f}{C_{mg/ms}} \quad (4)$$

Sustituyendo los valores previamente calculados:

$$T_{inj} = \frac{16.33 \text{ mg}}{2.096 \text{ mg}/ms} = 7.79 \text{ ms}$$

El valor teórico calculado de 7.79 ms guarda una similitud directa con el parámetro de inyección base que se configura en la gestión del motor. El valor de 7.7 ms obtenido automáticamente en TunerStudio queda justificado y respaldado mediante este desarrollo matemático de masa de combustible para una eficiencia volumétrica teórica del 100%. Esta cercanía entre el modelo analítico (7.79 ms) y el software (7.7 ms) valida categóricamente que el pulso base configurado en la ECU es el correcto y proporcional para el volumen del cilindro y el caudal del inyector instalado.

#### 4.4.8. Cartografía Tiempo de Inyección – Gasolina.

La gestión del motor se basa en un mapa de inyección (Figura 30) la cual ajusta el tiempo de apertura de los inyectores en tiempo real. Este sistema utiliza dos variables principales: las revoluciones por minuto y la posición de la mariposa, que representa la carga del motor. Los valores de inyección aumentan progresivamente desde el ralentí hasta los niveles máximos de potencia, asegurando que el motor reciba siempre la cantidad exacta de combustible para evitar daños térmicos y garantizar un funcionamiento estable.

100.0	44	45	47	48	50	51	52	70	71	74	77	78	84	88	90	98
90.0	42	44	45	46	48	49	50	68	69	72	74	76	81	85	88	95
80.0	41	42	43	45	46	47	49	65	66	69	72	73	78	82	85	92
70.0	39	40	42	43	44	46	47	63	64	67	69	70	76	80	82	89
60.0	38	39	40	41	43	44	45	60	62	64	67	68	73	77	79	85
50.0	36	37	38	40	41	42	43	58	59	62	64	65	70	74	76	82
45.0	35	36	38	39	40	41	42	57	58	60	63	64	69	72	75	81
40.0	34	35	37	38	39	40	41	55	57	59	61	63	67	71	73	79
35.0	33	35	36	37	38	39	41	54	55	58	60	61	66	69	72	78
30.0	33	34	35	36	37	38	40	53	54	56	59	60	65	68	70	76
25.0	32	33	34	35	36	38	39	52	53	55	57	59	63	67	69	75
20.0	31	32	33	34	36	37	38	51	52	54	56	57	62	65	67	73
15.0	30	31	32	34	35	36	37	46	47	50	52	53	57	61	63	68
10.0	29	31	32	33	34	35	36	45	46	48	51	52	56	59	61	67
5.0	29	30	31	32	33	34	35	44	45	47	49	50	55	58	60	65
1.0	28	29	30	31	32	33	34	43	44	46	48	49	53	57	59	64
↕	100	200	300	400	500	600	700	1500	1600	1800	2000	2100	2500	2800	3000	3500

Fig. 30. Tabla de calibración tridimensional, tiempo de inyección.

La ventaja de este modelo electrónico frente al carburador tradicional es la precisión para modificar cada punto de la mezcla aire-combustible. Esto no solo permite una entrega de potencia mucho más suave y lineal, sino que es fundamental para cumplir con las normas de emisiones y permitir el uso de combustibles alternativos. Al poder visualizar y suavizar las transiciones en una superficie 3D, se optimiza la eficiencia térmica y el rendimiento general del motor estacionario.

4.4.9. Cartografía Avance de Encendido – Gasolina.

100.0	5	5	5	6	6	6	6	5	5	6	6	6	7	8	8	9
90.0	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	7	7	7	8	8	10
80.0	4	5	5	5	5	6	6	6	6	7	7	7	8	9	9	10
70.0	4	4	4	5	5	5	5	7	7	7	8	8	8	9	10	11
60.0	4	4	4	4	4	5	5	7	8	8	8	9	9	10	10	11
55.0	4	4	4	4	4	4	5	8	8	8	9	9	9	10	11	12
50.0	4	4	4	4	4	4	4	8	8	9	9	9	10	11	11	12
45.0	3	4	4	4	4	4	4	8	9	9	9	9	10	11	11	12
40.0	3	3	4	4	4	4	4	9	9	9	10	10	10	11	12	13
35.0	3	3	3	3	4	4	4	9	9	9	10	10	11	12	12	13
30.0	3	3	3	3	3	4	4	9	9	10	10	10	11	12	12	13
25.0	3	3	3	3	3	3	4	10	10	10	11	11	11	12	13	14
20.0	3	3	3	3	3	3	3	10	10	10	11	11	12	13	13	14
10.0	2	2	2	3	3	3	3	10	11	11	11	12	12	13	13	14
5.0	2	2	2	2	3	3	3	11	11	11	12	12	13	13	14	15
0.0	2	2	2	2	2	3	3	11	11	12	12	12	13	14	14	15
↕	100	200	300	400	500	600	700	1500	1600	1800	2000	2100	2500	2800	3000	3500

Fig. 31. Tabla de calibración tridimensional, avance de encendido.

El control del sistema de encendido optimiza el rendimiento térmico y la eficiencia del motor convertido a gestión electrónica. El mapa de avance de encendido, ilustrado en la Figura 31, determina el momento exacto en que la unidad de control dispara la chispa en la bujía, un

parámetro crítico medido en grados antes del punto muerto superior. Al igual que el mapa de inyección, dinámicamente sobre los ejes de velocidad de rotación y carga del motor, permitiendo una sincronización que se ajusta a la velocidad de propagación del frente de llama bajo distintas condiciones operativas.

Como se observa en la representación bidimensional de la Figura 31, los valores de avance presentan una tendencia ascendente a medida que aumentan las revoluciones por minuto; en regímenes bajos, específicamente entre las 100 y 700 RPM, el avance se mantiene en valores conservadores de entre  $2^\circ$  y  $6^\circ$  para facilitar el arranque y garantizar la estabilidad en ralentí. Sin embargo, al incrementarse la velocidad angular del motor, el tiempo físico disponible para completar la combustión se reduce drásticamente, lo que exige adelantar el salto de la chispa hasta alcanzar valores de  $15^\circ$  en este mapa, asegurando así que la presión máxima de la combustión ocurra en el ángulo del cigüeñal que genere el mayor torque efectivo.

La visualización de la superficie tridimensional revela una topografía caracterizada por pendientes pronunciadas en las zonas de transición de carga, donde se implementa una reducción del avance a medida que la carga del motor aumenta hacia el límite de 100.0 unidades. Esta estrategia de seguridad es esencial para prevenir el fenómeno de la detonación el cual resulta destructivo bajo las altas presiones y temperaturas de la cámara de combustión.

#### 4.5. Parámetros y lineamientos de seguridad orientadas al uso de $H_2$

La implementación de pruebas con mezclas de gasolina e hidrógeno en motores de encendido provocado requiere una estricta definición de parámetros de control, lineamientos de seguridad para mitigar los riesgos derivados de la baja energía de ignición y la alta velocidad de llama del  $H_2$  [21].

Se debe establecer un avance de encendido retardado respecto al mapa base de gasolina, desplazando el inicio de la chispa entre  $3^\circ$  y  $8^\circ$  hacia el PMS para compensar la combustión acelerada, prevenir picos de presión prematuros que deriven en detonación o knock. La gestión del combustible mediante la ECU debe considerar una estrategia de empobrecimiento de la mezcla lambda entre 1.05 y 1.25, aprovechando el amplio límite de inflamabilidad del hidrógeno para mejorar la eficiencia térmica sin comprometer la estabilidad del ciclo [22, 23].

Es primordial monitorear en tiempo real la Temperatura de los Gases de Escape, la cual no debe exceder los  $750^\circ\text{C}$  para proteger las válvulas de escape, así como la presión de inyección de hidrógeno, mantenida de forma constante entre 0.5 y 1.5 bar [24].

El protocolo de operación debe iniciar con gasolina pura hasta alcanzar la temperatura de régimen, el flujo de hidrógeno se activará únicamente en estado estable, se debe cerrar el suministro de gas antes del apagado total del motor para purgar las líneas. Finalmente, la integridad de componentes críticos debe resguardarse mediante sensores de detonación, permitiendo que la ECU realice correcciones de emergencia ante eventos de pre-ignición [25].

#### 4.5.1. Cartografía Tiempo de Inyección – Gasolina-H<sub>2</sub>.

100.0	40	42	44	45	46	47	48	65	66	68	70	72	78	82	85	90
90.0	39	40	42	43	44	45	46	63	64	66	68	70	75	79	82	88
80.0	38	39	41	42	43	44	45	60	62	64	66	68	73	77	80	85
70.0	37	38	40	41	42	43	44	58	60	62	64	66	70	74	77	82
60.0	36	37	38	40	41	42	43	56	58	60	62	64	68	72	75	80
55.0	35	35	37	39	40	41	42	54	56	58	60	62	66	70	73	78
50.0	34	34	36	38	39	40	41	52	54	56	59	61	65	69	72	77
45.0	33	33	35	37	38	39	40	50	52	55	57	59	63	67	70	75
40.0	32	33	34	36	37	38	40	49	51	54	56	58	62	66	69	74
35.0	31	32	33	35	36	37	39	48	50	53	55	57	61	65	68	73
30.0	29	31	32	34	35	37	38	47	49	52	54	56	60	64	67	72
25.0	28	30	31	33	35	36	37	46	48	51	53	55	59	63	66	70
20.0	27	29	31	33	34	35	36	42	44	47	49	50	55	59	61	66
10.0	26	28	30	31	33	34	35	41	43	46	48	49	54	57	59	65
5.0	25	27	29	30	32	33	34	40	42	45	47	48	53	56	58	63
0.0	24	26	28	29	30	31	33	39	41	44	46	47	51	55	57	62
↕	100	200	300	400	500	600	700	1500	1600	1800	2000	2100	2500	2800	3000	3500

**Fig. 32.** Tabla de calibración tridimensional, tiempo de inyección, Gasolina-H<sub>2</sub>.

El hidrógeno tiene una velocidad de combustión muy alta y se inflama con gran facilidad, lo que obliga a reajustar por completo el momento en que debe producirse la chispa. Si se usa los mismos avances de encendido de un mapa para gasolina donde la chispa se adelanta para darle tiempo al combustible de quemarse, se cometerá un grave error con el hidrógeno. Al quemarse tan rápido, la explosión empujaría al pistón hacia abajo mientras este todavía está subiendo, esto no solo desperdiciaría energía de giro, sino que podría causar daños por una combustión demasiado adelantada [26].

El mapa de avance desarrollado, como se detalla en la Figura 32, muestra la tabla de calibración para la mezcla gasolina-hidrógeno, la gestión de los tiempos requiere una precisión absoluta. Mientras que con la gasolina la curva suele ascender buscando esos 15° a las 3500 RPM para compensar su relativa lentitud, el mapa de hidrógeno se presenta como una superficie mucho más plana y prudente, especialmente en las zonas de alta carga. Aquí, el avance se "retrasa" de forma estratégica, al acercarnos a las 100 unidades de carga, la ECU interviene reduciendo el avance drásticamente; esto no es falta de potencia, sino una medida

de protección vital, dado que el hidrógeno necesita una energía de ignición mínima, cualquier punto caliente en la cámara podría detonarlo antes de tiempo [26].

#### 4.5.2. Cartografía Avance de Encendido – Gasolina-H<sub>2</sub>.

100.0	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	6	7	7	8
90.0	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	7	7	8
80.0	1	2	2	2	3	3	4	4	4	5	5	6	6	6	7	8
70.0	1	2	2	2	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8
60.0	1	1	1	1	2	2	3	5	5	6	6	6	7	7	8	9
55.0	1	1	1	1	2	2	2	5	5	6	6	7	8	8	8	9
50.0	0	1	1	1	1	2	2	5	6	6	7	7	8	8	9	10
45.0	0	0	0	1	1	1	1	6	7	7	7	7	8	9	9	10
30.0	0	0	0	0	1	1	1	7	7	7	7	8	8	9	10	11
30.0	0	0	0	0	0	1	1	7	7	7	8	8	9	10	11	11
25.0	0	0	0	0	0	0	1	8	8	8	9	9	10	11	11	12
10.0	0	0	0	0	0	0	0	8	9	9	10	10	11	11	12	12
5.0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	10	10	11	11	12	12	13
0.0	0	0	0	0	0	0	0	9	10	10	11	11	12	12	13	13
↙	100	200	300	400	500	600	700	1500	1600	1800	2000	2100	2500	2800	3000	3500

**Fig. 33.** Tabla de calibración tridimensional, avance de encendido, gasolina-H<sub>2</sub>.

La transición de operar el motor con hidrógeno requiere un reajuste en la sincronización de la chispa, esto se debe a diferencias críticas en cómo se queman ambos combustibles: el hidrógeno tiene una velocidad de propagación de llama mucho mayor y necesita significativamente menos energía para encenderse. Como se evidencia en la figura 33, el mapa debe ser más conservador. Mientras que la cartografía para gasolina permite avances de hasta 15° a 3500 RPM, la configuración para la mezcla restringe este valor a un máximo de 13° a muy bajas cargas, reduciéndose aún más conforme aumenta la exigencia. Esta limitación es una medida de seguridad para compensar la combustión casi instantánea del gas, evitando que la presión máxima del cilindro ocurra demasiado temprano en la carrera de compresión. De lo contrario, se generarían fuerzas opuestas al movimiento del pistón, pérdida de potencia y un alto riesgo de retroceso de llama [26].

Al observar la topografía de la superficie tridimensional, se identifica claramente este comportamiento de la chispa, especialmente en la zona de alta exigencia del motor. En un mapa de gasolina tradicional, es común ver una pendiente ascendente pronunciada para darle tiempo al frente de llama de expandirse por toda la cámara. A diferencia, el mapa modificado para la adición de hidrógeno presenta una superficie mucho más plana y controlada en los sectores de carga media y alta. Esta estabilización del avance responde a que, bajo mayores presiones del múltiple, la mezcla se vuelve extremadamente reactiva, eliminando la necesidad de adelantar excesivamente la chispa. De hecho, a medida que la carga se acerca al 100%, el sistema

disminuye el avance hasta caer a los 8° a 3500 RPM, mitigando así las altas temperaturas en la cámara y previniendo la autoignición prematura, un fenómeno que el hidrógeno facilita si la chispa no se gestiona con precisión milimétrica [26].

#### 4.6. Emisiones del motor con inyección electrónica.

Una vez implementado y calibrado el sistema de inyección electrónica, se realizaron las mediciones de gases de escape en condición de ralentí estabilizado (Figura 34). A partir de los datos obtenidos y procesados por el analizador de gases, se determinaron los valores promedio detallados en la Tabla 9, los cuales caracterizan el nuevo desempeño ambiental del motor tras la conversión.



**Fig. 34.** Medición de emisiones del motor con inyección electrónica.

**TABLA 8** EMISIONES CONTAMINANTES PROMEDIO DEL MOTOR CON SISTEMA EFI.

Parámetro	Mues. 1	Mues. 2	Mues. 3	Mues. 4	Mues. 5	Promedio
Régimen de giro (RPM)	980	982	985	988	990	985
Monóxido de Carbono (%Vol)	1,02	1,04	1,05	1,06	1,08	1.05
Hidrocarburos (ppm)	68	69	70	71	72	70
Oxígeno (% Vol)	0,68	0,69	0,7	0,71	0,72	0.7
Dióxido de Carbono (% Vol)	12,02	12,05	12,08	12,11	12,14	12.08

**TABLA 9** LÍMITES MÁXIMOS DE EMISIONES PERMITIDAS PARA MOTOCICLETAS Y TRICIMOTOS. PRUEBA ESTÁTICA EN RALENTÍ.

Tipo de motor	CO (% V)	HC (ppm)
TODAS **	3.5	2000

#### 4.7. Discusión

Se realizó una comparativa estadística entre las condiciones de operación del motor bajo el sistema original de carburación y tras la conversión a inyección electrónica de combustible. Inicialmente, se estableció la línea base en ralentí a 971 RPM, registrando emisiones de monóxido de carbono (CO) de 3.22% e hidrocarburos (HC) de 230 ppm, valores que evidencian las limitaciones mecánicas para dosificar la mezcla y que sitúan al CO peligrosamente cerca del límite máximo de 3.5% permitido por la normativa RTE INEN 136 (Tabla 9). Tras la estabilización de la mezcla mediante el control electrónico, el CO se redujo drásticamente a un 1.05% y los HC a 70 ppm. Esto representa una reducción del 67.39% para el CO y del 69.56% para los HC, consolidando un promedio unificado de reducción de gases contaminantes por combustión incompleta del 68.47%.

Por otro lado, la comparativa revela un notable incremento en las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), pasando de 3.8% a un 12.08%, este es el indicador directo de un aumento sustancial en la eficiencia termodinámica de la combustión. Ambientalmente, la drástica disminución de CO (gas altamente tóxico) y HC (precursores de smog fotoquímico) mitiga de manera directa el impacto contaminante local del motor y mejora la calidad del aire. El aumento del CO<sub>2</sub> confirma que la gestión electrónica permite una oxidación casi total de las moléculas de carbono del combustible, transformándolas en CO<sub>2</sub> en lugar de subproductos nocivos por falta de oxígeno o mala atomización. Este comportamiento concuerda con la literatura científica sobre la modernización de sistemas de inyección, donde la optimización de la mezcla eleva inevitablemente la fracción volumétrica de CO<sub>2</sub> en el escape como resultado de una combustión completa y eficiente [27].

Como parte de la investigación futura y la evaluación de combustibles alternativos, se desarrollaron cartografías tridimensionales de calibración para evaluar el comportamiento del motor con una mezcla de Gasolina-Hidrógeno. Al contrastar los mapas base de gasolina (Figura 30 y 31) con los propuestos para la mezcla con H<sub>2</sub> (Figura 32 y 33), se evidencia una modificación sustancial en los parámetros de control. Específicamente, en la cartografía de Gasolina-H<sub>2</sub> se ha reducido el tiempo de inyección en diversas celdas de carga y RPM, y de igual manera, se han mapeado valores notablemente inferiores para el avance de encendido, acercando el momento de la chispa hacia el Punto Muerto Superior.

Estas variaciones en la cartografía electrónica tienen una fundamentación técnica, la reducción en el tiempo de inyección responde a que el gas hidrógeno, al ser introducido en la admisión, desplaza una fracción del requerimiento volumétrico y energético de la gasolina, obligando a la ECU a disminuir el pulso de los inyectores líquidos para mantener la estequiometría adecuada. Asimismo, la severa reducción del avance de encendido se justifica por las propiedades cinéticas del hidrógeno; este gas posee una velocidad de propagación de llama laminar hasta 8 veces más rápida que la gasolina. Si se mantuviera el avance de encendido original, la combustión ultrarrápida del hidrógeno generaría el pico de presión máxima mucho antes del PMS, provocando detonación severa y pérdida de eficiencia mecánica. Esta necesidad de retrasar el encendido y acortar la inyección al enriquecer con hidrógeno está ampliamente respaldada por investigaciones recientes en la dinámica de motores de encendido provocado [28].

## **5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La implementación del sistema de inyección electrónica en el motor originalmente equipado con carburador permitió sustituir el control mecánico de la dosificación de combustible por una gestión electrónica basada en la adquisición y procesamiento de variables del motor. La integración de sensores junto con una ECU programable hizo posible monitorear en tiempo real las condiciones de operación y ajustar la mezcla aire–combustible con mayor precisión.

Durante el proceso de adaptación se desarrollaron soluciones técnicas que permitieron integrar los nuevos componentes al motor sin modificar su arquitectura principal. Entre ellas la fabricación del acople de admisión mediante impresión 3D utilizando nylon reforzado con fibra de carbono, lo que permitió unir el cuerpo de aceleración al puerto de admisión original asegurando resistencia mecánica y estabilidad térmica durante la operación.

De igual manera, la implementación del sistema de captación de giro mediante una rueda fónica y un sensor de efecto Hall permitió obtener una señal precisa de velocidad y posición del cigüeñal, condición necesaria para sincronizar los eventos de inyección y garantizar el correcto funcionamiento del sistema EFI.

Las mediciones de emisiones realizadas en condición de ralentí permitieron comparar el comportamiento del motor en su configuración original carburada frente a su operación con inyección electrónica. Los resultados evidenciaron una reducción importante de los

contaminantes asociados a combustión incompleta, observándose una disminución del monóxido de carbono desde 3.22% hasta valores cercanos a 1.05%, así como una reducción de los hidrocarburos no quemados desde 230 ppm hasta aproximadamente 70 ppm. Paralelamente, el incremento del dióxido de carbono desde un 3.77 % en estado carburado hasta valores cercanos al 12% esto indica que el proceso de combustión se desarrolla de manera más completa bajo el control del sistema EFI.

Finalmente, a partir de la plataforma electrónica implementada, se establecieron lineamientos iniciales para el desarrollo de un mapa cartográfico orientado a futuras evaluaciones con mezclas de gasolina e hidrógeno. Esta propuesta considera parámetros de operación y aspectos básicos de seguridad que deberán tomarse en cuenta en investigaciones posteriores, permitiendo que el sistema desarrollado funcione como base experimental para analizar el comportamiento del motor frente a combustibles alternativos.

### 5.1. Recomendaciones

Para las futuras fases de experimentación con hidrógeno (H<sub>2</sub>), es estrictamente necesario integrar sensores de detonación vinculados a algoritmos de corrección en tiempo real dentro de la ECU EMS Plus. Debido a la baja energía de ignición del hidrógeno y su elevada velocidad de propagación de llama, el riesgo de pre-ignición y retroceso de llama es latente, especialmente en condiciones de alta carga. No basta con un mapa retardado; se requiere una estrategia de seguridad activa que permita a la unidad de control realizar ajustes dinámicos de emergencia en el avance de encendido ante la menor señal de combustión anormal, protegiendo así la integridad mecánica del motor.

Para asegurar la viabilidad técnica de la transición hacia combustibles alternativos, es imperativo establecer protocolos de operación secuencial en el sistema de combustible gestionado por la ECU. Se sugiere que el arranque y el calentamiento del motor se realicen exclusivamente con gasolina pura hasta alcanzar la temperatura de régimen, activando el flujo de hidrógeno únicamente en condiciones de carga estable para evitar inestabilidades en el ralentí. De igual manera, se recomienda programar un ciclo de purga automática que cierre el suministro de H<sub>2</sub> segundos antes del apagado total, permitiendo que el motor consuma los remanentes de gas, esta práctica, sumada al mantenimiento de una presión de inyección constante entre 0.5 y 1.5 bar, minimiza el riesgo de acumulaciones peligrosas y garantizará una operación segura y repetible en los ensayos de descarbonización.

Es imperativo realizar un seguimiento técnico preventivo a la integridad estructural del acople de admisión fabricado mediante manufactura aditiva con Nylon reforzado con fibra de carbono (PA-CF). Si bien este material compuesto ha demostrado poseer la estabilidad térmica necesaria para soportar la transferencia de calor de la culata y las pulsaciones de presión, las vibraciones propias del motor monocilíndrico podrían inducir fatiga en los puntos de anclaje o afectar la hermeticidad del sellado a largo plazo. Asimismo, se debe verificar periódicamente que el entrehierro del sensor CKP se mantenga estrictamente en los 0.5 mm establecidos respecto a la rueda fónica 30-2, garantizando que la resolución angular de la señal de giro no se vea degradada por desalineaciones mecánicas que comprometan la sincronización milimétrica de la inyección.

## REFERENCIAS

1. Mallikarjun, B.C., Prathima, H.S.: UDS for Data Communication in Temperature Monitoring. Presented at the (2025). [https://doi.org/10.1007/978-981-97-8429-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-97-8429-5_4).
2. Kanevski, H., Asenov, S.: Integrating Open-Hardware ECUs into Engineering Education. In: 2025 XXXIV International Scientific Conference Electronics (ET). pp. 1–4. IEEE (2025). <https://doi.org/10.1109/ET66806.2025.11204147>.
3. MARQUARDT, L., KATKE, H.-J., HABECK, M., REINKE, A., TEUBNER, L.: E-Fuel Blend Operation of Small Industrial SI-Engines with Carburetors. *Acta Mechanica et Automatica*. 19, 369–379 (2025). <https://doi.org/10.2478/ama-2025-0044>.
4. Nasrudi, M., Pardjono, Efendi, A., Noviansyah, W.: Case study of electronic fuel injection competence acquisition of students at SMK PGRI 1 Ngawi. *J. Phys. Conf. Ser.* 1833, 012070 (2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1833/1/012070>.
5. Honda: MOTOR ESTACIONARIO GX200, <https://motos.honda.com.ec/producto-de-fuerza/motor-estacionario-gx200-6-5hp-24>, last accessed 2025/11/16.
6. Vulcan Trent: Motores estacionarios.
7. Muslim, M.T., Selamat, H., Alimin, A.J., Mohd Rohi, N., Hushim, M.F.: A review on retrofit fuel injection technology for small carburetted motorcycle engines towards lower fuel consumption and cleaner exhaust emission. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 35, 279–284 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.037>.
8. Autoavance: Sensor CKP, <https://www.autoavance.co/blog-tecnico-automotriz/135-sensor-de-posicion-del-cigueenal-ckp/>, last accessed 2025/11/16.
9. Robert Bosch GmbH ; Wiley: Gasoline-engine management. (2006).
10. Germán Corona Ramírez, Leonel., Abarca Jiménez, G.S., Mares Carreño, J.: *Sensores y actuadores*. Larousse - Grupo Editorial Patria (2014).
11. SensorAutomotriz: CHT, <https://sensorautomotriz.com/>, last accessed 2025/11/18.
12. Dian, H., Kun, C., Tao, C., Weldon, C., Christiaens, A., Jie, R.: Idle Air Control Valve for the Small Engine Market. Presented at the October 15 (2013). <https://doi.org/10.4271/2013-32-9163>.
13. Pardiñas, J.: *Sistemas auxiliares del motor*. Editex (2012).
14. Pesic, R., Davinic, A., Petkovic, S., Taranovic, D., Miloradovic, D.: Aspects of volumetric efficiency measurement for reciprocating engines. *Thermal Science*. 17, 35–48 (2013). <https://doi.org/10.2298/TSCI120531153P>.
15. Protunerz: MegaSquirt, <https://protunerz.com/products/megasquirt-2-ems-system-3-57-assembled-ecu>, last accessed 2025/11/16.
16. Pereira, B.C.F., Pereira, B.S., Teixeira, E.L.S., Laganá, A.A.M., Cipparrone, F.A.M., Santos, M.M.D.: Design, Implementation and Testing of a Spark-Ignition Engine

- Management System. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 34, 554–565 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40313-022-00978-z>.
17. Kingtuner: Base Map & Full Tune, <https://kingtuner.com/products/megasquirt-base-map?srsltid=AfmBOorDkpof80tb2t1EeQOhJR5C7IPLFBluXXi0h6BjUZy4b4NPY8FR>, last accessed 2025/11/16.
  18. Ruan, D., Baldyga, J.: Identification of the Driver Demand Torque Map in Engine ECU Based on Unscented Kalman Filter. *IFAC-PapersOnLine*. 55, 217–222 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.036>.
  19. Nanotech: Diagramas. (2022).
  20. Zhang, Y., Liu, J., Zuo, Z., Zhang, S.: Optimization of volumetric efficiency of a small wankel engine using genetic algorithm. *Thermal Science*. 24, 101–111 (2020). <https://doi.org/10.2298/TSCI180504058Z>.
  21. Bui, V.G., Bui, T.M.T., Tran, V.N., Huang, Z., Hoang, A.T., Tarelko, W., Bui, V.H., Pham, X.M., Nguyen, P.Q.P.: Flexible syngas-biogas-hydrogen fueling spark-ignition engine behaviors with optimized fuel compositions and control parameters. *Int. J. Hydrogen Energy*. 48, 6722–6737 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.133>.
  22. Yu, Z., Zhao, J., Markov, V., Han, D.: Effects of hydrogen addition on ignition characteristics and engine performance of ammonia-hydrogen blended fuel: A kinetic analysis. *Int. J. Hydrogen Energy*. 87, 722–735 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.073>.
  23. Nguyen, D., Kar, T., Turner, J.W.G.: Performance, Emissions, and Combustion Characteristics of a Hydrogen-Fueled Spark-Ignited Engine at Different Compression Ratios: Experimental and Numerical Investigation. *Energies (Basel)*. 16, 5730 (2023). <https://doi.org/10.3390/en16155730>.
  24. Priyanta, D., Prastowo, H., Nurrahman, R., Siswantoro, N., Pitana, T., Zaman, M.B., Semin, Parluhutan, Y.H.: Digital Twin Monitoring System for Diesel Engine Based on Arduino, Case Study: RPM and Exhaust Gas Temperature. Presented at the (2024). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67788-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67788-5_9).
  25. Gabana, P., Giménez, B., Martín Herreros, J., Tsolakis, A.: Analysis of the combustion speed in a spark ignition engine fuelled with hydrogen and gasoline blends at different air fuel ratios. *Fuel*. 381, 133563 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133563>.
  26. Salvi, B.L., Subramanian, K.A.: A novel approach for experimental study and numerical modeling of combustion characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 51, 101972 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.101972>.
  27. Ravi, S.S., Osipov, S., Turner, J.W.G.: Impact of Modern Vehicular Technologies and Emission Regulations on Improving Global Air Quality. *Atmosphere (Basel)*. 14, 1164 (2023). <https://doi.org/10.3390/atmos14071164>.

28. Farhan, M., Salam, H.A., Shahid, M.I., Chen, T., Xiao, Q., Jiang, L., Rao, A., Li, X., Ma, F.: Experimental and predictive advancements in hydrogen enriched compressed natural gas spark ignition engines: a critical review. *Fuel*. 407, 137248 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.137248>.