UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA INYECCIÓN DE HIDRÓGENO EN EL MOTOR DE UN VEHÍCULO: EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES MEDIANTE EL ENFOQUE DE MAPA MOTOR"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniería Automotriz

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTORES:

Alexander David Aguirre Valenzuela

Jeremy Fernando Sánchez Rivadeneira

DIRECTOR:

Ing. Fredy Alexander Rosero Obando PhD.

Ibarra – Ecuador

2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Aguirre Valenzuela Alexander David

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Sánchez Rivadeneira Jeremy Fernando

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis del impacto de la inyección de hidrógeno en el motor de un vehículo: Evaluación del consumo de combustible y emisiones mediante el enfoque de mapa motor.
AUTOR (ES):	Aguirre Valenzuela Alexander David Sánchez Rivadeneira Jeremy Fernando
FECHA: DD/MM/AAAA	29/09/2026
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** □ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO AUTOMOTRIZ
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Fredy Alexander Rosero Obando PhD. Ing. Zamir Andrés Mera Rosero PhD.

2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

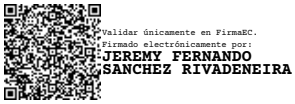
Ibarra, a los 29 días del mes de septiembre de 2026

LOS AUTORES:



Firma……

Alexander David Aguirre Valenzuela



Firma……

Jeremy Fernando Sánchez Rivadeneira

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 29 de septiembre de 2026

MSc. Fredy Alexander Rosero Obando, PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



Ing. Fredy Alexander Rosero Obando, PhD.
C.C.: 1002641742

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular " ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA INYECCIÓN DE HIDRÓGENO EN EL MOTOR DE UN VEHÍCULO: EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES MEDIANTE EL ENFOQUE DE MAPA MOTOR " elaborado por Aguirre Valenzuela Alexander David y Sánchez Rivadeneira Jeremy Fernando, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FREDY ALEXANDER ROSERO OBANDO

Ing. Fredy Alexander Rosero Obando, PhD.
Tutor C.C.: 1002641742

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ZAMIR ANDRES MERA ROSERO

Ing. Zamir Andrés Mera Rosero, PhD.
Asesor C.C.: 1003184478

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación, a mis padres por enseñarme que cada día representa una nueva oportunidad para seguir adelante, a siempre enfrentar las dificultades con perseverancia y cada error convirtiéndolo en una nueva experiencia. A mi hermana, por acompañarme en cada desafío y brindarme su apoyo durante las largas jornadas de estudio. A mis amigos, por estar presentes en cada nueva anécdota dentro de las aulas y hacer de este proceso una experiencia de constante crecimiento. Finalmente, dedico este logro a mis docentes, quienes, con su ejemplo y enseñanza, contribuyeron a mi desarrollo académico, profesional y personal.

David Aguirre

En memoria de Jesús Rivadeneira y Bolívar Sánchez

Dedico este trabajo a todos aquellos que, de una forma u otra, dejaron su huella en mi vida y contribuyeron a que este momento fuera posible. A mis padres, Laura y Carlos, por ser el pilar que me sostuvo frente a cada adversidad, por acompañarme durante esta etapa, motivarme a perseverar en la búsqueda de mis metas y enseñarme a ser una mejor persona cada día. A mi hermana Samantha y a cada uno de los miembros de mi familia que confiaron en mí y estuvieron presentes con sus consejos, su apoyo incondicional y los valores que hoy forman parte de quien soy.

A todos los docentes y maestros que compartieron sus conocimientos y experiencias, dejando enseñanzas que trascendieron las aulas.

Dedico también este trabajo a mi tío Jesús y a mi abuelo Bolívar, quienes dejaron una huella invaluable en mí y, aunque partieron antes de tiempo, permanecen presentes en cada logro alcanzado.

Por último, dedico este trabajo a quien decidió no rendirse, incluso cuando el camino parecía más difícil; a quien entendió que el primer límite que debe superarse es el que uno mismo se impone.

Jeremy Sánchez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme con la vida, salud y sabiduría y permitirme cumplir una de las metas planteadas en mi vida. A mis padres por su amor, confianza, sacrificio y apoyo incondicional, siendo un pilar muy importante para la culminación de este trabajo. A mi hermana, familia y amigos, por su compañía, comprensión y aliento durante todo este proceso académico. De manera especial, a mis docentes de la Universidad Técnica del Norte, por compartir sus conocimientos, experiencia y valores para mi formación como profesional. De igual forma, agradezco a todas las personas que directa o indirectamente han contribuido al desarrollo y culminación de esta investigación.

David Aguirre

Expreso mi gratitud a Dios por ser la luz que ha guiado mi camino y permitirme llegar hasta este momento rodeado de personas extraordinarias. A mis padres, por cada esfuerzo, cada sacrificio y cada palabra de aliento que hicieron posible alcanzar este logro, el cierre de una etapa que abre paso a nuevos desafíos y oportunidades. A mi hermana y a cada uno de los miembros de mi familia, por caminar a mi lado, compartir conmigo sus experiencias, sus valores y recordarme, incluso en los días más difíciles, la importancia de seguir adelante.

Mi reconocimiento a todos los docentes que formaron parte de mi desarrollo académico y profesional, especialmente al Ing. Fredy Rosero y al Ing. Zamir Mera, por su confianza y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto. De manera especial, al Ing. Ramiro Rosero, por compartir siempre sus conocimientos y demostrar que ninguna duda es pequeña cuando existe la disposición de enseñar.

A los maestros Joel Vinueza, Miguel Gonzáles y Boris Garzón, por sus enseñanzas, fruto de la experiencia y el oficio, que marcaron una parte importante de mi formación como persona y profesional.

Finalmente, a mi grupo de amigos, el equipo de "Los Incapaces", por convertir cada reto en una anécdota, cada dificultad en una oportunidad para aprender y cada logro en una alegría. Y a Bryan Guerrero, por ser parte de aquellos que me motivaron a continuar este camino.

Jeremy Sánchez

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación tuvo como objetivo analizar el impacto de la inyección de hidrógeno en el múltiple de admisión de un vehículo, evaluando su influencia sobre el consumo de combustible y las emisiones mediante el enfoque de mapa de motor. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica en la que se identificó la celda de electrólisis tipo húmeda como uno de los métodos más utilizados para generar hidrógeno y mejorar el proceso de combustión. La campaña experimental se llevó a cabo en Riobamba, provincia de Chimborazo. Se usó una ruta RDE bajo dos condiciones operativas comparables: funcionamiento convencional y funcionamiento con inyección de hidrógeno en el sistema de admisión. Los parámetros cinemáticos y de operación del motor se registraron con un ELM327 y la interfaz Torque Pro. Las emisiones se monitorearon con el equipo iPEMS 3DATX. Ambos sistemas trabajaron a una frecuencia de 1 Hz. Los datos obtenidos se sincronizaron y procesaron en R Studio para crear los mapas de motor. Los resultados mostraron que, con hidrógeno, las zonas de consumo se concentraron entre 2 y 6 L/h. Las regiones de mayor eficiencia térmica se ubicaron entre 1000 y 3000 RPM con cargas medias. El consumo de combustible presentó una leve reducción del 3,3 %; sin embargo, las emisiones de CO_2, CO y HC aumentaron, mientras que el NOx registró una ligera disminución. De igual manera, se registró una reducción de temperatura aproximada de 21,3 °C en el convertidor catalítico bajo carga. Esta caída de temperatura, junto con las mezclas pobres registradas durante el recorrido, limitó la capacidad del catalizador para transformar los contaminantes generados. Por tanto, aunque la incorporación de hidrógeno redujo ligeramente el consumo de combustible, no produjo una mejora en las emisiones del vehículo durante la conducción real.

Palabras clave: Hidrógeno, consumo de combustible, emisiones, mapas de motor, conducción real.

ABSTRACT

This research aimed to analyze the impact of hydrogen injection into the intake manifold of a vehicle, evaluating its influence on fuel consumption and emissions through the engine map approach. For this purpose, a literature review was conducted, in which the wet-type electrolysis cell was identified as one of the most widely used methods to generate hydrogen and improve the combustion process. The experimental campaign was carried out in Riobamba, Chimborazo Province. An RDE route was used under two comparable operating conditions: conventional operation and operation with hydrogen injection into the intake system. The vehicle kinematic and engine operating parameters were recorded using an ELM327 and the Torque Pro interface. Emissions were monitored using the iPEMS 3DATX equipment. Both systems operated at a frequency of 1 Hz. The data obtained were synchronized and processed in R Studio to create the engine maps. The results showed that, with hydrogen, the consumption zones were concentrated between 2 and 6 L/h. The regions of higher thermal efficiency were located between 1000 and 3000 RPM at medium loads. Fuel consumption showed a slight reduction of 3.3%; however, CO_2, CO, and HC emissions increased, while NOx showed a slight decrease. Likewise, an approximate temperature reduction of 21.3 °C was recorded in the catalytic converter under load. This temperature decrease, together with the lean mixtures recorded during the route, limited the catalyst's ability to transform the pollutants generated. Therefore, although the incorporation of hydrogen slightly reduced fuel consumption, it did not produce an improvement in vehicle emissions during real-world driving.

Keywords: Hydrogen, fuel consumption, emissions, engine maps, real driving.

LISTA DE SIGLAS

AEADE. Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador.

BSFC. Consumo específico al freno.

BTE. Eficiencia térmica al freno.

CAA. Ley de Aire Limpio.

CARB. Junta de Recursos del Aire de California.

CH_4. Metano.

CO. Monóxido de Carbono

CO_2. Dióxido de Carbono.

COV. Compuestos orgánicos volátiles.

CRE. Constitución de la República del Ecuador.

CSV. Valores Separados por Comas.

CVS. Muestreo de volumen constante.

DTC's. Códigos de diagnóstico de problemas.

ECU. Unidad de control electrónico.

EFM. Medidor de flujo de escape.

EFM. Medidor de flujo de escape.

EPA. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

EPN. Escuela Politécnica Nacional.

ESPOCH. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

FC. Consumo de combustible.

GEI. Gases de efecto invernadero.

H_2. Hidrógeno.

H_2O. Vapor de agua.

HC. Hidrocarburos.

INEN. Servicio Ecuatoriano de Normalización.

iPEMS. Sistema portátil e integrado de medición de emisiones.

LTFT. Ajuste de combustible a largo plazo.

MCI. Motor de combustión interna.

MCIA. Motor de combustión interna alternativos.

MEP. Motor de encendido provocado.

N_2O. Óxido nitroso

NDIR. Tecnología de infrarrojo no dispersivo.

NH_3. Amoniaco.

NOx. Óxidos de nitrógeno.

O_2. Oxígeno.

O_3. Ozono troposférico.

OMS. Organización Mundial de la Salud.

PCI. Poder Calorífico Inferior.

PCS. Poder Calorífico Superior.

PEMS. Portable Emissions Measurement System.

PIDs. Parámetros de diagnóstico a bordo.

PM. Material particulado.

PMI. Punto Muerto Inferior.

PMS. Punto Muerto Superior.

PNMUS. Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible.

RPA. Aceleración Relativa Positiva.

RDE. Emisiones en Conducción Real.

SO_x. Óxidos de azufre.

STFT. Ajuste de combustible a corto plazo.

TAN. Número Ácido Total.

TBN. Número Base Total.

TCD. Detector de conductividad térmica.

UE. Unión Europea.

WLTC. Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Cycle.

WLTP. Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS 12
ÍNDICE DE TABLAS 16
ÍNDICE DE FIGURAS 18
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN 22
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 22
1.1.1 Antecedentes 22
1.1.2 Planteamiento del Problema 24
1.2 JUSTIFICACIÓN 25
1.3 OBJETIVOS 26
1.3.1 Objetivo General 26
1.3.2 Objetivos Específicos 26
1.4 ALCANCE 26
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO 28
2.1 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO 28
2.1.1 Evolución y características de los motores de encendido provocado 28
2.1.2 Principio de Funcionamiento de los MEP 29
2.1.3 Ciclo termodinámico del MEP 30
2.2 FUNDAMENTOS DE COMBUSTIÓN Y FORMACIÓN DE EMISIONES 34
2.2.1 Proceso de Combustión Ideal en MEP 35
2.2.2 Combustión Real en MEP 36
2.2.3 Tipos de Emisiones en un MCI: Gases Contaminantes y de Efecto Invernadero 37
2.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE EMISIONES DE GASES 40
2.3.1 Métodos de ensayos en laboratorio 40
2.3.2 Métodos de emisiones en condiciones reales de conducción 42
2.3.3 Método de ensayo de Sensor Remoto 44
2.4 NORMATIVAS DE CONTROL Y REGULACIÓN DE EMISIONES 45
2.4.1 Normativas Europeas 45
2.4.2 Normativas Americanas 46

2.4.3 Normativas Ecuatorianas 47
2.5 EFECTO DE LA ADICIÓN DE HIDRÓGENO EN MEP 47
2.5.1 Vector energético vs Fuente Primaria 47
2.5.2 Métodos de producción del Hidrógeno 48
2.5.3 Propiedades y Ventajas del Hidrógeno 51
2.6 ENFOQUE DE MAPA DE MOTOR 53
2.6.1 Fundamentos y representación de mapas de motor 53
2.6.2 Mapas de motor de consumo de combustible 55
2.6.3 Mapas de motor de emisiones 56
2.7 PROGRAMAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS 57
2.7.1 Programas Estadísticos de Acceso Libre 57
2.7.2 Programas Estadísticos de Acceso Comercial 58
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS 59
3.1 DETERMINACIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO 59
3.1.1 Variables Cinemáticas 61
3.1.2 Modos de Operación 61
3.1.3 Variables Operativas 62
3.1.4 Parámetros de Rendimiento 63
3.2 DEFINICIÓN DEL VEHÍCULO DE PRUEBA 64
3.2.1 Criterio de Selección 64
3.2.2 Vehículo Seleccionado 64
3.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS 66
3.3.1 Equipo de generación de hidrógeno 68
3.3.2 Cromatógrafo de gases PerkinElmer Clarus 500 69
3.3.3 Anemómetro Testo 480 70
3.3.4 Cámara termográfica TOPDON TC001 71
3.3.5 iPEMS 3DATX parSYNC FLEX-PNC 72
3.3.6 Equipo de adquisición de datos ELM327 78
3.3.7 Aplicación de extracción de datos Torque Pro 79
3.3.8 Cable divisor OBD-II 80
3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE HIDRÓGENO 81

3.5 ENSAYO DE CROMATOGRAFÍA DE GASES 82
3.6 PRUEBAS PILOTO Y CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS 84
3.6.1 Prueba de Comunicación del ELM327 84
3.6.2 Prueba de Flujo del Anemómetro Testo 480 87
3.6.3 Prueba de comunicación del equipo PEMS 89
3.6.4 Prueba de comunicación del equipo TopDon TC001 Plus 96
3.7 EJECUCIÓN DE CAMPAÑA EXPERIMENTAL 99
3.7.1 Características de la Ruta Seleccionada 100
3.7.2 Ruta de estudio 100
3.7.3 Ensayo de termográfia 107
3.8 PROCESAMIENTO DE DATOS 107
3.8.1 Pre-procesamiento de datos 107
3.8.2 Procesamiento de datos 113
3.8.3 Post-procesamiento de datos 124
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN 132
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL HIDRÓGENO 132
4.1.1 Comparativa de caudal volumétrico del hidrógeno generado 132
4.1.2 Composición del gas hidrógeno 134
4.2 COMPARATIVA TERMOGRÁFICA 135
4.2.1 Colector de escape 135
4.2.2 Convertidor Catalítico 137
4.3 CINEMÁTICA DEL VEHÍCULO Y LA RUTA DE ESTUDIO 140
4.3.1 Caracterización cinemática de la ruta de estudio 140
4.3.2 Aceleración Relativa Positiva de la ruta 143
4.3.3 Comparativa cinemática entre ensayos 145
4.4 MODOS DE OPERACIÓN 147
4.5 VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN LOS GASES DE ESCAPE 149
4.5.1 Variación de la mezcla aire combustible 149
4.5.2 Comparativa en concentración volumétrica de las emisiones por tramos 151
4.6 MAPAS DE MOTOR DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES 157
4.6.1 Mapas de motor de tasas de consumo y emisiones 157

4.6.2 Mapas de motor de Consumo y emisiones específicas 160
4.7 COMPARATIVA DE EMISIONES Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE 163
4.7.1 Comparativa de tasas de consumo y emisiones por tramos 163
4.7.2 Comparativa de rendimiento y emisiones específicas efectivas por tramos 169
4.8 COMPARATIVA DEL RENDIMIENTO DEL VEHÍCULO 174
4.8.1 Valores promedio: BTE, BSFC y tasas de consumo de combustible 174
4.8.2 Valores promedio de tasas de emisión 175
4.8.3 Valores promedio de factores de emisión específicos 177
4.8.4 Factores de emisión y consumo de combustible por distancia 178
4.8.5 Comparativa de factores de emisión de CO_2 179
4.9 DISCUSIÓN DE RESULTADOS 181
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 185
5.1 CONCLUSIONES 185
5.2 RECOMENDACIONES 187
ANEXOS 197

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Ciclos Termodinámicos* 34
Tabla 2. *Evolución de las normas Tier para vehículos ligeros* 46
Tabla 3. *Variables de simulación en pruebas de conducción* 61
Tabla 4. *Tramos de la ruta de estudio* 62
Tabla 5. *Modos de operación según el estado del vehículo* 62
Tabla 6. *Variables operativas del vehículo* 63
Tabla 7. *Parámetros de rendimiento del vehículo* 63
Tabla 8. *Especificaciones técnicas del vehículo Chevrolet Aveo Family* 65
Tabla 9. *Equipos Utilizados en la Investigación* 67
Tabla 10. *Especificaciones técnicas del equipo generador de hidrógeno* 68
Tabla 11. *Especificaciones técnicas del Cromatógrafo de gases PerkinElmer Clarus 500* 70
Tabla 12. *Especificaciones técnicas del Anemómetro Testo 480* 71
Tabla 13. *Especificaciones técnicas de la cámara termográfica TC001* 72
Tabla 14. *Especificaciones técnicas del equipo PEMS 3DATX* 73
Tabla 15. *PIDS seleccionados en la interfaz Torque Pro* 86
Tabla 16. *Parámetros de temperatura y emisividad térmica* 98
Tabla 17. *Información General de la ruta de Prueba* 101
Tabla 18. *Calles Avenidas e Intersecciones que componen el Tramo Urbano* 102
Tabla 19. *Calles Avenidas e Intersecciones que componen el Tramo Sub-urbano* 105
Tabla 20. *Calles Avenidas e Intersecciones que componen el Tramo Autopista* 106
Tabla 21. *Codebook iPems* 110
Tabla 22. *Codebook Torque Pro* 111
Tabla 23. *Parámetros y Constantes del estudio* 117
Tabla 24. *Ecuaciones de flujo másico por gas de escape* 120
Tabla 25. *Características cinemáticas de la ruta de estudio* 145
Tabla 26. *Valores característicos del factor Lambda por tramo* 151
Tabla 27. *Resumen estadístico del consumo de combustible y emisiones del tramo urbano* 164
Tabla 28. *Resumen estadístico del consumo de combustible y emisiones del tramo suburbano* 165
Tabla 29. *Resumen estadístico del consumo de combustible y emisiones del tramo de autopista* 167

Tabla 30. *Valores estadísticos del consumo de combustible y emisiones de la ruta completa* .. 168
Tabla 31. *Valores estadísticos del BTE, BSFC y emisiones específicas del tramo urbano*..... 169
Tabla 32. *Valores estadísticos del BTE, BSFC y emisiones específicas del tramo suburbano* .. 171
Tabla 33. *Valores estadísticos del BTE, BSFC y emisiones específicas del tramo de autopista* 172
Tabla 34. *Valores estadísticos del BTE, BSFC y emisiones específicas de la ruta completa* 173
Tabla 35. *Valores promedio de BTE, BSFC y tasa de consumo de combustible*..... 174
Tabla 36. *Valores porcentuales de BTE, BSFC y tasa de consumo de combustible* 175
Tabla 37. *Valores promedio de las tasas de emisión*..... 176
Tabla 38. *Variación porcentual de las tasas de emisión* 176
Tabla 39. *Valores promedio de los factores de emisión* 177
Tabla 40. *Variación porcentual de factores de emisión energéticos*..... 177
Tabla 41. *Factores de emisión por distancia y consumo de combustible*..... 178
Tabla 42. *Variación porcentual de factores de emisión y consumo de combustible* 178
Tabla 43. *Comparativa de factores de emisión CO_2 por distancia* 180
Tabla 44. *Variación porcentual de comparativa de factores de emisión CO_2* 180

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. *Inyección de la mezcla aire-combustible* 29
Figura 2. *Primer tiempo admisión* 30
Figura 3. *Segundo tiempo compresión* 31
Figura 4. *Tercer tiempo combustión y expansión* 32
Figura 5. *Cuarto tiempo escape* 33
Figura 6. *Emisiones y eficiencia del automóvil* 37
Figura 7. *Variación de la concentración de emisiones con relación a la mezcla aire/combustible* 39
Figura 8. *Contribuciones globales de los gases de efecto invernadero hasta 2020* 40
Figura 9. *Ciclo de conducción WLTC* 41
Figura 10. *Ejemplo de configuración del método de muestreo directo* 41
Figura 11. *Concepto básico del método CVS Venturi* 42
Figura 12. *Esquema de Instalación PEMS* 43
Figura 13. *Configuración del sistema de sensor remoto* 44
Figura 14. *Normas de emisiones de la UE para turismos (categoría M1)* 45
Figura 15. *Origen del hidrógeno producido en la actualidad* 48
Figura 16. *Métodos de producción H_2* 48
Figura 17. *Esquema de una celda electrolítica* 51
Figura 18. *Valores de poder calorífico de diversos combustibles medidos a 25 °C y 1 atm* 52
Figura 19. *Adición de Hidrógeno en la admisión de un MEP* 53
Figura 20. *Mapa de cuadrícula del funcionamiento de un motor por tipo de tramo* 54
Figura 21. *Mapa bidimensional de contorno de BTE y BSFC* 55
Figura 22. *Curva de isoconsumo de motor sobrealimentado* 56
Figura 23. *Curva de la taza de CO2 de motor Diesel* 56
Figura 24. *Diagrama de la metodología aplicada en el estudio* 59
Figura 25. *Diagrama causal de las variables de estudio* 60
Figura 26. *Estadísticas de ventas de vehículos anuales AEADE* 64
Figura 27. *Vehículo Aveo Family empleado en la campaña experimental* 65
Figura 28. *Equipo generador de hidrógeno* 68
Figura 29. *Cromatógrafo de gases PerkinElmer Clarus 500* 69

Figura 30. *Bolsas Tedlar* 69
Figura 31. *Anemómetro Testo 480* 70
Figura 32. *Cámara termográfica TC001* 71
Figura 33. *Equipo PEMS 3DATX* 73
Figura 34. *Estación meteorológica con GPS* 74
Figura 35. *OBD Vgate vLinker* 74
Figura 36. *Software FLEXstudio* 75
Figura 37. *Central eléctrica portátil Oukitel P2400* 75
Figura 38. *Fuente de alimentación Mean Well* 76
Figura 39. *Baterías recargables Milwaukee M18 8.0 Ah* 76
Figura 40. *Sistema de Muestreo iPems 3DATX* 77
Figura 41. *Filtros HEPA* 77
Figura 42. *Tuberías de conexión A60-G Tygon* 78
Figura 43. *Cartuchos equipo iPems* 78
Figura 44. *Datalogger ELM327* 79
Figura 45. *Interfaz Torque Pro* 79
Figura 46. *Apartado de información en tiempo real Torque Pro* 80
Figura 47. *Cable divisor OBD-II* 81
Figura 48. *Esquema de montaje de la celda de electrólisis* 81
Figura 49. *Instalación de la celda de electrólisis* 82
Figura 50. *Esquema general del ensayo de cromatografía de gases* 83
Figura 51. *Esquema de conexión y extracción de la muestra en la bolsa tedlar* 83
Figura 52. *Diagrama de conexión ELM327 a Torque Pro* 85
Figura 53. *Configuración del perfil del vehículo en la interfaz Torque Pro* 85
Figura 54. *Registro de datos .CSV* 87
Figura 55. *Configuración anemómetro Testo 480* 88
Figura 56. *Configuración software EasyClimate* 89
Figura 57. *Diagrama de conexión y montaje físico iPems 3DATX* 90
Figura 58. *Entrada de alimentación iPems 3DATX* 91
Figura 59. *Conexión de la fuente de alimentación iPems 3DATX* 91
Figura 60. *Conexión de tuberías y sondas iPems 3DATX* 92

Figura 61. *Líneas de calibración del iPems 3DATX* 92
Figura 62. *Contador del número de partículas del iPems 3DATX* 93
Figura 63. *Áreas principales del software FLEXstudio* 94
Figura 64. *Menú del software FLEXstudio* 95
Figura 65. *Ajuste a cero mediante el software FLEXstudio* 95
Figura 66. *Configuración final de los sensores del equipo iPems 3DATX* 96
Figura 67. *Conexión de la cámara térmica TopDon TC001 Plus* 97
Figura 68. *Configuración de captura de imágenes termográficas* 98
Figura 69. *Configuración de monitoreo de temperatura en tiempo real* 99
Figura 70. *Ruta de estudio en la ciudad de Riobamba* 101
Figura 71. *Recorrido del Tramo Urbano* 102
Figura 72. *Recorrido del Tramo Suburbano* 105
Figura 73. *Recorrido del Tramo Autopista* 106
Figura 74. *Fases de procesamiento de datos* 107
Figura 75. *Diagrama de flujo del pre-procesamiento de datos* 108
Figura 76. *Interfaz de R Studio* 109
Figura 77. *Código de sincronización de datos* 112
Figura 78. *Gráfica de sincronización de datos RPM vs Tiempo(s)* 113
Figura 79. *Diagrama de flujo del procesamiento de datos* 114
Figura 80. *Diagrama de flujo del post-procesamiento de datos* 125
Figura 81. *Fragmento de código de Perfil Velocidad vs Tiempo* 126
Figura 82. *Fragmento de código de Perfil Aceleración vs Tiempo* 127
Figura 83. *Fragmento de código de Perfil Altitud vs Tiempo* 127
Figura 84. *Código de preparación de datos para gráfico de barras apiladas* 128
Figura 85. *Fragmento de código para gráfica de barras apiladas* 129
Figura 86. *Fragmento de código para gráficos de mapa motor* 130
Figura 87. *Comparativa de Caudal volumétrico del gas hidrógeno* 133
Figura 88. *Resultados de cromatografía de gases* 134
Figura 89. *Comparativa térmica del colector de escape a 820 RPM* 135
Figura 90. *Mapa térmico del colector de escape a 820 RPM* 136
Figura 91. *Comparativa térmica del colector de escape a 3000 RPM* 136

Figura 92. *Mapa térmico del colector de escape a 3000 RPM* 137
Figura 93. *Comparativa térmica del convertidor catalítico a 820 RPM* 138
Figura 94. *Mapa térmico del convertidor catalítico a 820 RPM* 138
Figura 95. *Comparativa térmica del colector de escape a 3000 RPM* 139
Figura 96. *Mapa térmico del convertidor catalítico a 3000 RPM* 139
Figura 97. *Perfil Altitud vs Tiempo* 141
Figura 98. *Perfil Velocidad vs Tiempo* 142
Figura 99. *Perfil Aceleración vs Tiempo* 143
Figura 100. *Aceleración relativa positiva instantánea de la ruta* 144
Figura 101. *Valor acumulativo de la aceleración relativa positiva en ruta* 144
Figura 102. *Modos de Operación del Vehículo* 148
Figura 103. *Variación de la mezcla aire-combustible* 150
Figura 104. *Concentración volumétrica de O_2* 152
Figura 105. *Concentración volumétrica de CO_2* 153
Figura 106. *Concentración volumétrica de CO* 154
Figura 107.*Concentración volumétrica de HC* 155
Figura 108. *Concentración volumétrica de NOx* 156
Figura 109. *Mapa de motor de la tasa de Consumo de combustible (FC)* 157
Figura 110. *Mapas de motor de tasas de emisiones de CO2 y CO* 158
Figura 111. *Mapas de motor de tasas de emisiones de HC y NOx* 159
Figura 112. *Mapas de motor de eficiencia térmica y consumo de combustible efectivo* 160
Figura 113. *Mapas motor de emisiones específicas efectivas de CO_2 y CO* 161
Figura 114. *Mapas motor de emisiones específicas efectivas de HC y NOx* 162
Figura 115. *Distribución de tasas de consumo y emisiones del tramo urbano* 164
Figura 116. *Distribución de tasas de consumo y emisiones del tramo suburbano* 165
Figura 117. *Distribución de tasas de consumo y emisiones del tramo de autopista* 166
Figura 118. *Distribución de tasas de consumo y emisiones de la ruta completa* 168
Figura 119. *Distribución de BTE, BSFC y emisiones específicas del tramo urbano* 169
Figura 120. *Distribución de BTE, BSFC y emisiones específicas del tramo suburbano* 170
Figura 121. *Distribución de BTE, BSFC y emisiones específicas del tramo de autopista* 172
Figura 122. *Distribución de BTE, BSFC y emisiones específicas ruta completa* 173

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de Investigación

1.1.1 Antecedentes

El impacto ambiental asociado a la producción y al consumo de energía incide negativamente en la calidad del aire local y el clima a nivel mundial. La Organización Mundial de la Salud (OMS) afirma que el 92% de la población en el mundo habita en lugares donde los niveles de contaminación son superiores a los límites establecidos. Las principales fuentes de contaminación del aire se deben a situaciones como la quema de desechos y el consumo de combustibles fósiles en centrales, hogares o incluso por los medios de transporte ineficientes (Arroyo & Miguel, 2019).

En el caso del Ecuador, según el Ministerio de Energía y Minas (2022) los combustibles fósiles tuvieron una participación del 80.1 % entre los años 2012 y 2022, representando la gasolina y el diésel un crecimiento del 25.1 % y 23.3 %, respectivamente. De igual forma, el gas licuado de petróleo registró una demanda del 37.7 %, mostrando una notable dependencia a este tipo de combustibles.

En respuesta a esta problemática, el sector automotriz ha implementado diversas estrategias impulsadas por normativas anticontaminación más estrictas. Estas incluyen el desarrollo de sistemas postcombustión, avances en los sistemas de propulsión como los motores eléctricos e híbridos, y la incorporación de tecnologías que emplean combustibles alternativos (Sernauto, 2025). De esta manera, una propuesta relevante en la época actual es la implementación de sistemas duales, como los que combinan gasolina o diésel con hidrógeno para alcanzar una quema del combustible más eficiente (Tamayo et al., 2016).

Entre los estudios que han evaluado el impacto de la implementación de sistemas duales tenemos a, García et al. (2022), quienes realizaron un análisis en un motor estacionario de 171 cc, bajo cuatro condiciones de carga: 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, y tres concentraciones de hidrógeno: 3 %, 6 % y 9 %. Los resultados demostraron que la adición de este gas redujo las emisiones de HC en 3.3 %, 6.7 % y 9.8 %, las de CO en 3.5 %, 6.9 % y 10.9 %, además de las de CO_2 en 3.1 %, 8.7 % y 12.1 %, respectivamente para cada concentración de hidrógeno. Por otra parte, se registró un

incremento de NOx de 4.7 %, 8.7 % y 14.9 % para las mismas concentraciones, bajo una condición de carga del 100 %.

Por otro lado, la investigación desarrollada por El-Kassaby et al. (2016) experimentó con la construcción de un sistema para generar gas hidroxilo y evaluó el efecto en un motor a gasolina Skoda Felicia 1.3 CLXi, obteniendo una producción de gas de 18 L/h, un aumento del 10% en la eficiencia térmica, y una reducción del 34% BSFC; en cuanto a las emisiones, reducciones del 18% en el CO, 14% en los HC y 15% en los NOx.

Otra investigación, por parte de Paluch & Noga (2025), evaluó el impacto del hidrógeno bajo la combinación de una válvula EGR en un motor Fiat Grande Punto 1.4L 8V, donde la eficiencia del motor incrementó en un 4% sin la EGR y con la misma alcanzó hasta un 10% de mejora; además, las emisiones de CO se redujeron en un 22% y las de NOx hasta un 89%, determinando que a mayores concentraciones de hidrógeno la eficiencia y la reducción de emisiones mejoran, a pesar de que los descensos de CO y O_2 no superan el 6%.

Por otra parte, Laverde et al. (2015) diseñaron e implementaron, por otra parte, una celda de hidrógeno en un vehículo Kawasaki ZX750, evaluando potencia, torque, eficiencia de combustible y emisiones bajo suministro de gas de 1.33×10^{-8} m^3/s. Los resultados mostraron un incremento de potencia del 15.14% y disminuciones en el par motor y consumo de combustible del 4.91% y 7.53% respectivamente. Además, se observaron notables reducciones en las emisiones de CO en 20.51%, HC en 48% y CO_2 en 5.52%.

No obstante, las investigaciones descritas anteriormente fueron desarrolladas bajo condiciones de ensayo estáticas, por lo que no representan completamente el comportamiento del sistema en condiciones reales de operación. Bajo este enfoque, el trabajo de Cabrera et al. (2013) es uno de los pocos ensayos en condiciones dinámicas mediante el uso de un dinamómetro de chasis, mostrando reducciones del 8.91% en BSFC, 15.25% en HC, 52.29% en NOx y 55.5% en CO, aunque con un incremento promedio del 1.75% en CO_2. Si bien estos resultados son prometedores, la ausencia de representaciones mediante mapas de motor y la limitada cantidad de estudios impiden establecer conclusiones sobre la eficiencia de estos sistemas en condiciones de uso real.

1.1.2 Planteamiento del Problema

En los últimos años, el incremento del costo de los combustibles, junto con la necesidad de reducir el impacto ambiental asociado al transporte, ha impulsado la búsqueda de alternativas que permitan mejorar la eficiencia de los motores de combustión interna y disminuir las emisiones contaminantes. Como respuesta a esta necesidad, se han desarrollado diferentes tecnologías complementarias y aditivos para el combustible orientados a optimizar el proceso de combustión sin requerir la sustitución inmediata del parque automotor.

Esta situación queda reflejada en las emisiones globales de CO_2 provenientes de combustibles fósiles, que en 2022 alcanzaron 36 099.81 millones de toneladas. El sector transporte en Ecuador produjo 2.8 millones de toneladas de CO_2, lo que equivale al 26.5 % de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero (Ramos, 2023). Entre las principales causas se encuentran elevado consumo de combustibles fósiles, que representan el 80.1 % de la energía final utilizada en el país, de la cual el sector transporte consume el 48.99 %, y la regulación nacional de combustibles, que sigue bajo la norma Euro 3, con más de veinte años de retraso. Esta combinación de factores incrementa las emisiones del sector y dificulta la adopción de tecnologías para disminuir los niveles de contaminación (Muñoz et al., 2023).

Como resultado, persiste una alta dependencia de los combustibles fósiles, mientras que la adopción masiva de alternativas, tales como vehículos eléctricos e híbridos, enfrenta limitaciones económicas e infraestructurales. Por este motivo, es pertinente evaluar tecnologías complementarias que puedan incorporarse a los motores convencionales, con el objetivo de mejorar su eficiencia y reducir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes, sin requerir grandes modificaciones en la flota vehicular existente.

Una de estas alternativas corresponde a la implementación del hidrógeno como vector energético y aditivo en motores de combustión interna, específicamente mediante su inyección a baja presión en el múltiple de admisión. Este enfoque plantea la posibilidad de optimizar la combustión, disminuir el consumo de combustible y reducir las emisiones contaminantes. Por ello, el presente Trabajo de Titulación tiene como finalidad evaluar el rendimiento de un vehículo con motor de ciclo Otto tras la incorporación de un generador de hidrógeno basado en electrólisis, utilizando un enfoque basado en mapas de motor y pruebas en condiciones reales de operación.

1.2 Justificación

En Ecuador, el control de emisiones se basa en estándares establecidos por el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), que incorpora regulaciones internacionales como Euro 3 para limitar los contaminantes vehiculares. Desde el año 2002, se han establecido normativas como la NTE INEN 2204 para vehículos a gasolina y la NTE INEN 2207 para vehículos diésel, con la finalidad de reducir el impacto ambiental del parque automotor y proteger la salud humana (INEN, 2024). Sin embargo, la eficiencia energética aún presenta dificultades, principalmente por la mala calidad del combustible y la falta de estrategias que permitan avanzar hacia normativas más estrictas, como la normativa Euro 6.

En tal sentido, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas presentó en 2023 la Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible 2023-2070 (PNMUS), enfocada en la reducción de emisiones a través de la adopción de tecnologías limpias, en cumplimiento con el Art. 15 de la Constitución de la República del Ecuador (CRE). Esta política, en su Objetivo B, busca disminuir el impacto negativo de la movilidad, reducir las emisiones de GEI, promover modos de movilidad sostenible y eficiente e incorporar infraestructura resiliente frente al cambio climático (Muñoz et al., 2023). Esta iniciativa se relaciona con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 11 de las Naciones Unidas, específicamente con la meta 11.6, la cual busca disminuir los efectos ambientales relacionados a las actividades urbanas, haciendo énfasis en la mejora de la calidad del aire y la gestión de los residuos (United Nations, 2025). De esta manera, se promueve la investigación e innovación en sistemas de movilidad ecológica que permitan reducir la dependencia de combustibles fósil, sin embargo, actualmente no existen proyectos en el país que impulsen la aplicación de tecnologías como el hidrógeno en motores de combustión interna (MCI).

Por esta razón, el presente Trabajo de Titulación busca evaluar el hidrógeno como vector energético en un motor de ciclo Otto, analizando su impacto en el consumo de combustible y la reducción de emisiones contaminantes hacia el ambiente. Su valor como vector energético radica en la capacidad de almacenar y liberar energía de manera estable, minimizando pérdidas y permitiendo una mayor conservación a lo largo del tiempo. En los generadores de hidrógeno, este gas se obtiene mediante electrólisis, utilizando la electricidad para dividir el agua (H_2O) en moléculas de hidrógeno (H) y oxígeno (O), inyectando posteriormente el hidrógeno a baja presión

en la corriente de aire de la admisión del motor para mejorar la combustión y optimizar el consumo de combustible (BetterFuel, 2025).

No obstante, pese a su potencial, la implementación de hidrógeno en MCI ha sido investigada de manera forma en el país. La falta de evidencias de carácter científico y técnico que respalde sus beneficios ha generado incertidumbre y debate en la industria automotriz, dando lugar a posturas divididas entre especialistas y la sociedad. Por lo tanto, este análisis busca aportar datos concretos sobre su influencia en el rendimiento vehicular bajo distintas condiciones de operación, y servir de base para futuras investigaciones orientadas a la reducción del consumo de combustible y las emisiones contaminantes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar el impacto de la inyección de hidrógeno en el múltiple de admisión del motor de un vehículo, evaluando su influencia en el consumo de combustible y emisiones de gases mediante el enfoque de mapa de motor.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Comprender el efecto de la adición de hidrógeno en el rendimiento y las emisiones de un vehículo con motor de encendido provocado.
- Registrar datos del consumo de combustible y emisiones de un vehículo operando con mezcla convencional e inyección de hidrógeno, utilizando una celda de electrólisis.
- Desarrollar los mapas de motor de eficiencia de combustible y emisiones empleando software estadístico de código abierto.
- Analizar la variación en el consumo de combustible y los factores de emisión del vehículo posterior a la implementación de hidrógeno.

1.4 Alcance

El presente proyecto de investigación se estructurará en cuatro etapas, que comprende inicialmente de un análisis bibliográfico de la adición de hidrógeno como aditivo de combustible en motores de encendido provocado, haciendo énfasis en las emisiones de gases contaminantes y el rendimiento de combustible.

Posteriormente, se llevará a cabo una etapa experimental en un vehículo de subcategoría M1 con sistema de inyección multipunto, utilizando gasolina Extra. Esta fase incluirá pruebas en ruta para analizar el comportamiento del motor antes y después de incorporar hidrógeno en el sistema de admisión, registrando datos asociados con los factores de emisión de gases y el rendimiento de combustible.

A continuación, los datos adquiridos en la etapa experimental serán procesados mediante el uso de un software estadístico libre a fin de filtrar y clasificar los datos de mayor relevancia y de forma paralela desarrollar los mapas de motor correspondientes al consumo de combustible y emisiones.

Finalmente, se analizará la variación del consumo de combustible del vehículo y los factores de emisiones, comparando su rendimiento antes y después de la implementación de hidrógeno en el sistema de admisión del motor.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO

Los motores de encendido provocado (MEP) son uno de los sistemas de conversión energética más utilizados en el sector del transporte. Su funcionamiento se basa en la transformación de la energía química del combustible en energía mecánica mediante procesos de combustión controlada. Debido a su importancia en el desarrollo de la movilidad moderna, resulta necesario comprender su evolución, características principales y principios de operación.

2.1.1 Evolución y características de los motores de encendido provocado

Los MEP representan una de las variantes más populares de los MCI, especialmente en vehículos livianos. Su desarrollo ha estado ligado a la búsqueda de mayores niveles de eficiencia, confiabilidad y desempeño, incorporando progresivamente avances mecánicos, electrónicos y de control que han permitido optimizar su funcionamiento a lo largo del tiempo

2.1.1.1 Historia y evolución de los MEP

La invención del MCI representó un avance trascendental en el desarrollo de la movilidad y el transporte en la sociedad moderna. Su origen se remonta a 1860, cuando Étienne Lenoir construyó el primer motor funcional utilizando gas de coque como combustible, aunque con una eficiencia muy limitada alcanzando a penas el 3%. El verdadero avance se produjo en 1876, cuando Nicolaus Otto desarrolló el motor de cuatro tiempos, estableciendo el denominado ciclo Otto, que permitió mejorar significativamente la eficiencia térmica mediante la compresión previa de la mezcla aire-combustible (Fanelli, 2020).

Mas tarde, el MCI evolucionó aún más cuando Rudolf Diesel introdujo el motor diesel en 1892, basado en la autoignición del combustible y caracterizado por una construcción más robusta y mayores relaciones de compresión (Payri & Desantes, 2011). Más adelante, inventores como Wilhelm Maybach y Gottlieb Daimler adaptaron estos sistemas a vehículos ligeros, impulsando el nacimiento de la industria automotriz moderna. Durante el siglo XX, los MEP se convirtieron en uno de los principales sistemas de propulsión utilizados en el transporte terrestre, gracias a la incorporación de sistemas de encendido avanzados, mejoras en la alimentación de combustible, materiales más ligeros y tecnologías electrónicas (Fanelli, 2020).

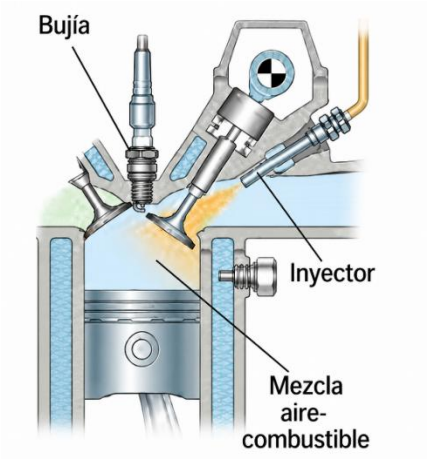
2.1.2 Principio de Funcionamiento de los MEP

Dentro de los MCI, se reconocen diversas clasificaciones según el tipo de encendido y el diseño mecánico. Entre los más representativos se encuentran los MEP, los MEC y los motores de ciclo Wankel (Sanz, 2011). Estos pueden configurarse en versiones de dos o cuatro tiempos, dependiendo de su aplicación. Para el propósito del presente estudio, se abordará específicamente el principio de funcionamiento de los MEP.

Los MEP operan bajo el ciclo Otto y convierten la energía química de la gasolina en energía mecánica mediante un proceso de combustión controlada dentro de los cilindros. La gasolina, por sus propiedades como alta volatilidad y elevado poder calorífico (aproximadamente 44 000 kJ/kg), permite una combustión eficiente cuando se mezcla adecuadamente con aire en proporciones cercanas a 14.7:1 (Sanz, 2011).

La formación de esta mezcla es gestionada por el sistema de inyección, encargado de dosificar el combustible y combinarlo con el aire antes de su ingreso al cilindro (Figura 1). Una vez que la mezcla entra en la cámara de combustión, el pistón la comprime y, antes de que llegue al punto muerto superior (PMS), la mezcla se enciende mediante una chispa producida por las bujías. Este momento, conocido como avance de encendido, permite optimizar el rendimiento del motor. La potencia generada se controla principalmente regulando la cantidad de mezcla que entra, adaptando así su funcionamiento a la demanda de carga (Sanz, 2011).

Figura 1. *Inyección de la mezcla aire-combustible*



Tomado de: (Sanz, 2011)

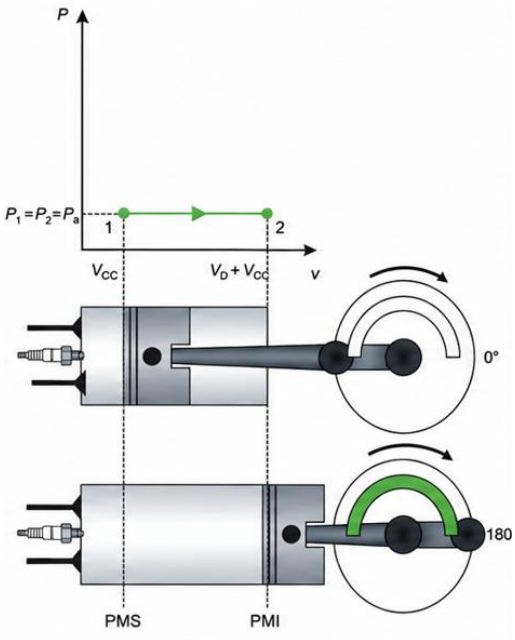
2.1.3 Ciclo termodinámico del MEP

El MEP ejecuta su ciclo de trabajo a lo largo de cuatro carreras del pistón, cada una correspondiente a un desplazamiento entre el punto muerto inferior (PMI) y el punto muerto superior (PMS), o viceversa. Estas carreras conforman lo que se conoce como los cuatro tiempos del ciclo termodinámico: admisión, compresión, combustión-expansión y escape (Calleja, 2022). Durante el desarrollo de este ciclo, es posible distinguir entre una representación teórica, basada en transformaciones ideales, y un comportamiento real, que incorpora las limitaciones físicas y termodinámicas propias del funcionamiento práctico del motor.

2.1.3.1 Ciclo Teórico

El ciclo termodinámico teórico inicia con la fase de admisión (1-2), donde el pistón parte del PMS y la válvula de admisión se abre completamente. A medida que el pistón desciende hasta el PMI, se genera un vacío que permite la entrada de la mezcla aire-combustible, manteniéndose una presión constante igual a la atmosférica. Esta transformación se considera isóbara, dado que no hay variación de presión durante el proceso. Al finalizar esta fase, el cigüeñal ha completado media vuelta, es decir, 180° de giro. El desarrollo completo de este proceso se ilustra en la Figura 2 (Calleja, 2022; Yolanda et al., 2014).

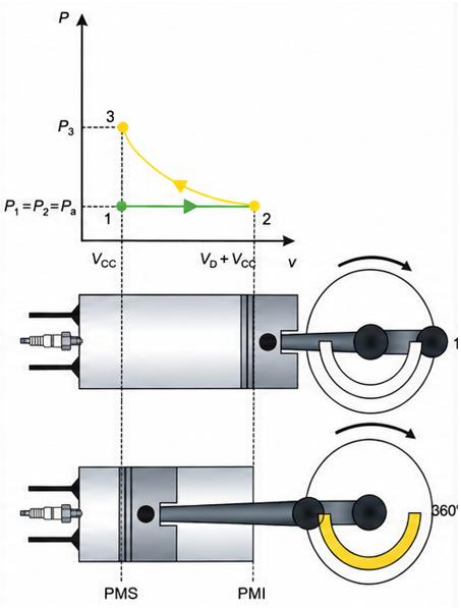
Figura 2. *Primer tiempo admisión*



Tomado de: (Calleja, 2022)

Durante la siguiente fase, correspondiente a la compresión (2-3), ambas válvulas permanecen cerradas mientras el pistón asciende desde el PMI hacia el PMS. En esta etapa, la mezcla es comprimida sin intercambio de calor con el entorno, por lo que se trata de una transformación adiabática e isentrópica. El volumen disminuye hasta alcanzar nuevamente el mínimo de la cámara, y como resultado de la compresión, la presión del fluido aumenta considerablemente. Concluida esta fase, el cigüeñal ha acumulado un giro total de 360°, completando una vuelta entera. La Figura 3 resume de manera general el desarrollo de todo el proceso. (Calleja, 2022; Yolanda et al., 2014).

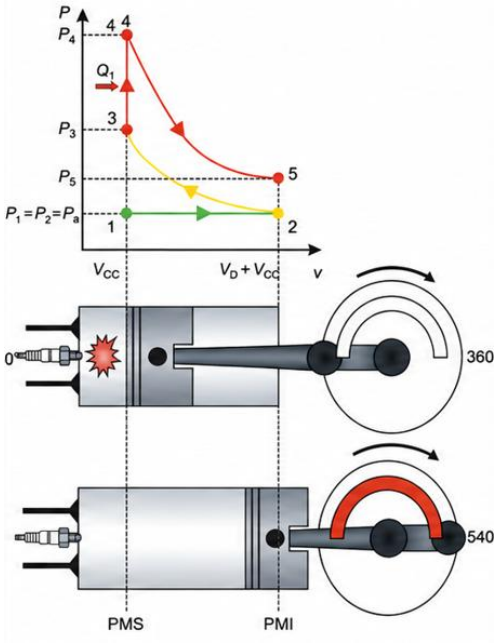
Figura 3. *Segundo tiempo compresión*



Tomado de: (Calleja, 2022)

A continuación, tiene lugar la fase de combustión y expansión (3-4-5). En el PMS, se produce la chispa de la bujía, lo que genera la combustión instantánea de la mezcla. Debido a que el volumen se mantiene constante durante este breve proceso, la transformación se considera isócora (3-4), generando un gran aumento de presión por causa del incremento súbito de la temperatura. Posteriormente, los gases resultantes empujan el pistón hacia abajo en su carrera hacia el PMI (4-5), dando paso a una expansión adiabática, donde el volumen aumenta y la presión disminuye progresivamente. Esta fase corresponde al trabajo útil del motor, y al finalizar, el cigüeñal ha girado 540° desde el inicio del ciclo. En la Figura 4 se representa cada etapa del proceso descrito (Calleja, 2022;Yolanda et al., 2014).

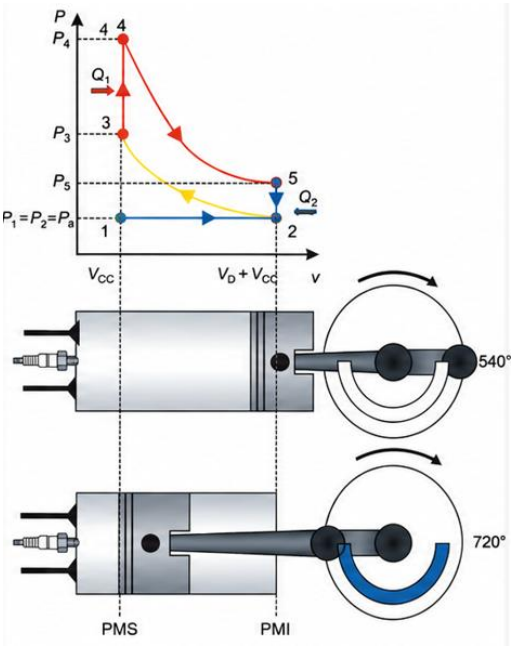
Figura 4. *Tercer tiempo combustión y expansión*



Tomado de: (Calleja, 2022)

El ciclo concluye con la fase de escape (5-2-1), dividida en dos etapas. Primero, al llegar al PMI, se abre la válvula de escape permitiendo la salida repentina de los gases residuales hacia la atmósfera. Esta descarga ocurre sin desplazamiento del pistón, lo que la convierte en una transformación isócora (5-2), acompañada de la cesión de calor al exterior. En la segunda etapa (2-1), el pistón asciende nuevamente hacia el PMS con la válvula de escape aún abierta, expulsando los gases quemados a presión constante. Esta transformación es isóbara y finaliza cuando el pistón alcanza el PMS y la válvula se cierra. En ese momento, el cigüeñal ha girado un total de 720°, es decir, dos vueltas completas que representan un ciclo completo del motor. Toda esta etapa se representa gráficamente en la Figura 5 (Calleja, 2022;Yolanda et al., 2014).

Figura 5. *Cuarto tiempo escape*



Tomado de: (Calleja, 2022)

Una vez concluida la fase de escape, el ciclo se repite continuamente mientras el motor se mantenga en funcionamiento. Este modelo idealizado, aunque útil para comprender el comportamiento general del motor, no contempla las pérdidas reales de calor, fricción ni las variaciones de presión que ocurren en condiciones reales de operación (Calleja, 2022; Yolanda et al., 2014).

2.1.3.2 Diferencias del Ciclo Teórico vs Ciclo Real

En este sentido en la Tabla 1, resulta pertinente establecer una comparación entre el ciclo teórico y el ciclo real, a fin de evidenciar cómo las condiciones ideales consideradas en los modelos académicos difieren de los fenómenos que efectivamente se manifiestan durante la operación del motor.

Tabla 1. *Ciclos Termodinámicos*

Fase del Ciclo	Ciclo Teórico	Ciclo Real
Admisión (1-2)	Proceso isóbaro (a presión constante). La presión es igual a la atmosférica.	Proceso con ligera depresión. La presión es inferior a la atmosférica por la restricción de la válvula de admisión.
Compresión (2-3)	Adiabática e isentrópica. Sin pérdidas térmicas ni fugas.	Prácticamente adiabática. Parte desde una presión menor y hay leves pérdidas de calor y posibles fugas.
Combustión (3-4)	Proceso isócoro (volumen constante). Combustión instantánea y completa.	Combustión progresiva. Comienza antes del PMS y presenta pérdidas relacionadas al retardo, al frente de llama y al enfriamiento.
Expansión (4-5)	Proceso adiabático ideal. No existe intercambio de calor con el entorno.	Pérdidas de calor hacia las paredes. La presión producida es inferior a la teórica.
Escape (5-1)	Parte isócora con descarga rápida, y parte isóbara con expulsión constante.	Ni isócora ni isóbaras ideales. La presión y el volumen varían debido a la restricción de la válvula de escape.

Nota. Adaptado de Transporte y Mantenimiento de Vehículos Tomado de: (Calleja, 2022)

2.2 FUNDAMENTOS DE COMBUSTIÓN Y FORMACIÓN DE EMISIONES

Las emisiones de contaminantes provenientes de los motores de combustión interna alternativos (MCIA), especialmente en los vehículos, pueden tener distintos orígenes, como las evaporaciones del combustible, las emisiones del cárter y los gases de la combustión. Como

resultado del proceso de combustión, se generan tanto gases contaminantes como gases de efecto invernadero (GEI), los cuales son liberados a la atmósfera a través del sistema de escape (de Antonio & Muñoz, 2016;Carreras et al., 2015).

2.2.1 Proceso de Combustión Ideal en MEP

El MEP es un motor térmico que opera mediante la combustión de una mezcla de aire y combustible altamente volátil (de Antonio & Munoz, 2016). Su funcionamiento depende de un sistema de encendido eléctrico que genera una chispa para inflamar la mezcla previamente comprimida. Para que la combustión se desarrolle de manera adecuada, es necesario que la mezcla sea homogénea, es decir, que el combustible vaporizado se distribuya uniformemente en el aire antes de ingresar al cilindro. La homogeneidad de la mezcla puede ser afectada si hay un exceso de aire o combustible, dificultando la propagación del frente de llama y, la combustión (Sanz, 2011; Carreras et al., 2015).

La calidad del proceso de combustión depende directamente de la proporción en que se combinan el aire y el combustible dentro del cilindro. Por esta razón, resulta necesario definir un parámetro que permita cuantificar dicha relación y evaluar las condiciones bajo las cuales opera el motor. Esta relación recibe el nombre de dosado (F), y se define mediante la Ec. (1):

$$F = \frac{m_{combustible}}{m_{aire}} \qquad \textbf{Ec. (1)}$$

Este parámetro permite clasificar la mezcla en tres tipos: dosado estequiométrico, dosado actual y dosado relativo. El dosado estequiométrico (Fe) corresponde a la relación teórica ideal de masa de combustible frente a la masa de aire necesaria para el proceso de combustión ideal de un hidrocarburo, hipotéticamente H_aC_b. La reacción estequiométrica se encuentra representada por la Ec. (2) (Carreras et al., 2015).

$$H_aC_b + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O \qquad \textbf{Ec. (2)}$$

Para el caso de la gasolina, cuya composición química aproximada es C_8H_{18}, la representación de combustión estequiométrica está dada por la Ec. (3) (Arias, 2025).

$$2C_8H_{18} + 25O_2 \rightarrow 16CO_2 + 18H_2O \qquad \textbf{Ec. (3)}$$

A partir de la relación del dosado estequiométrico, se define el dosado relativo (*Fr*), el cual expresa el cociente entre el dosado actual y el dosado estequiométrico, según la Ec. (4).

$$Fr = \frac{F}{Fe} \qquad \textbf{Ec. (4)}$$

De esta manera, se distinguen tres tipos de mezcla:

- $Fr < 1$: Mezcla pobre (exceso de aire)
- $Fr = 1$: Mezcla estequiométrica (proporción ideal)
- $Fr > 1$: Mezcla rica (exceso de combustible)

Adicionalmente, estos tres tipos de mezcla pueden ser expresados mediante el factor lambda (λ), mismo que se define como la relación entre el dosado estequiométrico y el dosado actual, o de otra manera, el inverso del dosado relativo, el cual Heywood (2018) representa por la Ec. (5).

$$\lambda = \frac{Fe}{F} = \frac{1}{Fr} \qquad \textbf{Ec. (5)}$$

2.2.2 Combustión Real en MEP

A diferencia del proceso de combustión ideal, en la combustión real intervienen diversos factores que alteran la reacción estequiométrica. Entre ellos se encuentran la composición del aire, la calidad del combustible, la temperatura y presión de la cámara de combustión, así como el diseño del motor. Estos factores generan productos secundarios además del dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O) (Albán & López, 2010). La combustión real puede representarse según la Ec. (6):

$$A\,C_xH_y + B\,O^2 + C\,N^2 + Contaminantes \rightarrow D\,CO^2 + E\,H^2O + F\,CO + G\,SO_x + H\,NO_x + Calor + Subproductos \qquad \textbf{Ec. (6)}$$

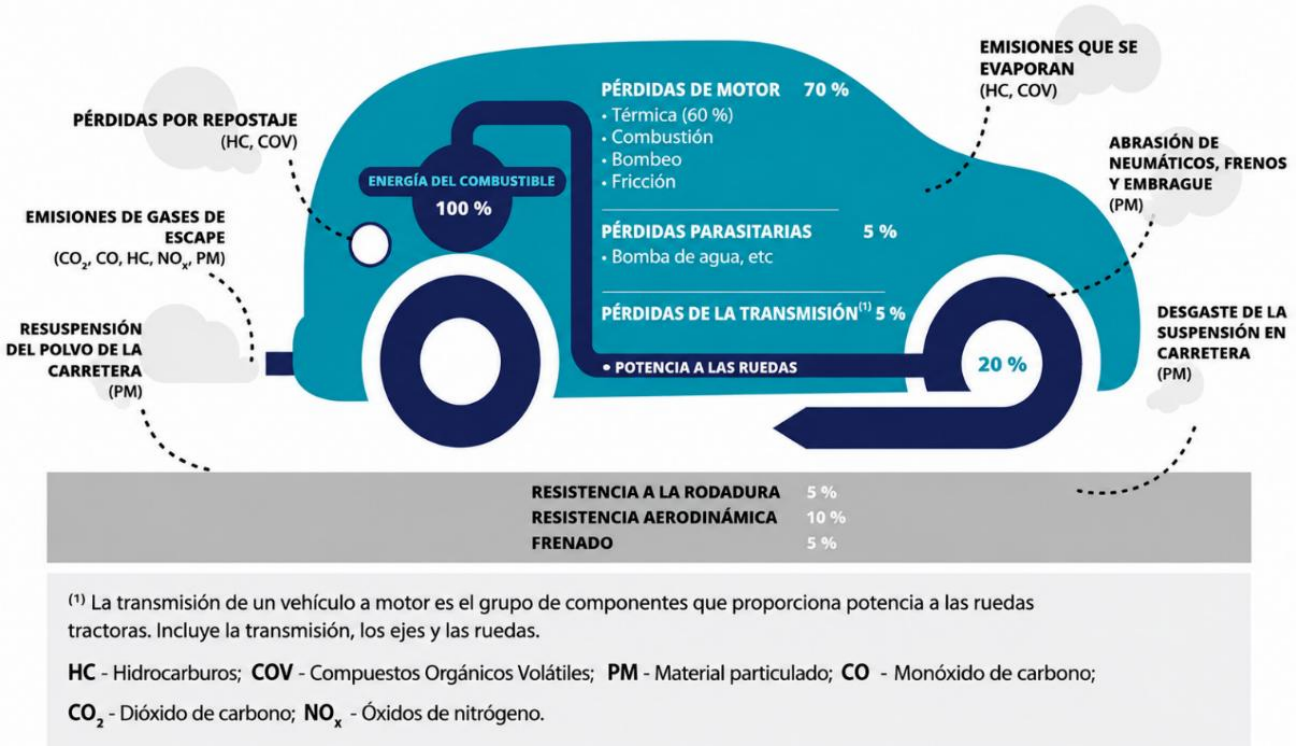
En esta ecuación, las letras A, B y C corresponden a los coeficientes estequiométricos del hidrocarburo CxHy, del oxígeno O_2 y del nitrógeno N_2, respectivamente. Por su parte, las letras D,

E, F, G y H representan las cantidades relativas de los productos generados durante la combustión: dióxido de carbono CO_2, vapor de agua H_2O, monóxido de carbono CO, óxidos de azufre SO_x y óxidos de nitrógeno NO_x (Albán & López, 2010). Algunos de estos elementos pueden ser eliminados mediante sistemas de postratamiento, mientras que otros deben ser reducidos mediante el uso de combustibles reformulados (Reif, 2015).

2.2.3 Tipos de Emisiones en un MCI: Gases Contaminantes y de Efecto Invernadero

Los MCI emiten diversos gases contaminantes y de efecto invernadero, los cuales impactan la calidad del aire y contribuyen al cambio climático. Según la European Environment Agency (2016), además de los gases de escape, también se generan emisiones debido al desgaste mecánico y la evaporación del combustible. n general, las emisiones de los vehículos se clasifican en tres grupos principales: emisiones de escape, emisiones por abrasión y emisiones evaporativas. Estas emisiones se ilustran en la Figura 6.

Figura 6. *Emisiones y eficiencia del automóvil*



Tomado de: (European Environment Agency, 2016)

Las emisiones por abrasión provienen de la abrasión mecánica de elementos como neumáticos, frenos y embrague, la corrosión de componentes del vehículo y el desgaste de la

superficie de la carretera. Estas son importantes para la formación de material particulado (PM) y de algunos metales pesados. Por otro lado, las emisiones evaporativas son el resultado de la liberación de vapores desde el sistema de almacenamiento y suministro de combustible del vehículo, afectando principalmente a la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV).

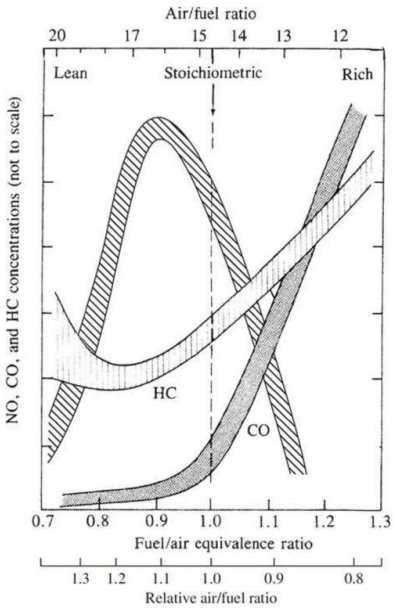
Las emisiones de escape provienen de la combustión de los combustibles fósiles, y producen contaminantes, los que dependen del tipo de combustible y de la tecnología del motor. Estas emisiones pueden clasificarse en contaminantes primarios y secundarios. Los contaminantes primarios se emiten directamente desde la fuente, como el CO, NO_x y PM, mientras que los contaminantes secundarios se forman en la atmósfera por reacciones químicas entre los primarios, como el ozono troposférico (O_3) y ciertos ácidos. A estos se suman los gases de efecto invernadero, como el CO_2, el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), aunque no son considerados contaminantes tradicionales, contribuyen al calentamiento global y alteraciones climáticas (Arias, 2025;Payri & Desantes, 2011).

2.2.3.1 Emisiones Contaminantes

Las emisiones contaminantes son un tipo de gases que afectan directamente la salud humana. Entre los principales contaminantes se encuentra el CO y HC, producidos en combustiones incompletas. El CO se caracteriza por ser incoloro e inodoro, al igual que los NOx, que se forman a partir de la reacción entre el oxígeno y el nitrógeno del aire en el motor cuando se alcanzan altas temperaturas. Por otro lado, los óxidos de azufre (SO_2) se generan en la combustión de combustibles sólidos y fuelóleos, contribuyendo a la contaminación atmosférica y la lluvia ácida (Carreras et al., 2015).

En los MEP, el dosado desempeña un papel clave en la generación de contaminantes (Carreras et al., 2015). El análisis de las concentraciones de los principales contaminantes en estos motores muestra que, a medida que la mezcla se enriquece ($\lambda < 1$), las emisiones de HC y CO aumentan considerablemente. Por otro lado, los óxidos de nitrógeno alcanzan su punto máximo en mezclas cercanas a la estequiométrica ($\lambda \approx 0.9$), como se observa en la Figura 7.

Figura 7. *Variación de la concentración de emisiones con relación a la mezcla aire/combustible*



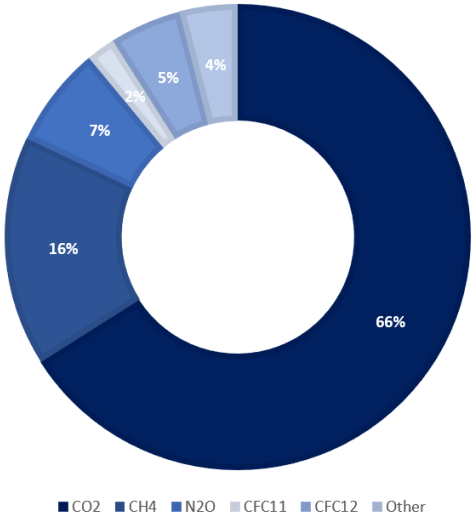
Tomado de: (Heywood, 2018)

2.2.3.2 Gases de Efecto Invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) son componentes gaseosos presentes en la atmósfera, tanto de origen natural como antropogénico, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro infrarrojo emitido por la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes. Estos gases pueden clasificarse en directos e indirectos según su impacto en el efecto invernadero (Benavides & León, 2007).

Los GEI directos son aquellos que contribuyen al calentamiento global en su forma emitida, sin necesidad de transformaciones químicas en la atmósfera. Entre ellos, el CO_2 es el más relevante después del vapor de agua, por ser un gas más pesado que el aire, generado como resultado de la quema de combustibles fósiles. El CH_4, generalmente proveniente de la descomposición de materia orgánica y el N_2O generado en menor medida por los combustibles fósiles. Por otra parte, los GEI indirectos no contribuyen directamente al efecto invernadero, pero participan en procesos químicos atmosféricos que favorecen la formación de GEI directos, entre ellos el O_3, así como otros compuestos como el butano, propano y etano. Aunque el CO no es un GEI, interviene en la química de la atmósfera y puede influir indirectamente en la formación de CH_4 y O_3 (Benavides & León, 2007). En la Figura 8 se resume de manera general los porcentajes de contribución de los GEI en el año 2020.

Figura 8. *Contribuciones globales de los gases de efecto invernadero hasta 2020*



Tomado de: (Barselina et al., 2022)

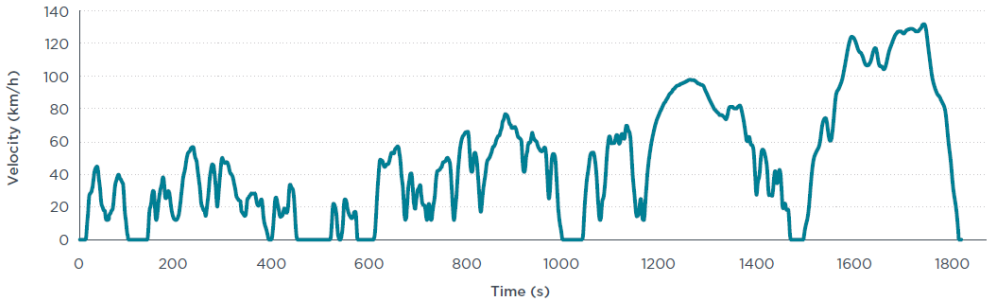
2.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE EMISIONES DE GASES

Los métodos de medición de emisiones son procedimientos técnicos empleados para cuantificar los gases contaminantes liberados por los vehículos. Entre los más utilizados se encuentran los ensayos de laboratorio, la medición a bordo con sistemas portátiles y la medición mediante sensor remoto en vía pública. Cada uno responde a distintas condiciones de evaluación y alcance de análisis.

2.3.1 Métodos de ensayos en laboratorio

La medición de emisiones en laboratorio se realiza bajo condiciones controladas, generalmente sobre un dinamómetro de chasis, donde el vehículo sigue un ciclo de conducción definido a partir de un perfil de velocidad en función del tiempo. Uno de los ciclos más representativos es el WLTC (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Cycle), por su mayor aproximación a condiciones reales de conducción. Este tipo de ensayo permite utilizar analizadores de alta precisión y obtener resultados comparables para procesos de homologación (González-Oropeza, 2005) . La Figura 9 presenta el perfil general del ciclo WLTC.

Figura 9. *Ciclo de conducción WLTC*



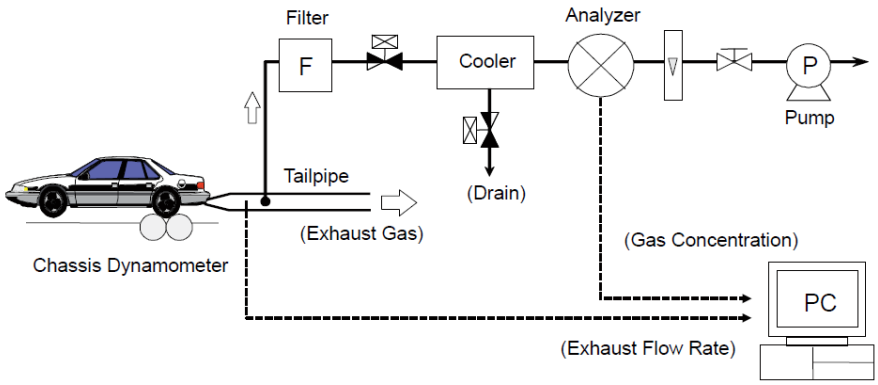
Tomado de: (Kühlwein et al., 2014)

En los ensayos de laboratorio, los gases de escape pueden medirse de dos formas. La primera consiste en una medición in situ, mediante sensores conectados directamente al sistema de escape. La segunda, más utilizada, se basa en extraer una muestra del gas y acondicionarla antes de su ingreso al analizador. Para ello, se requiere un sistema de muestreo encargado de preparar adecuadamente los gases antes de su medición (Seisakujo et al., 2014).

2.3.1.1 Método de muestreo directo

El método de muestreo directo permite medir la concentración de los gases de escape sin diluir la muestra. En este proceso, una fracción de los gases es extraída y filtrada previamente para eliminar partículas sólidas. Posteriormente, la muestra puede acondicionarse mediante un deshumidificador que enfría los gases, condensa la humedad y facilita una medición más precisa de los componentes restantes (Seisakujo et al., 2014). La Figura 10 muestra la configuración del método de muestreo directo.

Figura 10. *Ejemplo de configuración del método de muestreo directo*

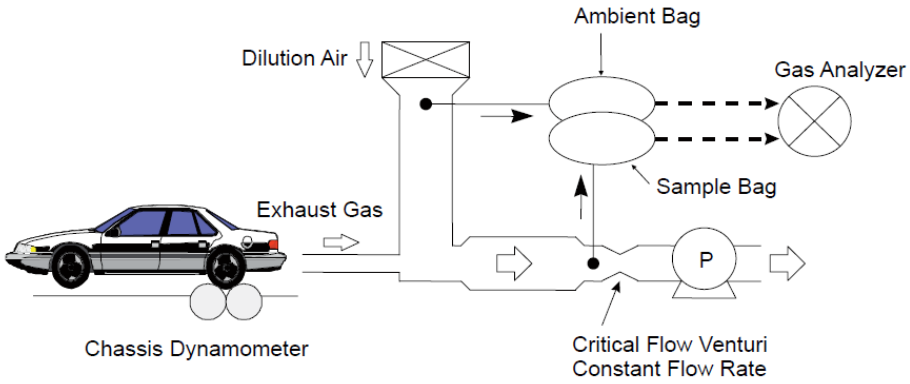


Tomado de: (Seisakujo et al., 2014)

2.3.1.2 Método de muestreo por dilución

El muestreo por dilución mide los gases de escape después de mezclar la muestra con aire, lo que reduce el contenido de vapor de agua. Como resultado, se logra controlar con facilidad los errores de cálculos por la condensación de agua o la pérdida de componentes solubles en agua. Por esta razón, resulta adecuado en condiciones de alta temperatura o humedad. Dentro de este método, el sistema más utilizado es el de muestreo de volumen constante (CVS), empleado como referencia para la certificación de emisiones y la evaluación del consumo de combustible. Su funcionamiento se basa en la dilución de flujo total, en la que los gases de escape se mezclan con aire ambiente manteniendo constante el caudal másico total. Luego se toma una fracción proporcional de la mezcla en una bolsa de muestreo y, al finalizar el ensayo, se determinan las concentraciones de los componentes. A partir de estos datos, la masa de cada gas emitido se determina en función de la concentración registrada, el flujo total y la densidad del gas de medición (Seisakujo et al., 2014). La Figura 11 representa la configuración de un sistema CVS convencional.

Figura 11. *Concepto básico del método CVS Venturi*



Tomado de: (Seisakujo et al., 2014)

2.3.2 Métodos de emisiones en condiciones reales de conducción

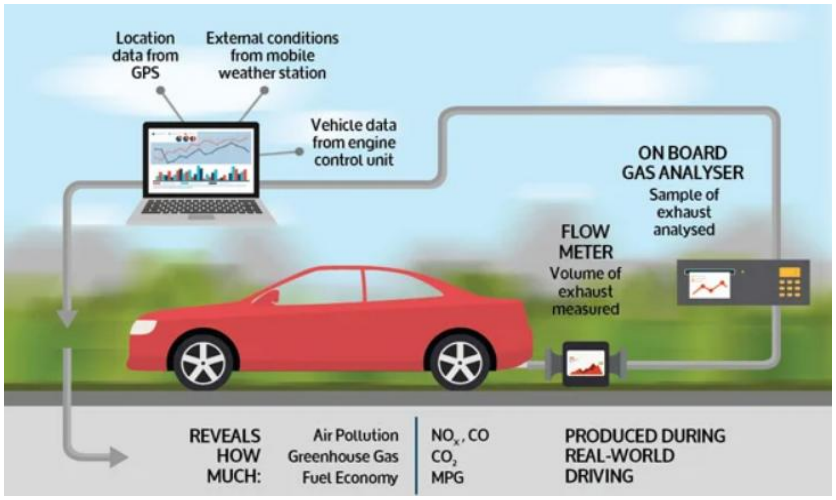
A partir del año 2017, con la implementación del procedimiento WLTP *(Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure)* y del ciclo WLTC en la Unión Europea, surgió la necesidad de complementar los ensayos de laboratorio con pruebas en condiciones reales de conducción (*Real Driving Emissions*, RDE), debido a las diferencias observadas entre las emisiones en condiciones reales de conducción y la homologación. En este ámbito, la normativa

Euro 6d incorporó los ensayos RDE, para los cuales se requiere el uso de un sistema portátil de medición de emisiones.

2.3.2.1 Sistemas portátiles de medición de emisiones (PEMS)

Los sistemas portátiles de medición de emisiones, conocidos como PEMS (*Portable Emissions Measurement System*), conforman una de las alternativas más utilizadas para medir emisiones vehiculares en condiciones reales de circulación. Su funcionamiento consiste en instalar un equipo de medición en el vehículo para registrar y analizar, en tiempo real, los gases de escape durante su desplazamiento en vía o en circuito cerrado. De esta manera, es posible obtener información detallada de las emisiones generadas a lo largo del recorrido (Dallmann, 2021). La Figura 12 muestra un esquema de la instalación de un sistema PEMS en un vehículo.

Figura 12. *Esquema de Instalación PEMS*



Tomado de: (Emissions, 2026)

2.3.2.2 Aplicación en mediciones en conducción real (RDE)

La reglamentación europea para ensayos RDE define condiciones del recorrido, como duración, distancia, rangos de velocidad y límites ambientales, con el fin de incluir tramos urbanos, rurales y de autopista. Esto permite evaluar emisiones en situaciones difíciles de reproducir en un laboratorio, tales como pendientes, aceleraciones bruscas o variaciones de altitud (Aliandro Varella et al., 2018). Para ello, un sistema PEMS incorpora analizadores de contaminantes, un medidor del flujo de escape (EFM), un sistema GPS, sensores auxiliares y una fuente de

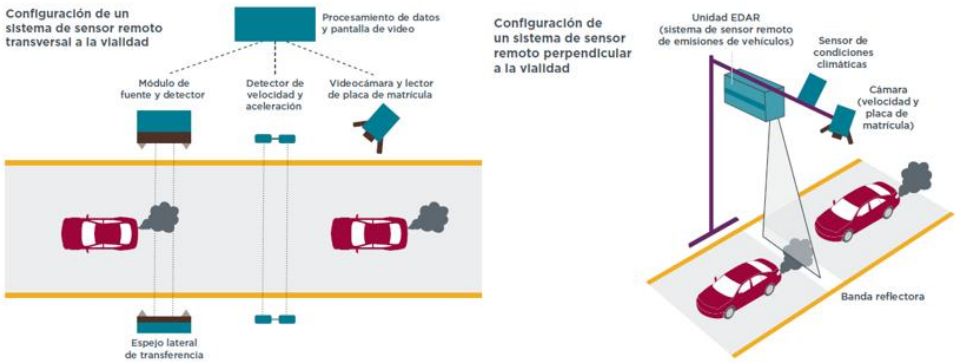
alimentación. Con ellos se miden contaminantes como HC, CO, CO_2, NO_x, PM, así como variables del motor, del vehículo y del entorno (Giechaskiel et al., 2018).

2.3.3 Método de ensayo de Sensor Remoto

El sensor remoto es una tecnología no intrusiva que permite medir las emisiones de los vehículos mientras circulan en condiciones normales de operación. Frente al uso de PEMS, ofrece la ventaja de evaluar un mayor número de vehículos en menor tiempo y a menor costo, por lo que resulta útil para campañas de monitoreo y análisis de flotas. Ambos métodos son complementarios: mientras el PEMS proporciona información detallada de vehículos específicos, el sensor remoto permite obtener mediciones rápidas, del orden de medio segundo, sobre una gran cantidad de unidades (Aliandro Varella et al., 2018).

Su funcionamiento se basa en la espectroscopia de absorción. Para ello, se instala una fuente de luz y un detector a los costados o sobre una vía, de manera que el haz luminoso atraviese la pluma de gases emitida por el vehículo. A partir de la absorción de determinadas longitudes de onda, se estiman las concentraciones relativas de contaminantes como NO, NO_2, CO, HC y CO_2; además, las emisiones de partículas pueden determinarse indirectamente mediante la opacidad de la pluma. Algunos sistemas también permiten registrar compuestos como dióxido de azufre (SO_2) y amoniaco (NH_3) (Aliandro Varella et al., 2018). La Figura 13 presenta la configuración general de este sistema.

Figura 13. *Configuración del sistema de sensor remoto*



Tomado de: (Yang et al., 2025)

Cada medición corresponde a una condición instantánea de circulación, ya que el registro se obtiene en menos de un segundo. Aunque no proporciona el mismo nivel de detalle temporal

que un ensayo con PEMS, la posibilidad de recopilar miles de mediciones en diferentes puntos y condiciones de tránsito permite obtener una visión amplia del comportamiento real de las emisiones vehiculares, convirtiéndolo en una herramienta útil para estudios de flotas y programas de vigilancia ambiental (Dallmann, 2021).

2.4 NORMATIVAS DE CONTROL Y REGULACIÓN DE EMISIONES

La creciente preocupación por el impacto ambiental de los gases que emiten los motores de combustión ha llevado a que se establezcan normas con el objetivo de limitar y controlar estos contaminantes. Estas normativas buscan disminuir los efectos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente (Carreras et al., 2015). A continuación, se presentan las regulaciones más relevantes a nivel internacional y nacional.

2.4.1 Normativas Europeas

Las normativas de emisiones europea son establecidas por la Unión Europea (UE), denominadas como Normas Euro. Estas normas, que comenzaron con Euro 1, se han actualizado de manera periódica para reducir la contaminación del aire. Las normas Euro más actuales, establecen límites más estrictos para las emisiones de NOx, PM, HC, CO y otros contaminantes (Halderman, 2012). Sa evolución sobre emisiones contaminantes para vehículos ligeros de categoría M1, tanto de Ciclo Otto y Diésel se resumen en la Figura 14.

Figura 14. *Normas de emisiones de la UE para turismos (categoría M1)*

Escenario	Fecha	CO	HC	HC+NOx	NOx	P.M	PN†
		g/km					*#/km*
Encendido provocado (gasolina)							
Euro 1‡	1992.07	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	-	-
Euro 2	1996.01	2.2	-	0.5	-	-	-
Euro 3	2000.01	2.30	0,20	-	0,15	-	-
Euro 4	2005.01	1.0	0.10	-	0.08	-	-
Euro 5	2009.09 [b]	1.0	0,10 días	-	0.06	0,005 [e,f]	-
Euro 6	2014.09	1.0	0,10 días	-	0.06	0,005 [e,f]	6,0×10 [11] [e,g]
Euro 7	2026.11.29	1.0	0,10 días	-	0.06	0.0045	6,0×10 [11] [e,g]
Encendido por compresión (diésel)							
Euro 1‡	1992.07	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	0,14 (0,18)	-
Euro 2, IDI	1996.01	1.0	-	0.7	-	0.08	-
Euro 2, DI	1996.01 [a]	1.0	-	0.9	-	0.10	-
Euro 3	2000.01	0.64	-	0,56	0,50	0.05	-
Euro 4	2005.01	0,50	-	0.30	0,25	0.025	-
Euro 5a	2009.09 [b]	0,50	-	0,23	0,18	0,005 [f]	-
Euro 5b	2011.09 [c]	0,50	-	0,23	0,18	0,005 [f]	6.0×10 [11]
Euro 6	2014.09	0,50	-	0,17	0.08	0,005 [f]	6.0×10 [11]
Euro 7	2026.11.29	0,50	-	0,17	0.08	0.0045	6.0×10 [11]

Tomado de: (DieselNet, 2024a)

2.4.2 Normativas Americanas

Anteriormente, las regulaciones americanas sobre emisiones diferenciaban a los vehículos y motores por categorías específicas, aplicando distintos procedimientos de prueba y límites de emisión, sin embargo, esto generó diferencias en los procedimientos de evaluación (Seisakujo et al., 2014). Actualmente, existen autoridades reguladoras encargadas de implementar las regulaciones, estas se dividen en dos grupos: Normas Federales y Normas de California.

Normas Federales: La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) tiene la responsabilidad de fijar las normas federales de emisiones de los motores y vehículos, incluidas las GEI. Su autoridad proviene de la Ley de Aire Limpio (CAA), en cuyas enmiendas se crearon dos grupos de normas para los vehículos ligeros: Tier 1 y Tier 2. Después de una introducción completa de las normas Tier 2, se adoptaron las regulaciones Tier 3 y Tier 4 (DieselNet, 2024b). La evolución de las normas Tier se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. *Evolución de las normas Tier para vehículos ligeros*

Normativa	Publicación/Adopción	Introducción Gradual	Aplicación
Tier 1	5 de junio de 1991	1994 a 1997	LDV menor a 8500 lb GVWR
Tier 2	21 de diciembre de 1999	2004 a 2009	MDPV entre 8500 y 10.000 lb GVWR
Tier 3	3 de marzo de 2014	2017 a 2025	Vehículos pesados con chasis de hasta 14.000 lb (Clase 2b y Clase 3)
Tier 4	20 de marzo de 2024	2027 a 2033	

LDV: Vehículos ligeros nuevos
GVWR: Clasificación de peso bruto vehicular
MDPV: Vehículos de pasajeros de servicio mediano

Tomado de: (DieselNet, 2024b)

Normas de California: El Estado de California tiene la facultad legal de establecer sus propias normas sobre emisiones, que suelen ser más estrictas que las federales. Estas son adoptadas por la Junta de Recursos del Aire de California (CARB), un organismo regulador de la EPA de California. California es el único estado con potestad para desarrollar sus propias regulaciones de emisiones. Mientras que otros estados pueden optar por implementar las normas federales de emisiones o las de California (DieselNet, 2024b).

2.4.3 Normativas Ecuatorianas

En Ecuador, el control de emisiones está regulado por el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), adoptando estándares internacionales como la norma Euro 3. Entre las regulaciones clave se encuentran la NTE INEN 2204, la cual establece los límites de concentración de emisiones para vehículos a gasolina medidos mediante pruebas estáticas o aplicando ciclos de conducción (INEN, 2017). La NTE INEN 2207 establece los límites de emisiones para vehículos diésel medidos mediante ciclos de conducción, además, incluye los límites máximos de opacidad mediante pruebas de aceleración libre (INEN, 2002).

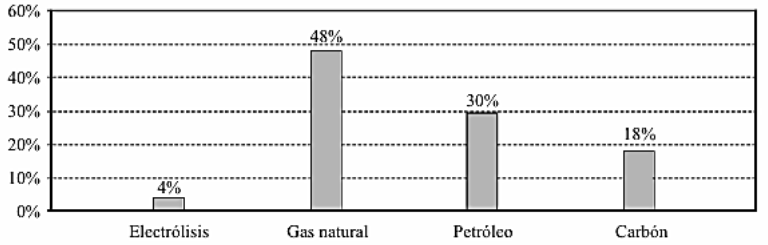
2.5 EFECTO DE LA ADICIÓN DE HIDRÓGENO EN MEP

El hidrógeno (H_2) ha ido ganando relevancia como una alternativa en el panorama energético mundial, caracterizándose por sus propiedades fisicoquímicas y por su potencial de contribuir a la transición hacia modelos energéticos más sostenibles. En condiciones normales, el H_2 posee características inodoras, incoloras, no metálicas y altamente inflamables. Aunque su presencia elemental en la Tierra es limitada, pero puede producirse industrialmente (Genia Bioenergy, 2025; Espinoza, 2020). Este elemento ha ganado protagonismo en distintos sectores como "el combustible del futuro"; sin embargo, esta consideración debe matizarse bajo el concepto de "vector energético" en lugar de "fuente primaria energética", lo que implica la comprensión de sus características, métodos de producción y aplicaciones (Gutiérrez, 2005).

2.5.1 Vector energético vs Fuente Primaria

El H_2 no es una fuente primaria de energía, sino un vector energético, lo que implica que su disponibilidad depende de la conversión de otras fuentes. En la actualidad, aproximadamente el 96 % del H_2 se produce a partir de combustibles fósiles mediante procesos termoquímicos, principalmente el reformado de gas natural. Sin embargo, solo una pequeña fracción, cercana al 4 %, se obtiene por electrólisis del agua. Esta descripción se representa en la Figura 15.

Figura 15. *Origen del hidrógeno producido en la actualidad*



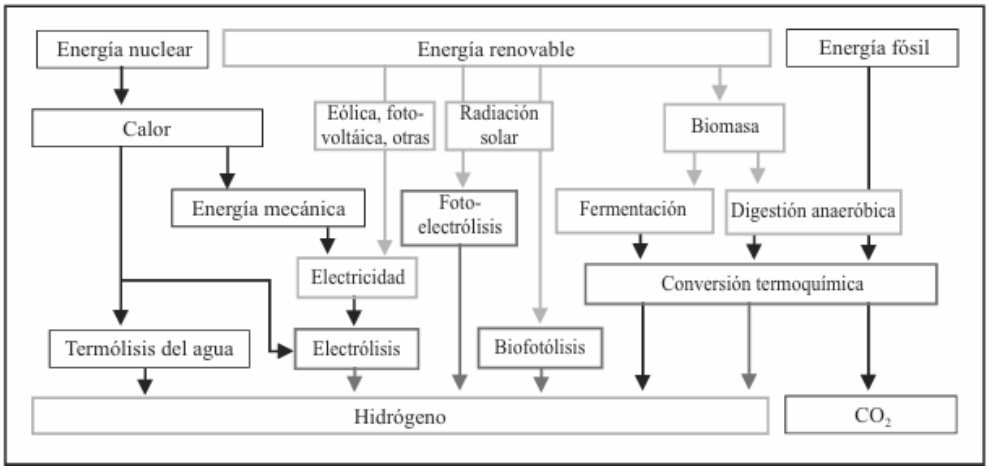
Tomado de: (L. Sastresa & Zabalza, 2011)

Como vector energético, el hidrógeno transporta y almacena la energía generada en su producción hasta los puntos de consumo. La cantidad y calidad de esa energía dependen de la fuente primaria y de la eficiencia del proceso utilizado. A pesar de su potencial, la aplicación del hidrógeno enfrenta limitaciones como los altos costos de producción, la complejidad del almacenamiento y la seguridad en su manejo, aspectos que condicionan su expansión en el panorama energético actual (Sastresa & Zabalza, 2011).

2.5.2 Métodos de producción del Hidrógeno

El hidrógeno, por su propia naturaleza, no se encuentra libre en grandes cantidades en la Tierra, por lo que debe ser extraído de compuestos que lo contienen. Para ello, se recurre a distintos procesos que permiten separarlo a partir de materias primas como hidrocarburos, agua o biomasa. Estos métodos varían en su principio de funcionamiento, complejidad técnica, requerimientos energéticos y nivel de impacto ambiental (Figura 16).

Figura 16. *Métodos de producción H_2*



Tomado de: (L. Sastresa & Zabalza, 2011)

La clasificación presentada demuestra que la producción de hidrógeno puede realizarse mediante rutas termoquímicas, electroquímicas, fotoquímicas y biológicas, las cuales difieren en su nivel de desarrollo tecnológico, requerimientos energéticos e impacto ambiental. En la actualidad, la mayor parte del hidrógeno se obtiene a través de procesos termoquímicos, principalmente mediante el reformado de gas natural, mientras que alternativas como la electrólisis, la termólisis del agua, la fotoelectrólisis y la biofotólisis representan opciones complementarias con potencial de ser incluidas a fuentes de energía renovable. A continuación, se describen los principales métodos empleados para su producción (Sastresa & Zabalza, 2011).

2.5.2.1 Por reformado de hidrocarburos

El reformado con vapor de hidrocarburos es el método de producción de hidrógeno más utilizado a nivel mundial. Consiste en la reacción del gas natural, principalmente metano, con vapor de agua a alta temperatura (~900 °C) y presión, empleando catalizadores como el níquel. La reacción principal se presenta en la Ec. (7) y genera monóxido de carbono e hidrógeno:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \qquad \textbf{Ec. (7)}$$

Posteriormente, el CO reacciona con vapor de agua para producir dióxido de carbono e hidrógeno adicional, como se muestra en la Ec. (8).

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \qquad \textbf{Ec. (8)}$$

Este proceso puede complementarse con oxidación parcial o reformado autotérmico para incrementar su eficiencia. Actualmente es la base para la producción del hidrógeno gris, aunque genera emisiones significativas de CO_2 (Ariema, s/f; Atlas Copco, 2025).

2.5.2.2 Gasificación del carbón

La gasificación del carbón es un proceso termoquímico que transforma carbón sólido en un gas de síntesis (syngas) compuesto principalmente por CO e H_2 mediante oxidación parcial a altas temperaturas (~700 °C). Tras su purificación, el hidrógeno puede separarse del resto de componentes. Aunque es una tecnología ampliamente desarrollada, presenta elevadas emisiones de CO_2 (Ariema, 2024;PST, 2025).

2.5.2.3 Por termólisis

La termólisis consiste en la descomposición térmica del agua para obtener hidrógeno y oxígeno. El proceso requiere temperaturas extremadamente elevadas alrededor de 3000 °K, por lo que actualmente se investigan ciclos químicos capaces de reducirlas a alrededor de 1000 °K, facilitando su viabilidad. Actualmente se trata de una alternativa aún en fase experimental (Ariema, 2024).

2.5.2.4 Producción bioquímica

La biofotólisis emplea microorganismos fotosintéticos, como algas y cianobacterias, para descomponer moléculas de agua mediante energía solar y liberar hidrógeno como subproducto metabólico. Aunque representa una opción sostenible, todavía requiere avances para su aplicación a gran escala (Ariema, 2024).

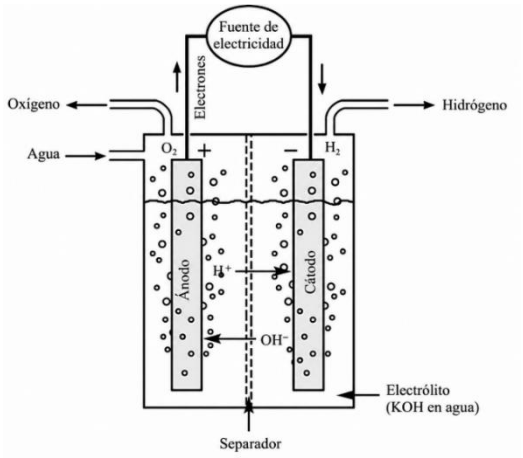
2.5.2.5 Fotocatálisis y fotoelectrólisis

La fotocatálisis es un proceso que utiliza materiales semiconductores, denominados fotocatalizadores, capaces de aprovechar la radiación solar para promover la separación de la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno. Por su parte, la fotoelectrólisis combina este principio con la electrólisis convencional mediante electrodos semiconductores fotosensibles que generan la energía necesaria para llevar a cabo la reacción (Ariema, 2024).

2.5.2.6 Electrólisis y celda electrolítica

La electrólisis es un proceso electroquímico que utiliza energía eléctrica para separar el agua en hidrógeno y oxígeno. Este proceso se lleva a cabo en equipos denominados electrolizadores, como el mostrado en la Figura 17, constituidos por un conjunto de celdas o stack, cada una compuesta por un ánodo, un cátodo y una solución electrolítica, generalmente hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH) en sistemas alcalinos, que facilita el transporte de iones entre ambos electrodos. Como resultado, el hidrógeno se libera en el cátodo y el oxígeno en el ánodo (L. Sastresa & Zabalza, 2011).

Figura 17. *Esquema de una celda electrolítica*



Tomado de: (L. Sastresa & Zabalza, 2011)

De acuerdo con la configuración del electrolizador, la producción de hidrógeno mediante electrólisis puede realizarse mediante celdas húmedas (wet cell) o celdas secas (dry cell). En las celdas húmedas, los electrodos permanecen completamente sumergidos en el electrolito, permitiendo el intercambio continuo de iones y una operación estable; sin embargo, requieren mayores volúmenes de solución y pueden incrementar las pérdidas térmicas del sistema. Las celdas secas, en cambio, utilizan menos electrolito, por lo general con soluciones alcalinas de KOH o NaOH, que circulan sólo entre placas conductoras separadas con juntas aislantes, concentrando la reacción en zonas específicas del sistema. Esta disposición permite disminuir el volumen de solución empleada, favorecer diseños más compactos y mejorar el aprovechamiento del área activa, pero requiere un control más riguroso de variables operativas tales como la separación entre placas y la distribución del electrolito (Zeng & Zhang, 2010).

2.5.3 Propiedades y Ventajas del Hidrógeno

El hidrógeno gracias a sus propiedades fisicoquímicas se perfila como una alternativa prometedora para el sector de la movilidad sostenible, esto se debe a los beneficios que ofrece frente a otros combustibles convencionales. A continuación, se presentan las propiedades y ventajas más relevantes de este gas:

2.5.3.1 Densidad Energética y Eficiencia

El hidrógeno se distingue por poseer una de las mayores densidades energéticas por unidad de masa frente a otros combustibles. Según los valores referenciales de la Figura 18, su poder

calorífico superior (PCS) alcanza aproximadamente 141.86 MJ/kg, mientras que su poder calorífico inferior (PCI) es de 119.93 MJ/kg, ambos valores en condiciones estándar de presión y temperatura. Esta diferencia entre PCS y PCI se explica por el calor de vaporización asociado al agua generada durante la combustión o la reacción electroquímica, ya que parte de la energía se emplea en la transformación del agua en vapor.

Figura 18. *Valores de poder calorífico de diversos combustibles medidos a 25 °C y 1 atm*

Combustible	*PCS*	*PCI*
Hidrógeno	141,86 MJ/kg	119,93 MJ/kg
Metano	55,53 MJ/kg	50,02 MJ/kg
Propano	50,36 MJ/kg	45,6 MJ/kg
Gasolina	47,5 MJ/kg	44,5 MJ/kg
Diesel	44,8 MJ/kg	42,5 MJ/kg
Metanol	19,96 MJ/kg	18,05 MJ/kg

Tomado de: (Sastresa & Zabalza, 2011)

El hidrógeno, gracias a su alta densidad energética específica, tiene una gran capacidad de liberación energética en función de su masa, lo cual hace que sea considerado como un vector energético de alto rendimiento. Sin embargo, la posibilidad de utilizarlo directamente está limitada por su bajo contenido energético por unidad de volumen y por las exigencias técnicas de su almacenamiento y manipulación.

2.5.3.2 Beneficios Medioambientales

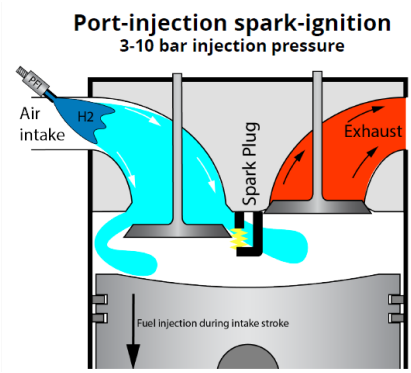
Al incorporarse en la admisión de un MEP, el H_2 modifica el proceso de combustión debido a sus propiedades químicas (Figura 19). A diferencia de la gasolina, el hidrógeno no contiene carbono, por lo que al oxidarse genera únicamente vapor de agua (H_2O). Esto reduce la cantidad de carbono en la mezcla, lo que a su vez disminuye la formación de CO_2 y CO, especialmente cuando se trabaja con mezclas pobres. Sin embargo, aunque la adición de hidrógeno mejora la eficiencia térmica y promueve una combustión más completa, también puede aumentar la producción de NO_x debido a las temperaturas más elevadas en la cámara de combustión (Varela, 2016).

Este cambio en la composición de la mezcla se representa mediante la Ec. (9) en función del proceso de combustión real:

$$A\ C_xH_\gamma + B\ O_2 + C\ N_2 + D\ H_2$$
$$\rightarrow E\ CO^2 + F\ H_2O + G\ HC + H\ CO + NO_x + Calor + Subproductos \quad \textbf{Ec. (9)}$$

En esta ecuación, la letra A representa el coeficiente estequiométrico del hidrocarburo base, como la gasolina; B y C corresponden a las cantidades de oxígeno y nitrógeno presentes en el aire de admisión, respectivamente; mientras que D indica la cantidad de hidrógeno añadida a la mezcla. Por otro lado, las letras E, F, G y H representan las emisiones de CO_2, H_2O, HC y CO, en ese orden. Finalmente, H se refiere a la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x).

Figura 19. *Adición de Hidrógeno en la admisión de un MEP*



Tomado de: (U.S. Department of Energy, 2023)

2.6 ENFOQUE DE MAPA DE MOTOR

Los mapas de motor son representaciones gráficas que permiten determinar el desempeño del motor bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Los parámetros representados en el mapa permiten caracterizar el estado operativo del motor y las condiciones en las que ocurre la combustión, a partir de variables medibles de manera experimental. Dichos parámetros delimitan zonas específicas que son clave para evaluar tanto el rendimiento como las emisiones del motor en cada punto de operación (Payri & Desantes, 2011).

2.6.1 Fundamentos y representación de mapas de motor

El mapa de motor nos permite visualizar como varían parámetros como el BSFC, emisiones de gases, o cualquiera sea el factor de estudio, en función del régimen de giro y el par motor (Shourehdeli et al., 2025). Su elaboración se basa en procedimientos experimentales a partir de tres variables principales. En los ejes vertical y horizontal, se utilizan como variables principales

el par motor y la velocidad respectivamente. Mientras que, la tercera variable ubicada en el eje horizontal corresponde al factor de estudio que define el objeto de análisis del mapa (Rosero et al., 2024).

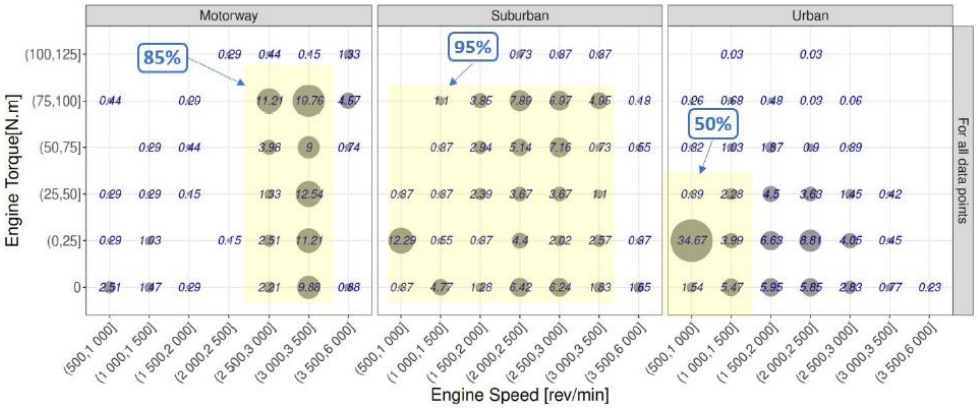
De igual manera, los mapas de motor pueden ser generados bajo condiciones de estado estacionario o en situaciones reales de conducción. En el primer caso, las variables del consumo de combustible y emisiones se crean a partir de valores medidos bajo condiciones estables en cada punto de par-velocidad. Sin embargo, en la conducción real pueden presentarse variaciones en esos mismos puntos. No obstante, debe seleccionarse un único valor representativo por cada punto, con el fin de construir una base clara para el análisis (Bishop et al., 2016).

De manera habitual, los mapas de motor son modelados de dos formas principales: los mapas de cuadrícula y los de contorno bidimensional. Para su desarrollo, se siguen dos etapas principales: en primer lugar, se generan los mapas de motor de cuadrícula por rangos de velocidad y par del motor; y de manera paralela, se elaboran mapas de motor de contorno bidimensionales, derivados de los datos agrupados previamente en la fase de cuadrícula (Rosero et al., 2024).

2.6.1.1 Mapas de motor de cuadrícula

Como primera etapa, los mapas de cuadrícula permiten organizar y visualizar datos en una estructura organizada por rangos de par motor y régimen de giro (Figura 20). Cada celda de la cuadrícula representa un área o punto de datos específico resultante de la combinación de estos dos parámetros, a la cual se le asigna un valor promedio de la variable de estudio. Esta organización facilita una primera aproximación al análisis del comportamiento del motor (Rosero et al., 2024).

Figura 20. *Mapa de cuadrícula del funcionamiento de un motor por tipo de tramo*

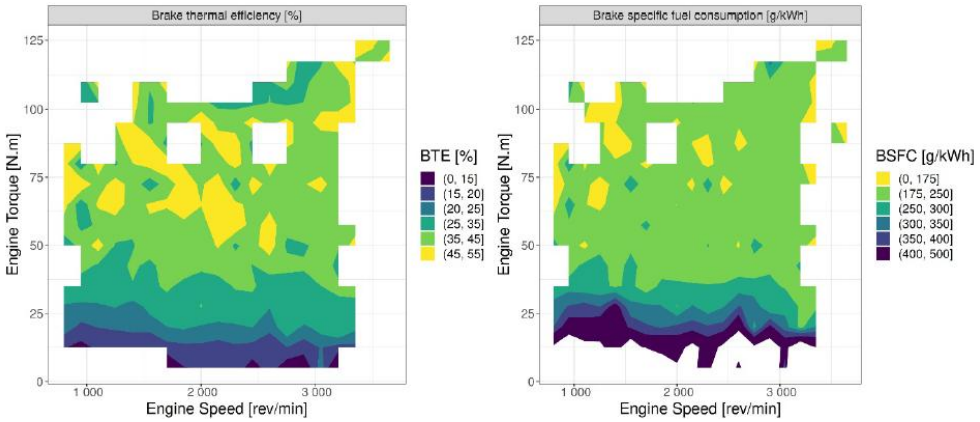


Tomado de: *(Rosero et al., 2024)*

2.6.1.2 Mapas bidimensionales de contorno del motor

Como complemento al mapa de cuadrícula, los mapas bidimensionales de contorno permiten representar las características del rendimiento de un motor, mediante curvas de nivel en un plano 2D (Figura 21). Estas curvas conectan puntos con valores equivalentes de la tercera variable, en función del par motor y el régimen de giro. En base a este proceso, las matrices de datos resultantes del mapa de cuadrícula sirven como datos de entrada para trazar las superficies de contorno. Por último, se aplica una escala cromática divergente para diferenciar los intervalos de la variable analizada dentro del área de operación del motor (Rosero et al., 2024).

Figura 21. *Mapa bidimensional de contorno de BTE y BSFC*

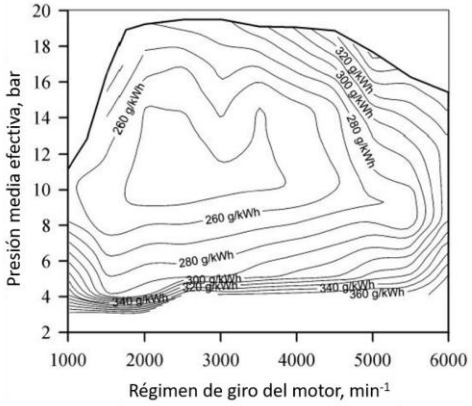


Tomado de: *(Rosero et al., 2024)*

2.6.2 Mapas de motor de consumo de combustible

Este tipo de mapa permite evaluar el consumo de combustible en todo su rango operativo, su representación se encuentra en la Figura 22. Esto incluye etapas desde el ralentí hasta el estado de plena carga, pasando por el par mínimo y la velocidad máxima (Dekraker et al., 2018). La construcción de este mapa comienza con la definición del rango de operación del motor, para ello, se trazan curvas basadas en las variables que establecen los límites básicos de funcionamiento. Finalmente, para generar el mapa se establece una cuadrícula estructurada por intervalos de carga y velocidad, sobre la cual se proyectan los datos del consumo de combustible (López et al., 2022).

Figura 22. *Curva de isoconsumo de motor sobrealimentado*

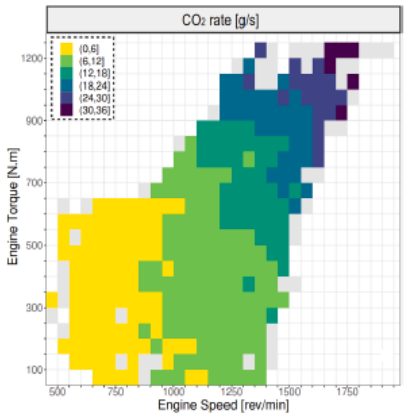


Tomado de: (Payri & Desantes, 2011)

2.6.3 Mapas de motor de emisiones

En los mapas de emisiones se emplean simulaciones basadas en datos reales para calcular factores de emisión como HC, CO, NOx y CO_2 (Seo et al., 2021). La representación de los niveles de emisiones se realiza mediante una técnica basada en colores como se muestra en la Figura 23. Esta consiste en aplicar un gradiente de color ya sea por tono o intensidad que varía proporcionalmente al valor de cada parámetro, facilitando la identificación de las zonas que presentan mayores o menores emisiones (Cuzco & Espinosa, 2023).

Figura 23. *Curva de la taza de CO2 de motor Diesel*



Tomado de: (Rosero et al., 2023)

2.7 PROGRAMAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Los programas de procesamiento de datos son una amplia categoría de herramientas empleadas para organizar, gestionar, analizar y transformar datos. Este tipo de herramientas nos permiten obtener información significativa proveniente de grandes volúmenes de datos. Bajo este enfoque, se pueden clasificar en dos grupos: programas de acceso libre y programas de acceso comercial con licencias.

2.7.1 Programas Estadísticos de Acceso Libre

Estos paquetes de software, también conocidos como programas estadísticos de código abierto (Open Source), se caracterizan por su popularidad y amplio uso por permitir un acceso sin restricciones de licencia, además, ofrecen a los usuarios herramientas para realizar análisis estadísticos, manipular datos, generar visualizaciones y desarrollar modelos predictivos de manera confiable (UCLM, 2024). Entre los más utilizados se encuentran:

R: R es un lenguaje de programación y un entorno para análisis estadístico y representación de gráficos. Es utilizado ampliamente en diversas áreas como análisis de datos, investigación científica, ingeniería y más, ofreciendo un amplio repertorio de técnicas estadísticas como modelado lineal y no lineal, análisis de series temporales, pruebas estadísticas convencionales, métodos de clasificación y agrupamiento (R Project, 2024).

Python: Es el lenguaje de programación de código abierto con mayor popularidad a nivel mundial, se caracteriza por su versatilidad y programación de alto nivel, destacado por su facilidad de aprendizaje. Python es un lenguaje ideal para modelar, visualizar, automatizar y procesar datos mediante el uso de sus bibliotecas integradas, volviéndolo ideal para la creación de sitios web, la automatización de tareas, el análisis de datos, entre otros (Python, 2025).

JASP: Es un programa estadístico, desarrollado con el respaldo de la Universidad de Ámsterdam. Se caracteriza por ser intuitivo y flexible. JASP ofrece una variedad de análisis estadísticos, tanto descriptivos, inferenciales y correlacionales, además, integra análisis clásicos y bayesianos, se basa en R, pero ofrece una interfaz más accesible y amigable para usuarios sin experiencia de programación (JASP, 2018).

2.7.2 Programas Estadísticos de Acceso Comercial

Este tipo de programas son diseñados para facilitar el análisis de grandes volúmenes de datos especialmente para campos empresariales. Sin embargo, se necesita de una licencia de paga para poder usarlos, entre los más conocidos tenemos:

Excel: Es un programa que requiere una licencia comercial para su uso, aunque se puede utilizar de manera libre en su versión web o mediante su prueba gratuita por tiempo limitado. Excel es una plataforma eficaz para obtener información a partir de grandes cantidades de datos. Permite realizar cálculos sencillos mediante fórmulas, construir bases de datos, generar gráficos estadísticos y desarrollar automatizaciones (Microsoft, 2025).

MATLAB: Es una aplicación comercial que permite realizar estadística descriptiva, análisis exploratorio, distribuciones de probabilidad y machine learning, con un entorno interactivo y personalizable (Mathworks, 2025).

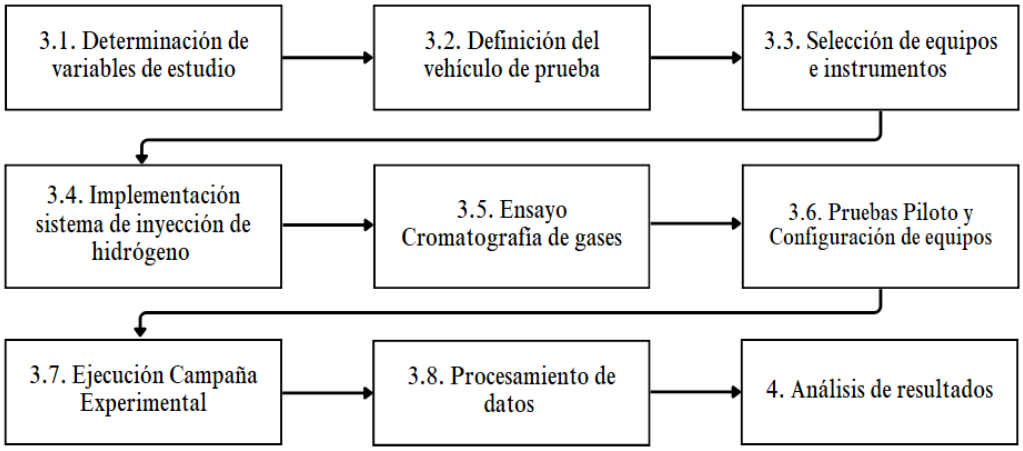
IBM SPSS Statistics: Es un software que permite realizar análisis estadísticos avanzados como estadística descriptiva hasta modelado predictivo y análisis multivariado, de igual manera, SPSS también se integra con lenguajes como R y Python, lo que amplía sus capacidades analíticas y de automatización (IBM, 2025).

STATGRAPHICS Centurion: Es un programa de análisis de datos que integra una amplia gama de procedimientos analíticos con gráficos interactivos de alta calidad, con el fin de ofrecer un entorno de análisis unificado que puede ser utilizado en cada una de las fases de un proyecto, desde los protocolos de gestión Six Sigma hasta los procesos de control de calidad (Statgraphics, 2025).

CAPÍTULO III
MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta la metodología de investigación empleada, describiendo de manera ordenada cada una de las etapas desarrolladas. Se incluyen las consideraciones tomadas durante la campaña experimental en pruebas reales de conducción, así como el análisis y procesamiento de los datos recopilados. La Figura 24 presentada a continuación resume el procedimiento general seguido durante el estudio, desde la integración del sistema de hidrógeno hasta el análisis comparativo de los resultados.

Figura 24. *Diagrama de la metodología aplicada en el estudio*



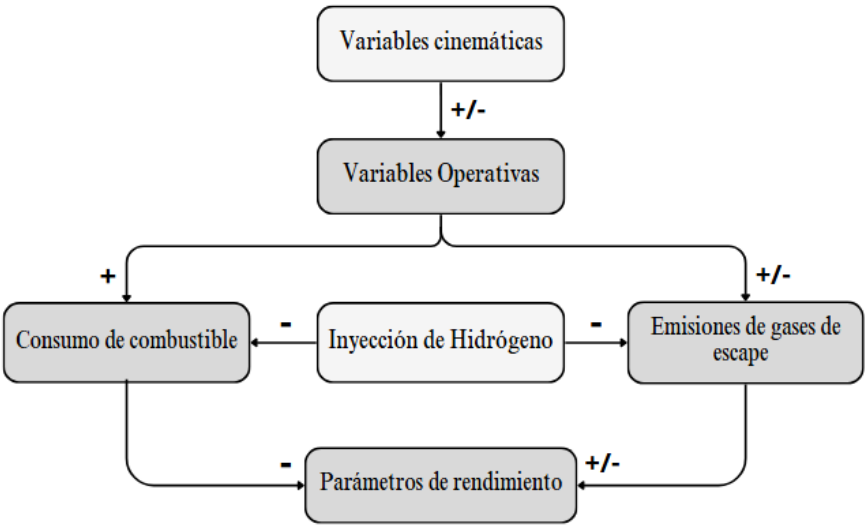
3.1 Determinación de variables de estudio

En el presente trabajo se evalúa el efecto de la inyección de hidrógeno sobre el consumo de combustible y las emisiones de escape bajo condiciones estandarizadas de ensayo en la cual, se hicieron pruebas de conducción real, lo que permitió comparar el desempeño del motor antes y después de la incorporación de hidrógeno.

La Figura 25 se muestra el diagrama causal propuesto para el estudio, donde se puede observar la relación entre las principales variables analizadas, en este modelo las variables cinemáticas se toman como exógenas, ya que definen la demanda de operación del vehículo en el ensayo. Del mismo modo, la inyección de hidrógeno se clasifica como variable exógena por constituir el factor experimental introducido para evaluar su influencia sobre el comportamiento del motor, por el contrario las variables operativas, el consumo de combustible, las emisiones de

gases de escape y los parámetros de rendimiento se consideran endógenos, puesto que dependen de las condiciones de operación y de la interacción con la adición de hidrógeno.

Figura 25. *Diagrama causal de las variables de estudio*



Los signos de causalidad se utilizan para representar las conexiones entre variables, donde el signo (+) denota una relación directa, en la cual el cambio de una variable genera un incremento proporcional en otra, por otro lado, el signo (-) representa una relación inversa, donde una variable disminuye al aumentar la otra. Finalmente, el símbolo (+/-) se emplea cuando la relación puede cambiar dependiendo de las condiciones de operación. Este tipo de representación permite interpretar cómo podría influir la inyección de hidrógeno en el desempeño del motor y sus emisiones.

En este sentido, las variables cinemáticas influyen sobre las variables operativas con una relación mixta (+/-), puesto que los cambios de velocidad y aceleración modifican la carga y el régimen del motor. Las variables operativas, a su vez, presentan una relación directa con el consumo de combustible (+) y una relación mixta con las emisiones, ya que su efecto depende del punto de operación, por otra parte, se asume que la inyección de hidrógeno presenta una relación mixta (+ / -) con el consumo de combustible y las emisiones de gases respectivamente, ya que su efecto para favorecer la combustión y reducir la demanda de combustible se comprobará posteriormente, y se considera que puede variar en función de las diferentes condiciones de operación.

Por lo que respecta a las emisiones de escape y los parámetros de rendimiento la relación se considera mixta (+/-), ya que depende del contaminante evaluado y de las condiciones específicas de funcionamiento. Por último, el consumo de combustible influye de forma inversa sobre los parámetros de rendimiento (-), ya que un consumo mayor refleja un desempeño global menos favorable. En los apartados siguientes se hace una descripción detallada de cada conjunto de variables.

3.1.1 Variables Cinemáticas

Este grupo corresponde a las magnitudes físicas utilizadas para describir el movimiento del vehículo, sin considerar de manera directa las causas que lo originan. Estas variables se expresan principalmente en términos de velocidad, tiempo y aceleración. A su vez, permiten definir el perfil de conducción en cada escenario de prueba, lo cual resulta fundamental para evaluar los efectos de la inyección de hidrógeno de manera objetiva. Las principales variables consideradas y sus respectivas unidades de medida se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. *Variables de simulación en pruebas de conducción*

Variable	Unidad	Tipo	
		Calculado	Medido
Velocidad	km/h		✓
Tiempo	s		✓
Distancia total	m		✓
Aceleración	m/s^2	✓	

3.1.2 Modos de Operación

Los modos de operación permiten clasificar el comportamiento del vehículo durante el recorrido de estudio y facilitan el análisis de su respuesta en diferentes condiciones de circulación. Para el desarrollo de la investigación se establecieron dos criterios de clasificación, el primero se relaciona con el entorno de circulación y divide la ruta en los tramos urbano, suburbano y autopista, mientras que el segundo considera el comportamiento dinámico del vehículo durante el desplazamiento, diferenciando las condiciones de ralentí, aceleración positiva, desaceleración y crucero.

La ruta seleccionada se organizó en tres tramos representativos de condiciones reales de conducción. Cada uno presenta características propias y, en consecuencia, genera escenarios

distintos para el funcionamiento del motor, esta división facilita la relación entre las condiciones de circulación y las variaciones registradas en el consumo de combustible y las emisiones de gases, evitando que los resultados se interpreten como si todo el recorrido hubiera ocurrido bajo un único régimen de operación. Los modos de operación definidos según el tramo de la ruta se presentan en la Tabla 4 (Suárez Peñafiel, 2025).

Tabla 4. *Tramos de la ruta de estudio*

Modo de operación	Descripción
Ciclo urbano	Simula la conducción en ciudad, con velocidades que no superan los 60 km/h, frecuentes detenciones y arranques.
Ciclo rural	Simula la conducción en zona rural, con velocidades comprendidas entre 60 y 90 km/h.
Ciclo autopista	Simula la conducción en carretera, con tramos prolongados a velocidades superiores a 90 km/h e intervalos en los que se puede superar los 100 km/h durante al menos 5 segundos.

De manera complementaria, el comportamiento del vehículo también se clasificó según su estado de operación instantáneo. Esta segunda clasificación se estableció a partir de variables cinemáticas de velocidad, aceleración y el tiempo de operación, lo que permitió caracterizar la dinámica vehicular en cada momento del recorrido. Los estados considerados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. *Modos de operación según el estado del vehículo*

Modo de Operación	Descripción	Tipo	
		Calculado	Medido
Ralentí	Velocidad nula; motor a régimen mínimo de funcionamiento.	✓	
Aceleración Positiva	Aceleración $> 0.1\ m/s^2$	✓	
Desaceleración	Aceleración $< 0\ m/s^2$	✓	
Crucero	Velocidad $> 0\ m/s$ y aceleración relativa mínima entre -0.1 a $0.1\ m/s^2$	✓	

3.1.3 Variables Operativas

Estas variables se obtienen directamente de los registros generados por los dispositivos de adquisición de datos durante el ensayo. Su análisis es fundamental para evaluar el comportamiento del motor tanto en condiciones normales de operación como en presencia de la adición de

hidrógeno. La información registrada permite tener una visión detallada del funcionamiento del motor en tiempo real. Las variables consideradas en este grupo se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. *Variables operativas del vehículo*

Variable	Unidad	Tipo	
		Calculado	Estimado
Régimen de giro del motor	RPM		✓
Carga del motor	%		✓
Par efectivo	Nm	✓	
Potencia efectiva	kW	✓	
Potencia térmica	kW	✓	
Flujo de combustible	g/s	✓	

3.1.4 Parámetros de Rendimiento

Los parámetros de rendimiento presentados en la Tabla 7 se calculan a partir de las variables operativas. Estas variables sirven de base para la comparación técnica del desempeño del motor o vehículo y del efecto de la incorporación de hidrógeno en el sistema de admisión. Su análisis se puede plantear a nivel vehicular en función de la distancia recorrida (km) o a nivel de motor en función de la energía generada (kWh). De este modo, la relación entre consumo de combustible, emisión de gases contaminantes y eficiencia energética permite valorar los beneficios o posibles limitaciones de este tipo de implementación.

Tabla 7. *Parámetros de rendimiento del vehículo*

Nivel	Variable	Unidad	Tipo	
			Calculado	Estimado
Motor	Eficiencia térmica al freno (BTE)	%	✓	
	Consumo específico al freno (BSFC)	g/kWh	✓	
	Tasa de consumo de combustible	g/s	✓	
	Factores de emisión en función de energía	g/kWh	✓	
Vehículo	Tasas de emisiones	g/s	✓	
	Factor de consumo de combustible en función de distancia	g/km	✓	
	Factor de emisión en función de distancia	g/km	✓	

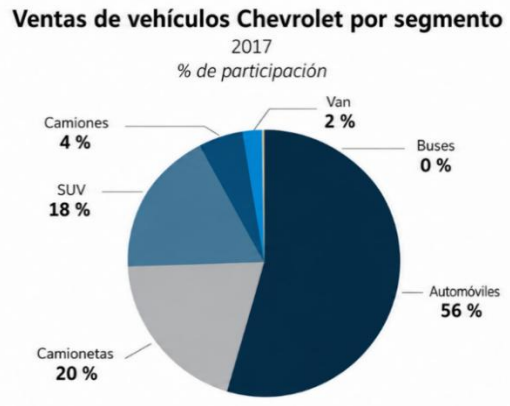
3.2 Definición del vehículo de prueba

La selección del vehículo se realizó a partir del análisis de los registros de comercialización del mercado ecuatoriano y de las características técnicas propias del segmento de vehículos livianos. Para ello, se consideró su nivel de aceptación en el mercado y la relación costo-beneficio, con el fin de definir una unidad experimental representativa para el desarrollo del estudio.

3.2.1 Criterio de Selección

De acuerdo con la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), en 2017 Chevrolet comercializó 41 101 vehículos a nivel nacional, de los cuales el 56 % correspondió al segmento de automóviles. Dentro de este grupo, el modelo Aveo Family 1.5L STD registró 6 629 unidades vendidas, lo que lo ubicó como el vehículo de mayor comercialización de la marca durante ese año (Figura 26). A partir de estos antecedentes, se seleccionó como unidad experimental el Chevrolet Aveo Family 2017, debido a su representatividad dentro del parque automotor ecuatoriano. Además, sus características mecánicas permiten incorporar un sistema de adición de hidrógeno, lo que lo hace adecuado para evaluar su incidencia sobre el consumo de combustible y las emisiones en condiciones de operación propias del entorno nacional (AEADE, 2017).

Figura 26. *Estadísticas de ventas de vehículos anuales AEADE*



Principales modelos Chevrolet vendidos
En unidades, 2016-2017

Modelo	2016	2017
AVEO FAMILY 1.5L STD	4.050	6.629
NUEVO SAIL	-	6.060
D-MAX CRDI STD 3.0 CD 4X2 TM DIESEL	2.239	3.090
SPARK GT 5P A/C 1.2L TM FULL	562	2.737
AVEO EMOTION 1.6L 4P GLS	4.262	2.637

Tomado de: (AEADE, 2017)

3.2.2 Vehículo Seleccionado

El vehículo empleado en este estudio fue un sedán compacto, correspondiente al modelo Chevrolet Aveo Family 2017 (Figura 27), equipado con un motor a gasolina de 1.5 L y un sistema de inyección indirecta multipunto. Posee con una transmisión manual de cinco velocidades y

tracción delantera, además, cumplía con la normativa de homologación vigente en el país, correspondiente al estándar Euro 3.

Figura 27. *Vehículo Aveo Family empleado en la campaña experimental*



Las especificaciones técnicas del vehículo se presentan en la Tabla 8. Cabe destacar que el automóvil fue sometido a un programa de mantenimiento preventivo y correctivo, garantizando su correcto funcionamiento durante los ensayos y la validez de los resultados obtenidos en esta investigación.

Tabla 8. *Especificaciones técnicas del vehículo Chevrolet Aveo Family*

DATOS GENERALES DEL VEHÍCULO	
Marca	Chevrolet
Modelo	Aveo Family
Año	2017
País de Origen	Ecuador
Tipo de carrocería	Sedán
Categoría	M1
MOTOR	
Posición del motor	Delantera Horizontal (SOHC)
No. Cilindros y disposición	4 en línea
Cilindrada (L)	1.5
Válvulas	8
Sistema de alimentación	Inyección Electrónica Multipunto
Tipo de aspiración	Atmosférico
Relación de Compresión	9,5:1
Combustible	Gasolina
Potencia (HP @ RPM)	83 HP @ 5600 RPM
Torque (Nm @ RPM)	128 Nm @ 3000 RPM

TRANSMISIÓN	
No. Velocidades	5 velocidades y reversa (Manual)
Lago/Ancho/Alto (m)	4,235 / 1,67 / 1,495
Distancia entre Ejes (m)	2,48
CAPACIDADES Y PESOS	
Peso Bruto Vehicular (kg)	1395
Capacidad de carga (kg)	325
Capacidad de tanque de combustible (lt/gal)	45/11,9

Tomado de:(Chevrolet, 2017b)

3.3 Selección de equipos e instrumentos

Para el desarrollo de los ensayos de la campaña experimental, fue necesaria la implementación de equipos que garantizaran el registro de las variables cinemáticas y de los parámetros de operación del vehículo, en función de los objetivos planteados en la investigación. Además, se requirió instrumentación capaz de medir las variables asociadas a la alimentación, el funcionamiento y la composición del gas hidrógeno generado mediante electrólisis, de igual manera se requirió de dispositivos para analizar el comportamiento térmico del catalizador en las condiciones con hidrógeno y sin hidrógeno.

Con base en estos requerimientos, se seleccionó como equipo principal de estudio un electrolizador de hidrógeno de celda húmeda, debido a que constituye el elemento central de la campaña experimental para analizar su influencia en el consumo de combustible y en las emisiones de gases de escape del vehículo. Posteriormente, se empleó un cromatógrafo de gases PerkinElmer Clarus 500, destinado al análisis de la concentración de hidrógeno presente en la muestra generada por el sistema de electrólisis, de manera complementaria, el anemómetro Testo 480 permitió determinar el flujo de hidrógeno suministrado durante los ensayos.

Para examinar la respuesta térmica del sistema de escape, se empleó una cámara termográfica TOPDON TC001. Este equipo permitió evaluar el comportamiento de la temperatura del sistema de escape durante las condiciones de operación sin hidrógeno y con hidrógeno, mediante una medición no invasiva de su distribución térmica, las imágenes obtenidas permitieron identificar las variaciones de temperatura registradas durante el funcionamiento del motor y comparar el comportamiento térmico del sistema de escape entre ambas condiciones experimentales. Para la adquisición de datos de operación del vehículo, se seleccionó un equipo registrador de datos y un sistema portátil e integrado de medición de emisiones (iPEMS). El

registrador de datos correspondió a un dispositivo ELM327, el cual permitió obtener información en tiempo real a través del sistema OBD-II mediante la interfaz de la aplicación Torque Pro. Por su parte, para la medición de emisiones se utilizó el equipo parSYNC® FLEX-PNC iPEMS, de la marca 3DATX, encargado de registrar en tiempo real la concentración de gases, el número de nanopartículas y los datos provenientes del sistema OBD-II.

Adicionalmente, se empleó un dispositivo de conexión denominado cable en Y, cuya función consiste en permitir la conexión en paralelo de dos equipos al puerto OBD-II del vehículo, de modo que ambos puedan registrar datos simultáneamente.

En la Tabla 9 se presenta un resumen de los equipos utilizados; además, en los apartados siguientes se describen sus características y su función dentro de la investigación.

Tabla 9. *Equipos Utilizados en la Investigación*

Tipo de variable	**Equipo**	**Función**
Variables de suministro de hidrógeno	Celda de hidrógeno	Incorporar hidrógeno en el múltiple de admisión del motor durante los ensayos experimentales.
	Anemómetro Testo 480	Medir el flujo de hidrógeno producido por la celda.
Variables de composición del gas	Cromatógrafo de gases PerkinElmer Clarus 500	Determinar la concentración de hidrógeno presente en el gas generado por el sistema experimental.
Variables térmicas del catalizador	Cámara termográfica Topdon TC001	Evaluar el comportamiento térmico del sistema de escape en operación convencional y con hidrógeno.
Variables de emisiones	iPEMS 3DATX parSYNC® FLEX-PNC	Medir las emisiones generadas por el vehículo durante las condiciones de operación evaluadas.
Variables de operación de motor	Registrador ELM327 + Torque Pro	Adquirir datos del vehículo a través del sistema OBD-II, correspondientes a los parámetros de operación del motor.
	Cable conector en “Y” para puerto OBD-II	Permitir la alimentación y conexión simultánea del ELM327 y otros dispositivos requeridos durante la adquisición de datos.

3.3.1 Equipo de generación de hidrógeno

El equipo de generación de hidrógeno ilustrado en la Figura 28, corresponde a un electrolizador de celda húmeda, cuyo funcionamiento se basa en la descomposición química del agua en sus elementos constitutivos: hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). El hidrógeno producido se introduce en el motor a través del sistema de admisión, donde se mezcla con el aire y el combustible, participando en el proceso de combustión dentro de las cámaras del motor.

Figura 28. *Equipo generador de hidrógeno*



Las especificaciones técnicas del electrolizador empleado en la campaña experimental se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. *Especificaciones técnicas del equipo generador de hidrógeno*

Característica	Descripción
Marca	Power Gemp
Tipo	Celda Húmeda
Dimensiones	(10x10x28)cm
Electrolito	Bicarbonato de sodio (NaHCO3)
Voltaje de operación	5 V
Consumo de corriente	2 A
Material de electrodos	Acero Inoxidable
Número de electrodos positivos	6
Número de electrodos negativos	6
Flujo promedio de hidrógeno	21.8 L/hora

3.3.2 Cromatógrafo de gases PerkinElmer Clarus 500

El cromatógrafo de gases PerkinElmer Clarus 500, mostrado en la Figura 29, fue el equipo utilizado para analizar la composición del gas generado por la celda de electrólisis. Su función consiste en separar, identificar y cuantificar los componentes presentes en una muestra gaseosa mediante una columna cromatográfica y un gas portador.

Figura 29. *Cromatógrafo de gases PerkinElmer Clarus 500*



Tomado de: (Laboratorio de Análisis Instrumental EPN, 2026)

El principio de funcionamiento del equipo se basa en la diferente interacción de los componentes de la muestra con la fase estacionaria de la columna cromatográfica. Para este análisis se empleó una columna con tamiz molecular Adsorbente 13X, adecuada para la separación de gases ligeros como el hidrógeno. Las muestras fueron recolectadas en bolsas Tedlar, presentadas en la Figura 30, utilizadas para el almacenamiento y transporte de gases y vapores, incluidos compuestos orgánicos volátiles y gases inorgánicos.

Figura 30. *Bolsas Tedlar*



Tomado de: (Laboratorio de Análisis Instrumental EPN, 2026)

Las especificaciones técnicas del cromatógrafo empleado durante la investigación se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. *Especificaciones técnicas del Cromatógrafo de gases PerkinElmer Clarus 500*

Característica	Descripción
Modelo	Clarus 500
Tipo de equipo	Cromatógrafo de gases automatizado
Rango de temperatura del horno	-99 °C a 450 °C
Programación térmica	Rampas y mesetas programables
Gas portador	Helio
Tipo de detector	Conductividad térmica (TCD)
Temperatura del detector	100 °C a 350 °C
Control neumático	Programable (PPC)
Interfaz de operación	Pantalla táctil
Alimentación eléctrica	120–230 V, 50/60 Hz
Peso	49 kg

Tomado de: (PerkinElmer, 2006)

3.3.3 Anemómetro Testo 480

El medidor multifunción Testo 480 se presenta en la Figura 31, correspondiente al equipo empleado para la medición del flujo de hidrógeno suministrado por el sistema de electrólisis durante los ensayos experimentales.

Figura 31. *Anemómetro Testo 480*



Tomado de: (Testo, 2026)

Este instrumento permite registrar variables asociadas a velocidad, caudal, presión diferencial, temperatura, humedad y otros parámetros físicos, dependiendo del tipo de sonda conectada al equipo. Las características técnicas del medidor multifunción utilizado se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. *Especificaciones técnicas del Anemómetro Testo 480*

Característica	Descripción
Principio de medición	Sensor interno de presión diferencial
Rango de presión diferencial	-100 a +100 hPa
Variables compatibles	Velocidad, caudal, temperatura, humedad y presión
Sondas conectables	3 sondas digitales opcionales y 2 sondas de temperatura tipo K
Memoria de datos	Hasta 60 000 000 valores medidos
Transmisión de datos	USB o tarjeta SD
Software de operación	EasyClimate
Alimentación	Batería o fuente de alimentación externa
Temperatura de operación	0 °C a +40 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 °C a +60 °C
Clase de protección	IP30
Peso	435 g

Tomado de: (Testo, 2026)

3.3.4 Cámara termográfica TOPDON TC001

La cámara termográfica TOPDON TC001, mostrada en la Figura 32, fue utilizada para medir la temperatura superficial del catalizador en los puntos de entrada y salida de los gases de escape. Las mediciones se realizaron con el sistema de inyección de hidrógeno activado y desactivado, con el fin de evaluar la influencia de este gas sobre el comportamiento térmico del sistema de postratamiento.

Figura 32. *Cámara termográfica TC001*



Tomado de: (TOPDON, 2017)

Este dispositivo permite transformar un teléfono, una tableta Android o un computador con sistema operativo Windows en una cámara termográfica portátil mediante la conexión a un puerto USB-C. Su funcionamiento se basa en la detección de la radiación infrarroja emitida por los cuerpos, lo que permite determinar la distribución de temperatura sobre una superficie sin necesidad de contacto directo.

Las principales características técnicas de la cámara empleada se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. *Especificaciones técnicas de la cámara termográfica TC001*

Característica	**Descripción**
Principio de medición	Detección de radiación infrarroja
Rango espectral	8 – 14 μm
Resolución térmica	256 × 192 píxeles
Tamaño de píxel	12 μm
Sensibilidad térmica (NETD)	< 40 mK a 25 °C
Frecuencia de actualización	25 Hz
Rango de medición de temperatura	-20 °C a 550 °C
Precisión de medición	± 2 °C o ± 2 % de la lectura
Resolución de temperatura	0,1 °C
Sistemas operativos compatibles	Android y Windows
Conectividad	Puerto USB-C
Longitud del cable	50 cm
Dimensiones	71 × 42 × 14 mm
Peso	30 g

Tomado de: (TOPDON, 2017)

3.3.5 iPEMS 3DATX parSYNC FLEX-PNC

El equipo iPEMS 3DATX parSYNC FLEX-PNC **(**Figura 33**)** permite registrar las emisiones generadas por el vehículo en condiciones reales de operación., siendo capaz de medir compuestos como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO y NO_2) y oxígeno (O_2), mediante el uso de sensores electroquímicos y tecnología de infrarrojo no dispersivo (NDIR).

Figura 33. *Equipo PEMS 3DATX*



Las características técnicas del equipo utilizado para el registro de las emisiones se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. *Especificaciones técnicas del equipo PEMS 3DATX*

Característica	Descripción
Dimensiones	43 cm × 57 cm × 25 cm
Peso	19.7 kg (con baterías) / 17.6 kg (sin baterías)
Gases medidos	CO_2, CO, HC, NO_2, NO, O_2
Partículas medidas	PM, PN23, PN10
Tipo de sensores	Cartuchos intercambiables (hot-swap)
Acondicionamiento de muestra	Eliminación de condensado y reducción de partículas volátiles
Frecuencia de registro	1 Hz
Alimentación	Baterías de 18 V y fuente externa
Autonomía	~1,5 horas por batería (expandible con hot-swap)
Conectividad	Wi-Fi y Ethernet
Software de operación	Interfaz gráfica (GUI) y almacenamiento interno
Combustibles compatibles	Gasolina, diésel, mezclas, GLP, GNL, GNC
Temperatura de operación	5 °C a 40 °C
Humedad relativa	0.5 % a 85 % sin condensación

Tomado de: (3DATX, 2026b)

3.3.5.1 Componentes del Equipo PEMS

El equipo PEMS 3DATX parSYNC® FLEX-PNC iPEMS está conformado por un conjunto de componentes que permiten la toma y análisis de las muestras de gases de escape durante los ensayos en ruta. Estos elementos trabajan de manera simultánea para garantizar la estabilidad del equipo y la confiabilidad de los datos obtenidos.

Entre los principales componentes se encuentra la estación meteorológica con GPS, presentada en la Figura 34, la cual permite registrar variables como la geolocalización del vehículo durante el recorrido experimental.

Figura 34. *Estación meteorológica con GPS*



Tomado de: (3DATX, 2026a)

El registrador de datos OBD Vgate vLinker, mostrado en la Figura 35, encargado de adquirir información proveniente de la unidad de control del vehículo, complementando los datos de emisiones con parámetros de operación del motor como la posición del acelerador, lambda, temperatura del aire de admisión, entre otros.

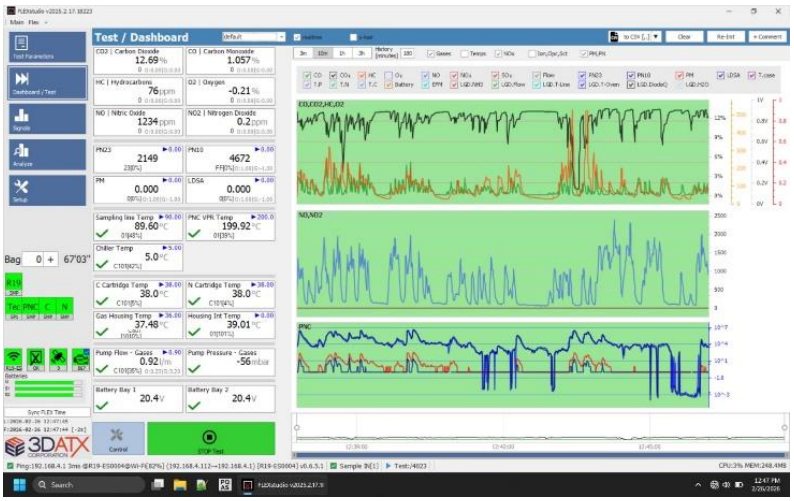
Figura 35. *OBD Vgate vLinker*



Tomado de: (3DATX, 2026a)

Los datos registrados por el dispositivo OBD Vgate vLinker se integran y visualizan a través de la interfaz del software FLEXstudio mostrada en la Figura 36, utilizada por el sistema PEMS, lo que permite un análisis conjunto de las variables de operación y de emisiones.

Figura 36. *Software FLEXstudio*



Tomado de: (3DATX, 2026a)

Para el suministro energético del sistema, se empleó como fuente principal una central eléctrica portátil Oukitel P2400, mostrada en la Figura 37, la cual permitió abastecer de manera continua a los equipos durante la ejecución de las pruebas en ruta.

Figura 37. *Central eléctrica portátil Oukitel P2400*



Tomado de: (OUKITEL, 2026)

Con el fin de alimentar al equipo PEMS se hizo uso de una fuente de alimentación Mean Well HLG-240H (20 V–12 A), presentada en la Figura 38, encargada de regular la entrega de energía hacia el equipo y evitar fluctuaciones que pudieran afectar la precisión de las mediciones.

Figura 38. *Fuente de alimentación Mean Well*



Tomado de: (MEAN WELL, 2026)

De manera complementaria, se utilizaron baterías recargables Milwaukee M18 de 8.0 Ah como sistema de respaldo, mostradas en la Figura 39, lo que permitió mantener la operatividad del conjunto ante eventuales interrupciones y asegurar una adecuada autonomía durante toda la campaña experimental.

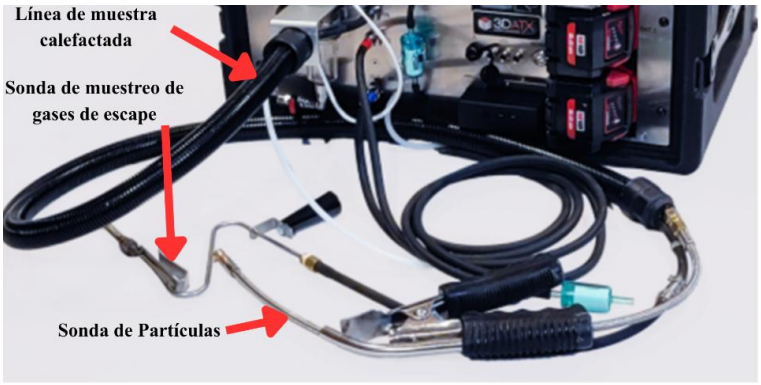
Figura 39. *Baterías recargables Milwaukee M18 8.0 Ah*



Tomado de: (3DATX, 2026a)

En cuanto al sistema de muestreo, mostrado en la Figura 40, cuenta con una línea de muestra calefactada, una sonda de muestreo de gases de escape y una sonda específica para partículas, las cuales permiten transportar la muestra desde el sistema de escape del vehículo hacia los módulos de análisis, evitando la condensación y pérdida de componentes.

Figura 40. *Sistema de Muestreo iPems 3DATX*



Tomado de: (3DATX, 2026a)

Adicionalmente, se incorporaron filtros HEPA, ilustrados en la Figura 41, caracterizados por poseer un 93% de filtración a 10nm, cuya función es retener impurezas de materia particulada que podrían afectar la precisión de las mediciones o comprometer el funcionamiento del equipo.

Figura 41. *Filtros HEPA*



Tomado de: (3DATX, 2026a)

Finalmente, el equipo PEMS incluye tuberías de conexión A60-G Tygon , mostradas en la Figura 42, caracterizadas por su baja permeabilidad y su capacidad de operar a altas temperaturas (-60 a 135 ºC) para transportar la muestra.

Figura 42. *Tuberías de conexión A60-G Tygon*



Tomado de: (3DATX, 2026a)

De igual manera en la Figura 43 se presentan los cartuchos intercambiables del sistema, los cuales permiten la medición de distintos contaminantes. El cartucho C-GasMOD cuantifica CO, CO_2 y HC mediante tecnología NDIR, además de O_2 a través de una celda electroquímica; el cartucho N-GasMOD mide NO y NO_2 mediante celdas electroquímicas individuales; y el cartucho de partículas determina PN y PM mediante la combinación de sensores de dispersión, ionización y opacidad.

Figura 43. *Cartuchos equipo iPems*



Tomado de: (3DATX, 2026a)

3.3.6 Equipo de adquisición de datos ELM327

El equipo de adquisición de datos ELM327, presentado en la Figura 44, corresponde a un dispositivo de diagnóstico automotriz que permite la comunicación con la unidad de control electrónico (ECU) del vehículo a través del puerto OBD-II. Su funcionamiento se basa en la

interpretación de los protocolos de comunicación estandarizados, lo que posibilita la lectura de variables de operación del motor y parámetros cinemáticos en tiempo real.

Figura 44. *Datalogger ELM327*



Tomado de: (GALAXUS, 2026)

3.3.7 Aplicación de extracción de datos Torque Pro

La aplicación de Torque Pro, mostrada en la Figura 45, es una herramienta que nos permite monitorear datos del motor en tiempo real, de igual manera identificar códigos de falla (DTCs), esta se conecta mediante Bluetooth o Wifi al adaptador que se esté conectado al puerto OBD2.

Figura 45. *Interfaz Torque Pro*



El apartado de mayor relevancia corresponde al menú de “Realtime Information” presentado en la Figura 46, permite obtener datos de operación del vehículo como es el régimen del motor, posición del acelerador, temperatura del refrigerante, velocidad,entre otros dependiendo de los Parámetros de diagnóstico a bordo (PIDs) seleccionados.

Figura 46. *Apartado de información en tiempo real Torque Pro*



3.3.8 Cable divisor OBD-II

El cable divisor para puerto OBD-II o también denominado Cable en “Y”, presentado en la Figura 47, es un componente de conexión su diseño se basa en la derivación paralela de los pines del conector OBD-II, manteniendo la integridad de las señales de comunicación entre la ECU y los equipos externos conectados.

A este dispositivo se conectaron el ELM327 y el lector OBD correspondiente al sistema iPEMS, lo que hizo posible la adquisición concurrente de información operativa y de emisiones durante las pruebas.

Figura 47. *Cable divisor OBD-II*

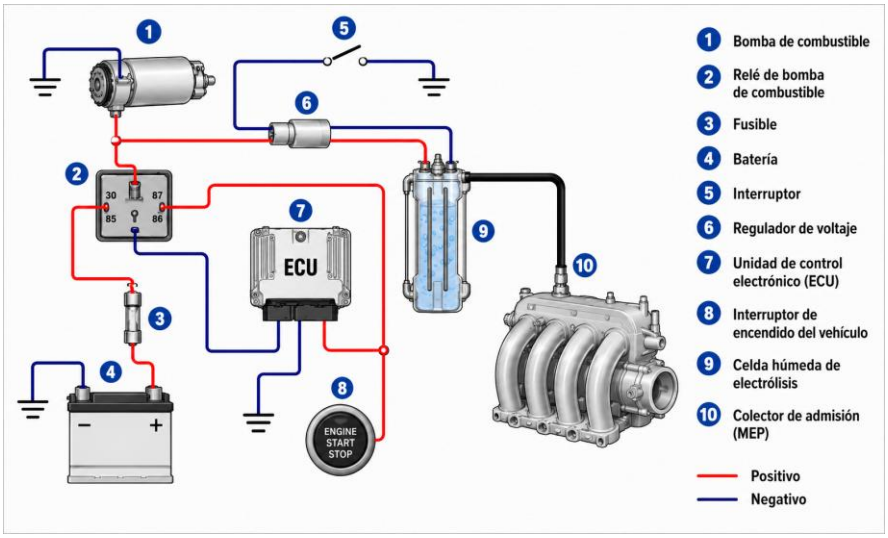


Tomado de: (Importaciones Camaleón, 2024)

3.4 Implementación del sistema de hidrógeno

Como se explicó anteriormente, el sistema de generación de hidrógeno se integra al vehículo con el fin de introducir el gas producido en el sistema de admisión del motor, permitiendo así su participación directa en el proceso de combustión de la mezcla aire-combustible. Para facilitar la comprensión de esta integración, en la Figura 48 se presenta un esquema ilustrativo de la instalación del equipo en el vehículo. En dicho esquema se representan trece componentes que abarcan tanto la conexión eléctrica de la celda como su acoplamiento al sistema de admisión del motor.

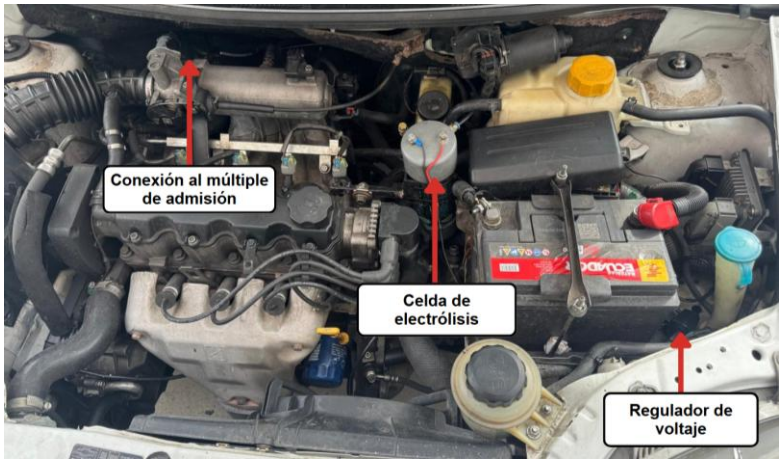
Figura 48. *Esquema de montaje de la celda de electrólisis*



La celda de electrólisis se conecta eléctricamente al relé de la bomba de combustible. Esta celda incluye un regulador de voltaje que reduce la tensión de 12 V a 5 V, para asegurar un funcionamiento correcto sin producir vapor de agua o sobrecalentamiento. El regulador es alimentado desde la terminal de salida (87) del relé, mientras que su terminal negativa se conecta a masa mediante un interruptor, por lo que se puede activar o desactivar la celda de acuerdo a los requerimientos de la prueba, de esta manera, el sistema solo se activa cuando el vehículo está encendido y el conductor lo activa con el interruptor correspondiente.

Después, el regulador de voltaje se conecta directamente a los bornes de la celda de electrólisis. Terminada la instalación eléctrica, la salida de gas de la celda se lleva a través de una manguera a la entrada de vacío del múltiple de admisión. A esta altura se incorpora un shiglor de 0.6 mm que permite presurizar el flujo de hidrógeno previo a su ingreso al múltiple. Finalmente, el gas mezclado con el aire de admisión es conducido a las cámaras de combustión del motor, participando directamente en el proceso de combustión. Todo el diagrama de conexión anterior se muestra nuevamente en la Figura 49, una vez ya instalado en el vehículo Aveo Family 2017.

Figura 49. *Instalación de la celda de electrólisis*



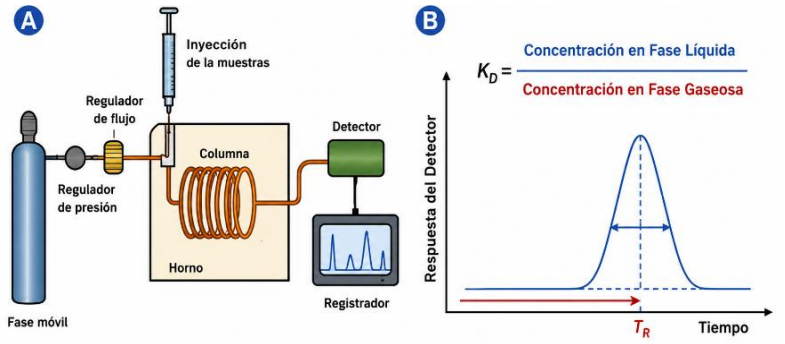
3.5 Ensayo de Cromatografía de gases

La cromatografía de gases es una técnica analítica utilizada para determinar la composición de mezclas gaseosas o sustancias vaporizadas. Su funcionamiento se basa en la introducción de una muestra dentro de una columna cromatográfica, donde los compuestos son transportados por un gas portador y separados según su interacción con la fase estacionaria. Como resultado, cada

componente presenta un tiempo de retención diferente, generando picos característicos en el cromatograma que permiten su identificación y cuantificación (ATRIA, 2026).

El principio general de funcionamiento de esta técnica se resume en el esquema mostrado en la Figura 50.

Figura 50. *Esquema general del ensayo de cromatografía de gases*



Tomado de: (Bagnato, 2013)

En la presente investigación, la cromatografía de gases se utilizó para determinar la composición del gas generado por el electrolizador empleado durante la campaña experimental. Para ello, la muestra fue recolectada en bolsas Tedlar conectadas a la línea de salida de gas de la celda de electrólisis, conforme al esquema presentado en la Figura 51.

Figura 51. *Esquema de conexión y extracción de la muestra en la bolsa tedlar*



Posteriormente, la muestra fue inyectada en el cromatógrafo bajo condiciones controladas y transportada a través de la columna mediante helio como gas portador. Durante este recorrido, los componentes fueron separados de acuerdo con su interacción con el material adsorbente y

posteriormente detectados mediante un detector de conductividad térmica (TCD), encargado de su identificación y cuantificación. Finalmente, la información obtenida fue procesada por el software del equipo y visualizada en un computador. Los resultados derivados de este ensayo se presentan en el apartado de caracterización del hidrógeno dentro del capítulo de análisis de resultados.

3.6 Pruebas Piloto y Configuración de Equipos

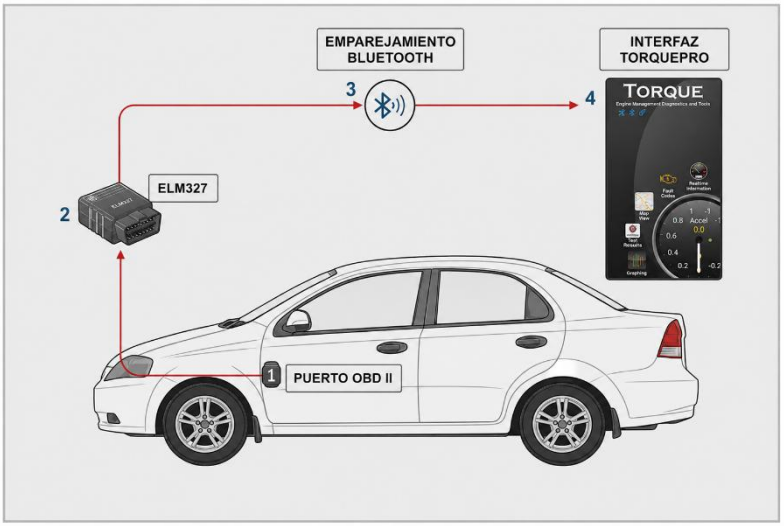
Los ensayos piloto corresponden a pruebas preliminares realizadas con el propósito de verificar la conexión de los equipos empleados en la campaña experimental, así como la sincronización y transmisión de los datos registrados. Estas pruebas permitieron validar la calidad de la información recolectada y, a partir de ello, efectuar ajustes en la configuración de registradores y sensores. Entre los principales ajustes se incluyeron la optimización de las frecuencias de muestreo y la calibración entre sensores cuando fue necesario. A continuación, se describen la prueba de comunicación OBD-II y la configuración final de los equipos utilizados.

3.6.1 Prueba de Comunicación del ELM327

La verificación de la comunicación del sistema OBD-II mediante el registrador ELM327 se desarrolló mediante una secuencia ordenada de pasos. Primero, se inspeccionó la conexión física entre el dispositivo y el puerto OBD-II del vehículo, comprobando el acoplamiento correcto del conector para evitar falsos contactos que pudieran afectar la transmisión de datos. Luego, se colocó el vehículo en modo de ignición (ON) para verificar el suministro de energía al registrador mediante la activación del indicador LED.

Posteriormente, se estableció el emparejamiento Bluetooth entre el ELM327 y un dispositivo móvil. Como se indicó anteriormente, aunque el equipo permite obtener datos de operación del vehículo, su registro requiere el uso de la aplicación Torque Pro en un dispositivo con sistema operativo Android. Finalmente, se estableció la conexión entre la aplicación y el registrador. La Figura 52 muestra la conexión implementada entre el ELM327 y el puerto OBD-II del vehículo.

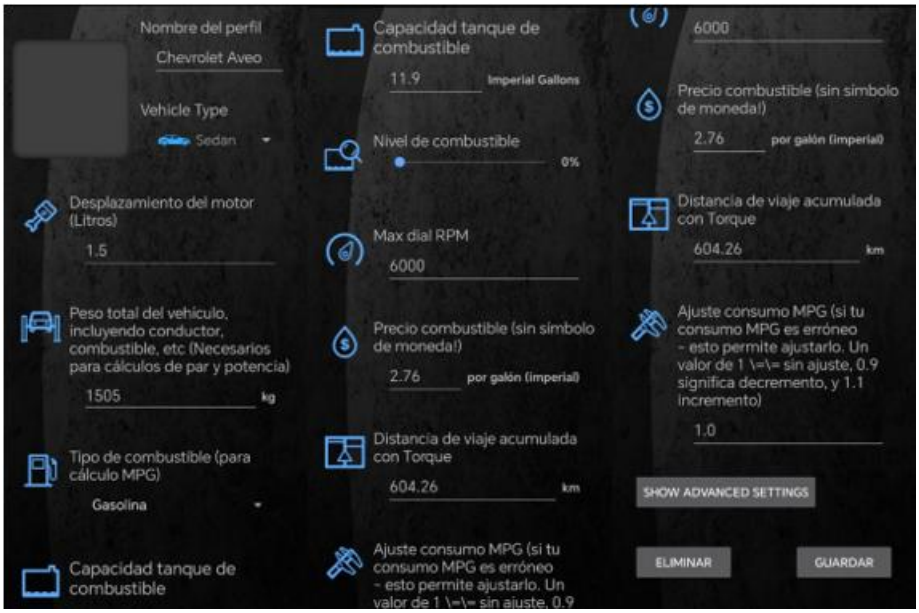
Figura 52. *Diagrama de conexión ELM327 a Torque Pro*



3.6.1.1 Configuración de la Aplicación Torque Pro

Para el registro de datos se utilizó la versión de pago de la aplicación Torque Pro presentada en la Figura 53, ya que esta permite acceder a las funciones de adquisición y almacenamiento de información. Como parte de la configuración inicial, se creó un perfil con las características del vehículo empleado en la campaña experimental.

Figura 53. *Configuración del perfil del vehículo en la interfaz Torque Pro*



Después, se seleccionaron los identificadores de PIDs de mayor interés para el estudio, con el fin de registrar las variaciones de los parámetros del motor y del vehículo durante condiciones reales de conducción. A cada PID seleccionado se le asignó una frecuencia de muestreo de 1 Hz, suficiente para representar la variación de las variables analizadas durante el desarrollo de la investigación. Los PIDs configurados se presentan en la Tabla 15.

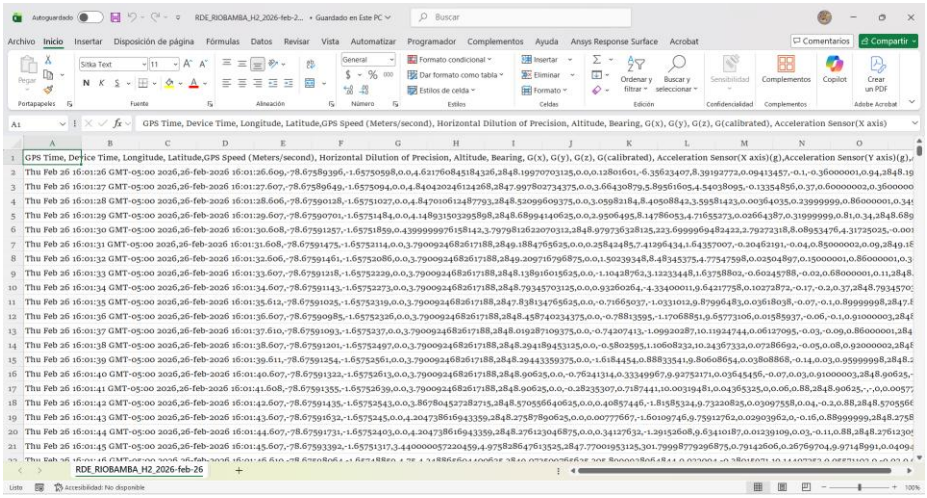
Tabla 15. *PIDS seleccionados en la interfaz Torque Pro*

PID seleccionado	Unidad
Engine Load	%
Trip Distance	km
Throttle Position (Manifold)	%
Intake Manifold Pressure	kPa
Air Fuel Ratio (Measured)	-
Engine RPM	rpm
Ambient Air Temperature	°C
Engine Coolant Temperature	°C
Speed (GPS)	km/h

3.6.1.2 Exportación de datos registrados

Para el procesamiento de la información, se realizó un viaje de prueba con el fin de evaluar la estabilidad de la conexión entre el ELM327 y la aplicación Torque Pro, así como validar la configuración establecida; una vez finalizado el recorrido, se ingresó al apartado Real Time Information desde el menú principal de la aplicación y, posteriormente, a la sección de ajustes para seleccionar la opción Registros por Correo Electrónico , permitiendo acceder a los registros generados durante el recorrido y seleccionar los archivos correspondientes para su exportación. Los datos se almacenaron en formato Valores Separados por Comas (*Comma Separated Values*, CSV), cuya estructura facilitó su organización y posterior procesamiento mediante las herramientas utilizadas en el análisis de la información. La Figura 54 presenta un ejemplo del archivo **.CSV** generado con la información obtenida durante la prueba.

Figura 54. *Registro de datos .CSV*



3.6.2 Prueba de Flujo del Anemómetro Testo 480

Para la toma de datos mediante el anemómetro Testo 480, el procedimiento se realizó en dos etapas. En la primera, una vez conectada la sonda TP tipo K (NiCr-Ni) de hilo caliente, con un rango de temperatura de -60 hasta +1000 °C, se efectuó la configuración del anemómetro. Posteriormente, en la segunda etapa, se utilizó el software EasyClimate para extraer los datos en formato Excel.

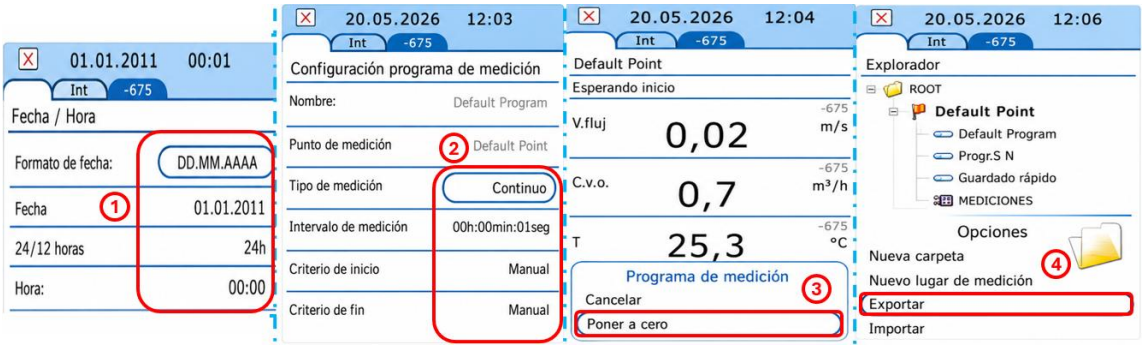
3.6.2.1 Configuración del Anemómetro

Inicialmente, al encender el anemómetro, la sonda fue detectada automáticamente por el equipo, por lo que se procedió a configurar la fecha y la hora con la finalidad de identificar correctamente los archivos correspondientes a cada ensayo realizado, como se muestra en el Paso 1. Posteriormente, se llevó a cabo la configuración del programa de medición presentada en el Paso 2, permitiendo establecer los parámetros necesarios para la adquisición de datos proporcionados por la sonda, correspondientes a temperatura, velocidad y caudal. En este caso, se definió una frecuencia de adquisición de 1 Hz para el registro continuo de las variables analizadas.

Una vez creada la configuración del programa de medición, se procedió a encerar el anemómetro buscando asegurar una correcta calibración antes del inicio de las pruebas experimentales. Posteriormente, se realizaron tres ensayos a diferentes potencias con la finalidad de analizar la variación del flujo durante cada condición de operación evaluada, procedimiento que se representa en el Paso 3.

Finalmente, los datos obtenidos en cada ensayo fueron exportados mediante una tarjeta SD, tal como se observa en el Paso 4. Todo el procedimiento de configuración y adquisición de datos del anemómetro se representa visualmente en la Figura 55.

Figura 55. *Configuración anemómetro Testo 480*



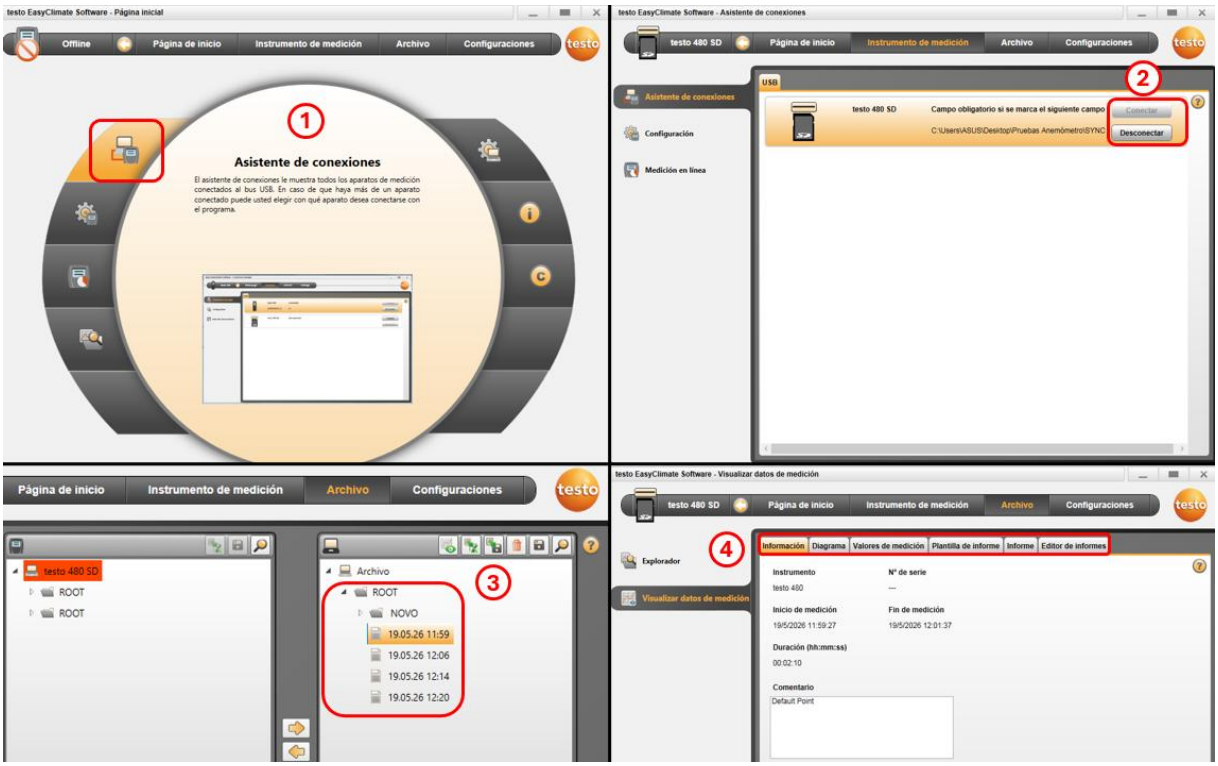
3.6.2.2 Decodificación de datos mediante el software EasyClimate

Como segunda etapa, se procedió a decodificar los datos obtenidos mediante la tarjeta SD, para lo cual se hizo uso del software para computador EasyClimate, programa que permitió transformar los datos registrados a formato Excel y, de igual manera, visualizarlos de manera gráfica.

Primeramente, se conectó la tarjeta SD al computador y posteriormente se abrió el programa EasyClimate seleccionando el asistente de conexiones, procedimiento que se muestra en el Paso 1. Posteriormente, se realizó la conexión del software con la tarjeta SD, como se representa en el Paso 2, permitiendo acceder a los archivos almacenados. Una vez establecida la conexión, se ingresó a la sección “Archivo”, mostrada en el Paso 3, donde fue posible visualizar la carpeta que contenía los archivos correspondientes a cada ensayo, organizados en función de la fecha y la hora de registro.

Finalmente, al abrir cada uno de los archivos dentro del programa, como se representa en el Paso 4, se visualizaron datos informativos relacionados con el tiempo de duración de los ensayos, diagramas, valores registrados segundo a segundo y diferentes parámetros de medición. Además, el software permitió generar informes a partir de los datos experimentales obtenidos. Todo este procedimiento de decodificación y visualización de datos se representa en la Figura 56.

Figura 56. *Configuración software EasyClimate*



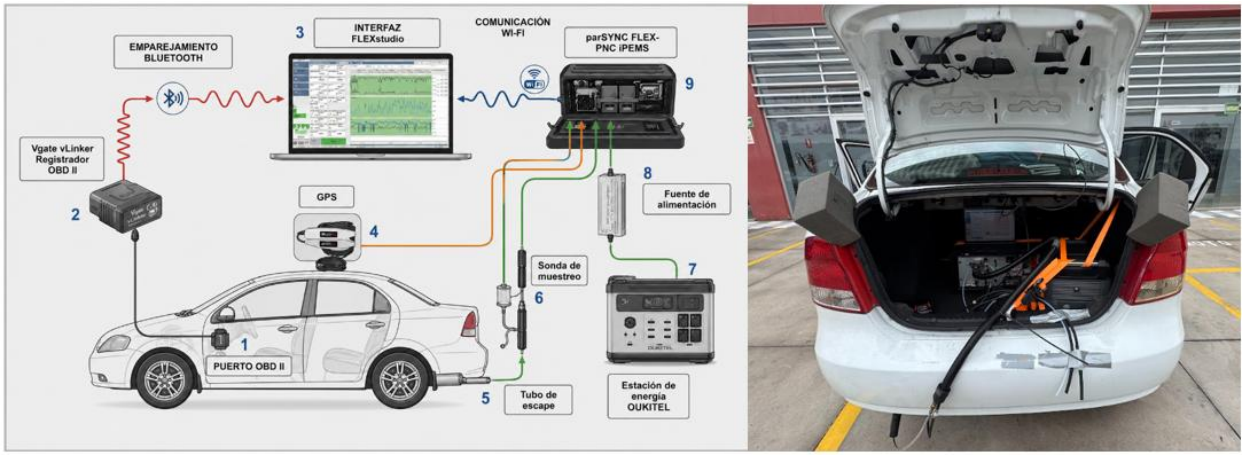
3.6.3 Prueba de comunicación del equipo PEMS

Como parte de los ensayos piloto, en este apartado se describe el proceso de prueba del equipo 3DATX parSYNC FLEX-PNC iPEMS, empleado para la medición de gases de escape durante la campaña experimental. Su implementación se desarrolló en tres fases: montaje físico, conexión de periféricos y configuración del software. Cada una de estas etapas se ejecutó de acuerdo con los procedimientos establecidos en el manual del fabricante. A continuación, se describen las actividades realizadas en cada fase.

3.6.3.1 Montaje físico

El proceso de montaje incluyó la instalación del equipo parSYNC® FLEX-PNC y demás elementos que lo componen, elementos descritos previamente en el apartado de selección de equipos. Además, se incorporó la estación de energía OUKITEL, destinada a suministrar alimentación al sistema. Considerando las características del vehículo de estudio, se optó por instalar el equipo en la zona del maletero, procurando mantener una separación adecuada entre la estación de energía y el PEMS para facilitar la conexión y distribución de los demás componentes. La Figura 57 muestra el esquema representativo del montaje de los componentes del sistema.

Figura 57. *Diagrama de conexión y montaje físico iPems 3DATX*



En el esquema se puede ver que el equipo PEMS recibe alimentación desde la estación OUKITEL, mediante una fuente Mean Well HLG-240H, que convierte y estabiliza la energía de suministro. El sistema utiliza datos provenientes de tres fuentes principales. El primero es el registrador Vgate vLinker que permite obtener datos del sistema OBD-II. La segunda proviene del GPS integrado al sistema, el cual es el encargado de proporcionar la información de posicionamiento. La tercera se refiere a los gases de escape, que son conducidos hacia el equipo a través de las sondas y líneas de muestreo.

Todo el material recogido es recibido por un ordenador a través del software FLEXstudio, propiedad del mismo fabricante. En esta configuración, el registrador Vgate vLinker se ajusta con el software por conexión Bluetooth, mientras que el GPS y la señal asociada al muestreo de gases se integran por comunicación Wi-Fi entre el PEMS y el software.

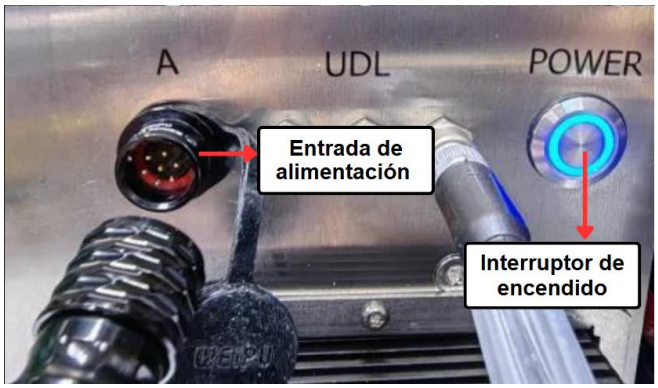
3.6.3.2 Conexión de periféricos

En esta etapa se conectaron los componentes periféricos del sistema PEMS: tuberías, filtros, sondas de muestreo y elementos de alimentación, encargados del suministro de información, conducción de gases y alimentación energética durante el ensayo. Los detalles y descripciones de estas conexiones se presentan en las siguientes figuras.

3.6.3.2.1 Conexión de alimentación energética

La entrada de alimentación conecta la fuente de energía que mantiene en operación los analizadores de gases, sensores, bombas de muestreo y el sistema de adquisición de datos durante las pruebas en movimiento. La Figura 58 muestra la conexión de alimentación del equipo PEMS.

Figura 58. *Entrada de alimentación iPems 3DATX*



La alimentación se realiza a través del puerto identificado con la letra A, el cual se conecta a la estación de energía portátil en la salida de corriente alterna, mediante la fuente Mean Well HLG-240H. La Figura 59 presenta esta conexión en la central de energía portátil.

Figura 59. *Conexión de la fuente de alimentación iPems 3DATX*



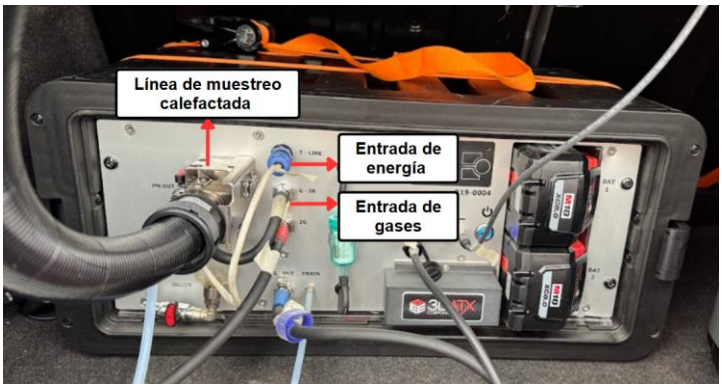
3.6.3.2.2 Conexión de tuberías y sondas de medición

Una vez energizado el equipo, se procedió a la conexión de las tuberías y sondas de medición. Para ello se utilizaron tubos de muestra Tygon A-60-G, con un diámetro de 3,175 mm y una longitud aproximada entre 1 m y 1,2 m**.**

Para la medición de gases y del número de partículas se emplearon líneas calefactadas de 170 cm. En caso de utilizar líneas de mayor longitud, es necesario considerar un mayor consumo de energía y la correspondiente recalibración según la longitud y el diámetro requeridos. La conexión de estas líneas exige alinear correctamente el conector y asegurar el tornillo de sujeción. En el caso de la entrada PNC, la línea se conecta hacia la trampa de agua y el sistema queda fijado mediante el mecanismo de bloqueo. Por su parte, la línea de entrada de gas (G-IN), identificada

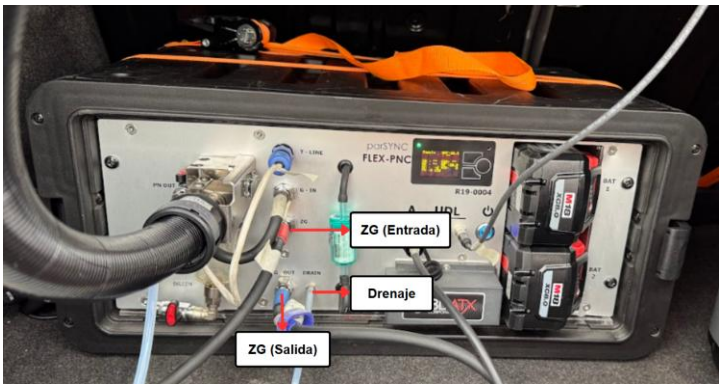
con color blanco, se acopla al puerto respectivo hasta que el conector quede asegurado. La Figura 60 presenta la conexión de la línea calefactada y de la entrada G-IN.

Figura 60. *Conexión de tuberías y sondas iPems 3DATX*



La línea de puesta a cero (ZG), identificada en color rojo, incorpora un filtro HEPA que retiene impurezas del aire y protege el sistema durante la operación. Esta línea se conecta al puerto ZG y se utiliza para el ajuste a cero de las mediciones. La línea de salida de gas (G-OUT), identificada en color azul, descarga al ambiente los gases ya procesados por el equipo. Por su parte, la línea de drenaje del enfriador (DRAIN), de color azul claro, evacua el líquido generado por condensación para evitar afectaciones en el funcionamiento del sistema. La Figura 61 muestra las conexiones correspondientes a ZG, G-OUT y DRAIN.

Figura 61. *Líneas de calibración del iPems 3DATX*



En cuanto al sistema PNC, la salida corresponde a un tubo rígido transparente de 70 cm, acoplado en el puerto de salida ubicado en la placa frontal del FLEX-PNC. Este elemento debe manipularse con cuidado debido a su sistema de presión. El drenaje del PNC no requiere una conexión externa,

pero su puerto debe permanecer cerrado durante la medición. Si se acumula condensado, este debe evacuarse con el flujo de muestra detenido. La Figura 62 presenta la entrada, salida y drenaje del PNC.

Figura 62. *Contador del número de partículas del iPems 3DATX*



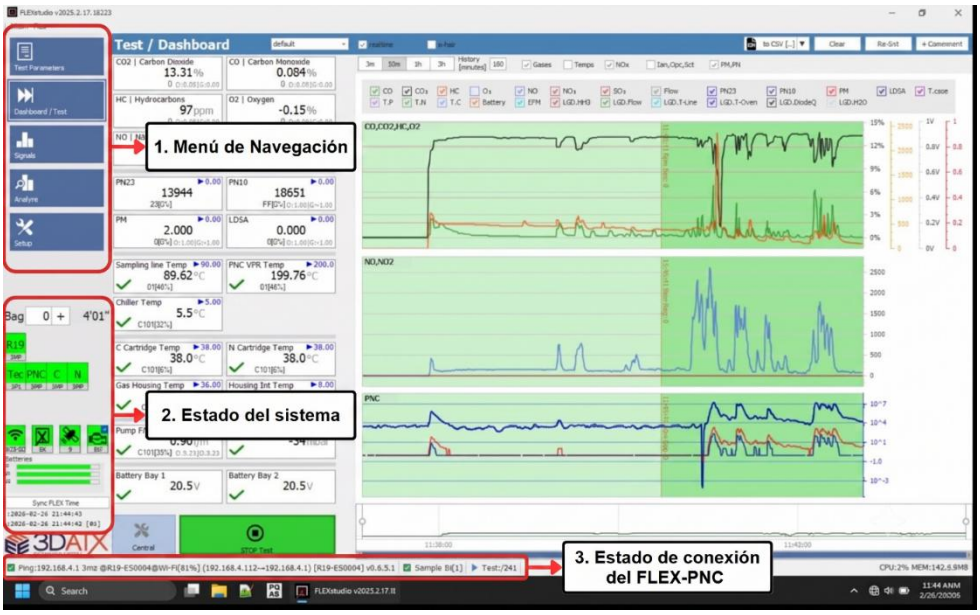
3.6.3.3 Configuración del software

La configuración del software se realizó con el fin de establecer los parámetros operativos y de comunicación necesarios para que el equipo PEMS recopile, procese y almacene los datos. A través de FLEXstudio es posible definir parámetros de prueba, ajustar señales, visualizar datos en tiempo real, analizar resultados, exportar registros y ejecutar la puesta a cero de los sensores. Los procedimientos principales realizados antes de la toma de datos se describen en los apartados siguientes.

3.6.3.3.1 Menú del software FLEXstudio

El software FLEXstudio permite visualizar, registrar y configurar las condiciones de medición del equipo PEMS. Su interfaz mantiene visibles tres áreas principales: el menú de navegación (1), el estado del sistema (2) y el estado de conexión del FLEX-PNC (3). La Figura 63 muestra la disposición general de estos componentes en la interfaz del software.

Figura 63. *Áreas principales del software FLEXstudio*

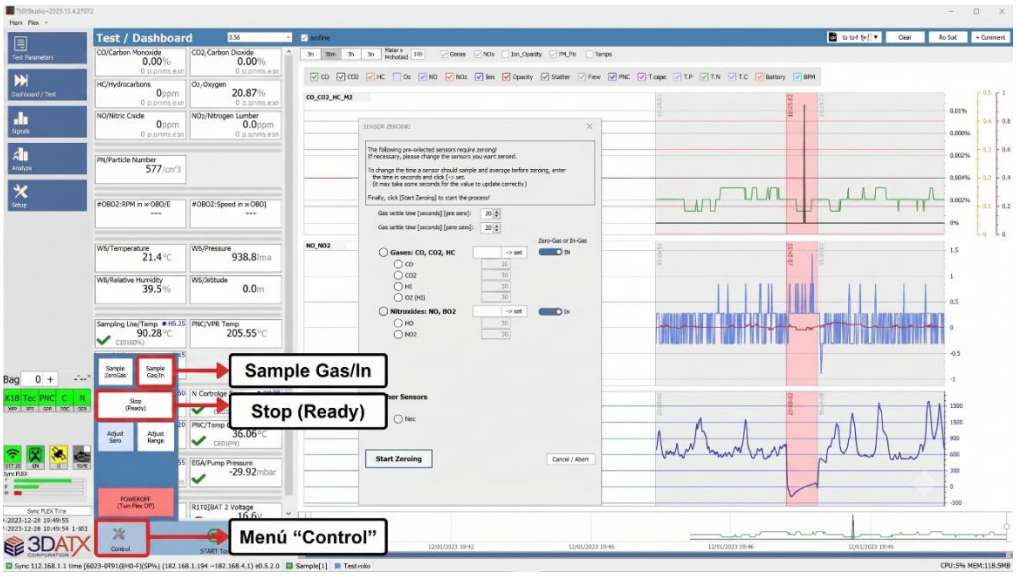


El menú principal reúne cinco pestañas: parámetros de prueba, cuadro de mando o test, señales, analizar y configuración. A través de ellas se accede a la información del vehículo y del ensayo, al control del sistema, a la visualización de señales disponibles, al análisis posterior de los datos y a los ajustes generales del equipo. Por otra parte, el área de estado del sistema presenta información del hardware y de la prueba activa. Finalmente, el área de estado de conexión permite verificar el enlace Wi-Fi o por cable con el FLEX-PNC, mostrando datos como dirección IP, latencia, nombre de red, estado del equipo y nombre de la prueba en ejecución.

3.6.3.3.2 Calibración del equipo PEMS

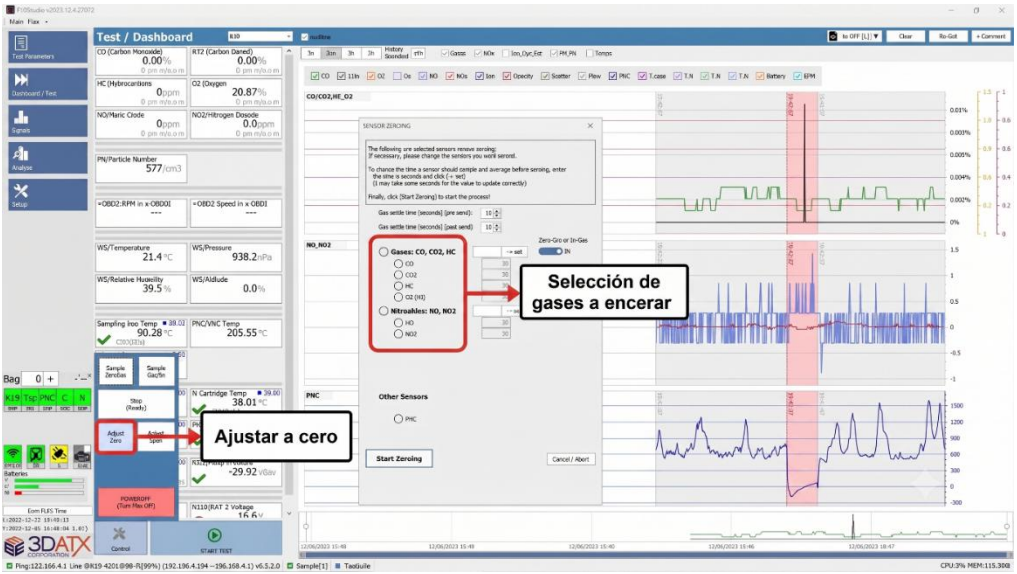
La calibración del equipo PEMS se realizó antes de cada prueba, debido a su influencia directa sobre el funcionamiento de los sensores internos, así como sobre las bombas y motores del sistema. El equipo 3DATX permite ejecutar este proceso de forma automática desde el software FLEXstudio. Para ello, se accedió al menú “Control”, donde se encuentra la opción “Sample Gas/In”, encargada de abrir el puerto “IN”, cerrar el puerto “ZG” y activar la bomba de muestreo. Esta bomba debe operar al menos 5 minutos antes de iniciar la adquisición de datos, con el fin de estabilizar el flujo y la presión. La Figura 64 muestra el menú de control, el encendido de la bomba y la opción “Stop (Ready)”.

Figura 64. *Menú del software FLEXstudio*



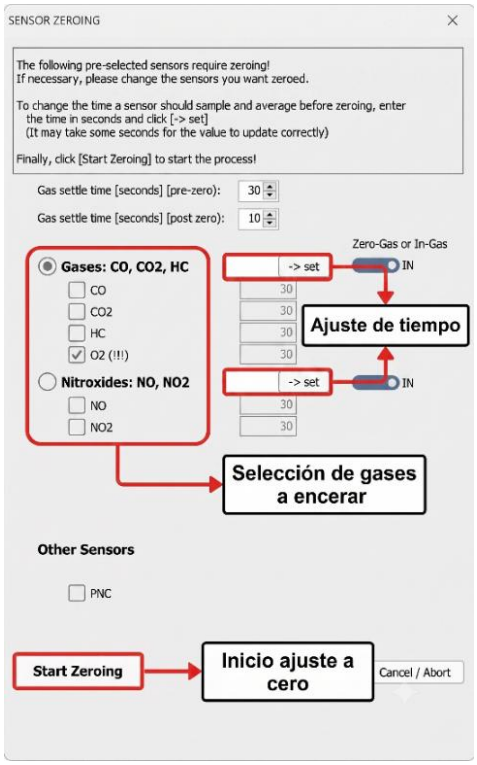
Una vez cumplido este tiempo, se procedió al ajuste a cero de los sensores mediante la opción "Ajustar cero", también ubicada en el menú "Control". Esta función permite definir qué gases serán ajustados, el tiempo de asentamiento del gas, la duración del promedio y el puerto de referencia. Por lo general, el oxígeno molecular (O_2) no se incluye en este procedimiento. La Figura 65 presenta la ventana correspondiente al ajuste a cero.

Figura 65. *Ajuste a cero mediante el software FLEXstudio*



Para esta operación, se estableció un tiempo mínimo de asentamiento previo de 300 segundos y un tiempo posterior de 60 segundos. Si la bomba ya había permanecido encendida durante el tiempo requerido, no fue necesario repetir ese paso. Además, se configuró un tiempo de puesta a cero de 60 segundos para los sensores y se seleccionó el puerto "Gas In" como referencia principal. Debe considerarse que la puesta a cero del PNC sigue un protocolo independiente del aplicado a los puertos de gas de muestra (IN, ZG y OUT). La Figura 66 muestra la configuración final del proceso de ajuste a cero de los sensores.

Figura 66. *Configuración final de los sensores del equipo iPems 3DATX*



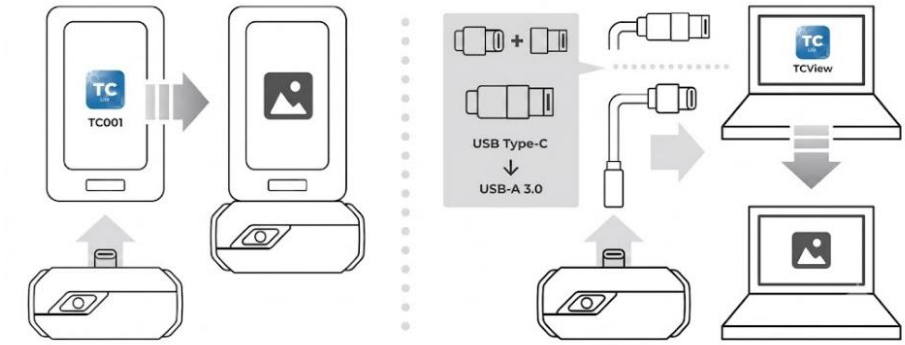
3.6.4 Prueba de comunicación del equipo TopDon TC001 Plus

Otro de los equipos empleados fue el TopDon TC001 Plus, mismo que permitió obtener imágenes termográficas y datos de temperatura segundo a segundo, para el cual, la captura de imágenes y obtención de datos se lo realizaban por medio de la aplicación TopInfrared. La verificación de la comunicación del dispositivo con la aplicación se ejecutó mediante los siguientes pasos. En primera instancia, se realizó la conexión física entre el dispositivo y el puerto USB C del teléfono móvil, comprobando el acoplamiento correcto para evitar falsos contactos. Luego, se

tomó las imágenes termográficas con la opción “Detección de vehículos” ubicada dentro del menú “Asistente”.

Posteriormente, se registró datos de temperatura en tiempo real con la opción “Monitoreo de Temperatura” ubicada en el mismo menú “Asistente”. Cabe mencionar, que el equipo usado permite el registro de temperatura requiere solamente en un dispositivo con sistema operativo Android o una laptop portátil. Finalmente, se exportó cada uno de los datos obtenidos para cada uno de los ensayos de prueba. La Figura 67 muestra la conexión implementada entre el dispositivo TopDon TC001 Plus y el puerto USB C del dispositivo móvil.

Figura 67. *Conexión de la cámara térmica TopDon TC001 Plus*



Tomado de: (TOPDON, 2024)

3.6.4.1 Configuración de imágenes termográficas

La captura de imágenes termográficas permitió obtener representaciones visuales que muestran la distribución de la temperatura y calor en la superficie de los elementos evaluados, que para este estudio fueron el colector de escape y el convertidor catalítico. Para la obtención de estas imágenes fue necesario llevar a cabo la configuración de los parámetros de emisividad térmica.

Este procedimiento de configuración de parámetros inició después de haber realizado la conexión física de la cámara termográfica Topdon y queda representado en la Figura 63, para ello partimos ubicándonos en el menú de Asistente (Paso 1) permitiéndonos así ingresar en la opción “Detección de vehículo” mostrada en el Paso 2. Una vez nos encontramos en este apartado fue indispensable adentrarnos al apartado “Cambiar Parámetros” (Paso 3) para modificar los parámetros de emisividad térmica en función de cada uno de los materiales de los elementos evaluados. Los valores empleados para el presente estudio (Paso 4) se encuentran detallados en la Tabla 16:

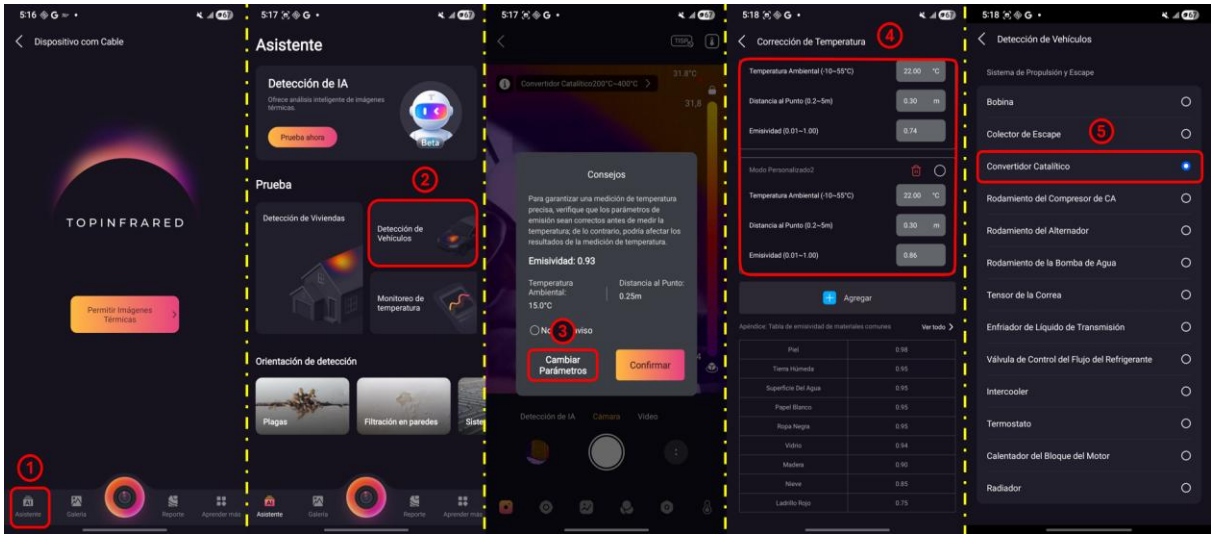
Tabla 16. *Parámetros de temperatura y emisividad térmica*

Parámetros de Temperatura		
Variable	**Valor**	**Unidad**
Temperatura ambiente	22	Grados Celsius
Distancia al Punto	0.3	Metros
	Emisividad térmica	
Elemento de prueba	**Material**	**Valor de emisividad**
Colector de escape	Hierro oxidado	0.86
Convertidor catalítico	Acero oxidado	0.74

Es necesario mencionar que todos los datos para la configuración de estos parámetros fueron seleccionados en el instante de prueba para la medición de temperaturas, de la misma manera los valores de emisividad fueron tomados directamente de la tabla de Emisividad de materiales comunes que viene por defecto en el software TopInfrared. Finalmente, como se muestra en el paso 5, se seleccionó elemento del vehículo del que se deseaba tomar las imágenes termográficas.

Todo este procedimiento se encuentra representado visualmente en la Figura 68 mostrada a continuación.

Figura 68. *Configuración de captura de imágenes termográficas*



3.6.4.2 Configuración de monitoreo de temperatura

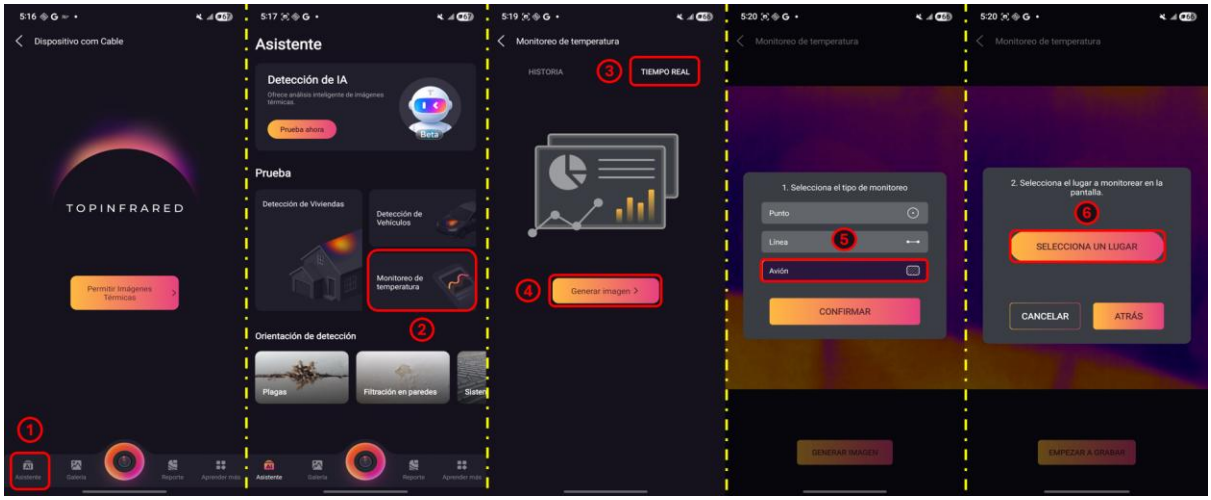
Por otra parte, el monitoreo de temperatura permitió obtener datos de la variación de la temperatura en un punto de medición específico y en un intervalo de tiempo dado con frecuencia de 1 Hz, los elementos evaluados para la obtención de estos datos correspondieron a los mismo

analizados en la sección anterior. En este vaso, para la obtención de estos datos fue necesario llevar a cabo la siguiente configuración dentro de la misma aplicación.

El procedimiento inició de manera similar al caso anterior ubicándonos en el menú de Asistente (Paso 1) permitiéndonos así ingresar en la opción “Monitoreo de temperatura” mostrada en el Paso 2. Una vez nos encontramos en este apartado se seleccionó el apartado “Tiempo Real” (Paso 3) y posterior se pulsó en la función de “Generar Imagen” del Paso 4. Una vez dentro del menú de “Generar Imagen” se procedió a seleccionar el tipo de monitoreo: Punto, línea o avión; en nuestro caso seleccionamos “Avión” porque permitió abarcar un mayor rango de medición y a su vez obtener resultados de medición más estables sin mucho ruido de medición (Paso 5). Finalmente, como se muestra en Paso 6 se procedió a seleccionar el lugar de medición que corresponde al elemento que nos encontramos evaluando.

Todo este procedimiento que se acabó de explicar se representa en la Figura 69.

Figura 69. *Configuración de monitoreo de temperatura en tiempo real*



3.7 Ejecución de Campaña Experimental

La campaña experimental corresponde a la etapa en la que se ejecutan los ensayos y pruebas prácticas para recolectar los datos de temperatura, emisiones y consumo de combustible mediante los equipos descritos previamente. Para su desarrollo, fue necesario que el vehículo de estudio se encontrara en adecuadas condiciones mecánicas, con el fin de evitar alteraciones en los resultados obtenidos. A continuación, se describe la campaña experimental a partir de las

características generales de la ruta seleccionada y de la información específica correspondiente a cada uno de sus tramos.

3.7.1 Características de la Ruta Seleccionada

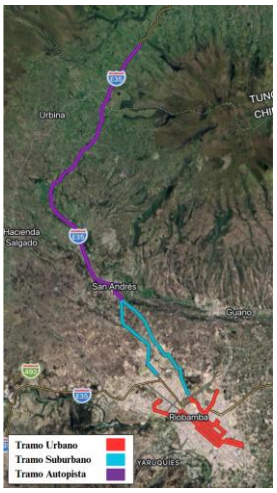
La ruta de ensayo fue seleccionada con el propósito de evaluar el rendimiento del vehículo bajo condiciones reales de circulación. Para garantizar la representatividad y reproducibilidad de los datos, se estableció un recorrido dividido en tres tramos: urbano, suburbano y autopista. Sobre esta ruta se realizaron dos ensayos en días y horarios distintos: uno con operación en condición de mezcla convencional y otro con adición de hidrógeno. La duración aproximada de los recorridos fue de 114 y 105 minutos, respectivamente. Esta metodología permitió registrar el comportamiento del vehículo en condiciones de tráfico similares y comparar su desempeño bajo ambas condiciones de operación.

3.7.2 Ruta de estudio

La ruta integral aplicada en el presente estudio fue diseñada por los autores Barros Merchán & Melo Arteaga (2024). Este recorrido está planteado bajo el enfoque RDE y tiene una distancia total de 56.28 km entre las provincias de Chimborazo y Tungurahua. El recorrido comienza en las instalaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), cerca de la entrada 1 por la avenida Pedro Vicente Maldonado y culmina en la entrada del Museo del Hielero, ubicado en la Panamericana Sur E35.

La ruta está diseñada para realizarse en un tiempo aproximado de 90 a 120 minutos por recorrido completo. Además, tiene importantes diferencias de altitud entre su inicio y su fin, oscilando entre los valores de 2846.4 a 3539.9 msnm. De igual forma, cumple los intervalos de velocidad establecidos para los tramos urbano, suburbano y autopista, los cuales fueron definidos previamente en la Tabla 4. En la Figura 70 se muestra el trazado general de la ruta elegida para la campaña experimental.

Figura 70. *Ruta de estudio en la ciudad de Riobamba*



Cabe señalar que este estudio no busca reproducir un proceso de homologación RDE para la evaluación de emisiones contaminantes y consumo de combustible. Su finalidad es analizar el comportamiento del vehículo bajo un recorrido estructurado con características representativas de tráfico real. La información general de la ruta de prueba se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17. *Información General de la ruta de Prueba*

Característica	Descripción
Posición Inicial	Av. Pedro Vicente Maldonado, ESPOCH
Posición Final	Panamericana Sur E35
Altitud de origen/destino (m s. n. m)	2846.4 / 3539.9
Distancia total del viaje (km)	56.28
Distancia del tramo urbano (km)	18.33
Distancia del tramo rural (km)	18.76
Distancia del tramo autopista (km)	19.19
Diferencia de altitud (m)	693.5

Cada uno de los tramos que conforman la ruta de estudio se describe con mayor detalle en los siguientes apartados.

3.7.2.1 Tramo Urbano

El tramo urbano recorre gran parte de la zona central de la ciudad de Riobamba. A lo largo de este trayecto se atraviesan sectores con presencia de entidades financieras, estaciones de servicio, cuartel de policía y terminal terrestre, además de áreas comerciales y espacios de carácter social, como mercados, centros comerciales, parques y el centro histórico. La Figura 71 muestra el recorrido correspondiente a este tramo.

Figura 71. *Recorrido del Tramo Urbano*



En la Tabla 18 se detallan las calles, avenidas e intersecciones que conforman el trayecto urbano. El recorrido inicia en la ESPOCH, cerca del ingreso 1, y finaliza en el sector de inicio del túnel del aeropuerto. En este tramo, la altitud varía desde 2768 m s. n. m. en el punto de inicio hasta 2854 m s. n. m. en el punto final.

Tabla 18. *Calles Avenidas e Intersecciones que componen el Tramo Urbano*

Descripción del trayecto urbano		
Punto de partida	**Punto de llegada**	**Distancia en km**
Av. Pedro Vicente Maldonado y Av. 11 de Noviembre, a la altura del semáforo de la ESPOCH.	Redondel de la Av. Pedro Vicente Maldonado y Av. La Prensa.	1.1
Redondel de la Av. Pedro Vicente Maldonado y Av. La Prensa, tercera salida.	Redondel del Monumento del Libro.	0.13
Redondel del Monumento del Libro, primera salida.	Redondel de la Av. La Prensa y Av. Daniel León Borja.	0.28
Redondel de la Av. La Prensa y Av. Daniel León Borja, primera salida.	Av. Daniel León Borja y Carabobo.	1.4
Av. Daniel León Borja y Carabobo, girar a la derecha.	José Joaquín de Olmedo y Carabobo	0.16
José Joaquín de Olmedo y Carabobo, girar a la izquierda.	Redondel de la José Joaquín de Olmedo y Av. Juan Félix Proaño.	1.7

Redondel de la José Joaquín de Olmedo y Av. Juan Félix Proaño, segunda salida.	Av. Celso Augusto Rodríguez y Av. Eloy Alfaro.	0.4
Av. Celso Augusto Rodríguez y Av. Eloy Alfaro, girar a la derecha.	Av. Celso Augusto Rodríguez y La Paz.	0.17
Av. Celso Augusto Rodríguez y La Paz, girar a la izquierda.	Antonio Santillán y La Paz.	0.174
Antonio Santillán y La Paz, girar a la derecha.	Av. Edelberto Bonilla Olea y Antonio Santillán.	0.65
Av. Edelberto Bonilla Olea y Antonio Santillán, girar a la derecha.	Av. Celso Augusto Rodríguez y Av. Edelberto Bonilla Olea.	0.14
Av. Celso Augusto Rodríguez y Av. Edelberto Bonilla Olea, girar a la derecha.	Av. Celso Augusto Rodríguez y Puruhá.	1
Av. Celso Augusto Rodríguez y Puruhá, girar a la izquierda.	Primera Constituyente y Puruhá.	0.083
Primera Constituyente y Puruhá, girar a la derecha.	Primera Constituyente y Juan Montalvo.	1.7
Primera Constituyente y Juan Montalvo, girar a la derecha.	Argentinos y Juan Montalvo.	0.25
Argentinos y Juan Montalvo, girar a la derecha.	Argentinos y Bernardo Darquea.	1.5
Argentinos y Bernardo Darquea, girar a la izquierda.	Buenos Aires y Bernardo Darquea.	0.4
Buenos Aires y Bernardo Darquea, girar a la izquierda.	Buenos Aires y Tarqui.	0.7
Buenos Aires y Tarqui, girar a la derecha.	Luz Elisa Borja y Tarqui.	0.21
Luz Elisa Borja y Tarqui, girar a la izquierda.	Luz Elisa Borja y 5 de Junio.	0.089
Luz Elisa Borja y 5 de Junio, girar a la izquierda.	Venezuela y 5 de Junio.	0.35

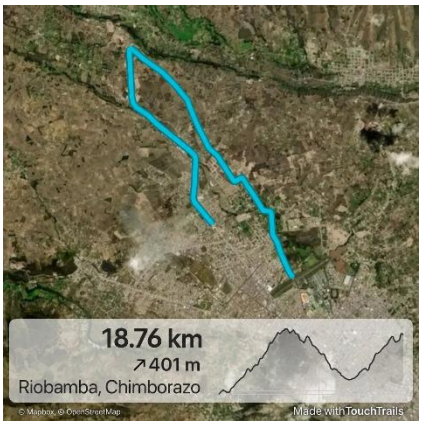
Venezuela y 5 de Junio, girar a la derecha.	Venezuela y Vicente Rocafuerte.	0.6
Venezuela y Vicente Rocafuerte, salir por la Av. Antonio José de Sucre.	Redondel de la Av. Antonio José de Sucre y Av. Héroes de Tapi.	0.35
Redondel de la Av. Antonio José de Sucre y Av. Héroes de Tapi, segunda salida.	Redondel de la Av. Antonio José de Sucre y calle sin nombre, después de pasar el Paseo Shopping Riobamba.	1.68
Redondel de la Av. Antonio José de Sucre y calle sin nombre, girar en U, tomar la tercera salida.	Av. Antonio José de Sucre y entrada al Colegio Héroes de Tapi.	1.6
Av. Antonio José de Sucre y entrada al colegio Héroes de Tapi, girar a la derecha.	Av. Héroes de Tapi y entrada al colegio Héroes de Tapi.	0.12
Av. Héroes de Tapi y entrada al colegio Héroes de Tapi, girar a la derecha.	Redondel de la Av. La Prensa y Av. Bicentenario.	1.2
Redondel de la Av. La Prensa y Av. Bicentenario, tomar la primera salida.	Av. Bicentenario hasta el inicio del túnel del aeropuerto.	0.19

Tomado de: (Barros Merchán & Melo Arteaga, 2024)

3.7.2.2 Tramo Suburbano

El tramo suburbano, también denominado rural, inicia en el punto donde concluye el recorrido urbano y continúa por una vía de dos carriles de circulación, utilizada con frecuencia por vehículos pesados que ingresan y salen de la ciudad. Este trayecto permite representar una condición de conducción con menor interferencia de tráfico y con velocidades más estables. A lo largo de este segmento, la altitud pasa de 2854 m s. n. m. en el punto inicial a 3063 m s. n. m. en el punto final. La Figura 72 presenta el trazado completo de este tramo.

Figura 72. *Recorrido del Tramo Suburbano*



En la Tabla 19 se describen las principales vías e intersecciones que forman parte del recorrido suburbano. Este trayecto comienza en el sector de inicio del túnel del aeropuerto y finaliza en la intersección de la Panamericana Sur E35, a la altura del semáforo del nuevo acceso a la ciudad de Riobamba.

Tabla 19. *Calles Avenidas e Intersecciones que componen el Tramo Sub-urbano*

Descripción del trayecto rural		
Punto de partida	**Punto de llegada**	**Distancia (km)**
Av. Bicentenario desde el inicio del túnel del aeropuerto.	Redondel de la Av. Monseñor Leónidas Proaño.	1.4
Redondel de la Av. Monseñor Leónidas Proaño, segunda salida.	Panamericana sur E35, intersección con el nuevo acceso a la ciudad de Riobamba. En el semáforo.	6.46
Panamericana sur E35, intersección con el nuevo acceso a la ciudad de Riobamba. En el semáforo girar a la izquierda.	Panamericana sur E35, hasta la estación de servicio PyS SUPERTAPI.	5.45
Estación de servicio PyS SUPERTAPI, girar en U para volver a salir de la ciudad de Riobamba.	Panamericana sur E35, intersección con el nuevo acceso a la ciudad de Riobamba. En el semáforo.	5.45

Tomado de: (Barros Merchán & Melo Arteaga, 2024)

3.7.2.3 Tramo Autopista

El tramo autopista se desarrolló sobre la Panamericana Sur E35, desde la intersección ubicada en el nuevo acceso a la ciudad de Riobamba, en dirección hacia Ambato. Este segmento permite mantener velocidades superiores a los 90 km/h con un número reducido de detenciones. La Figura 73 muestra el recorrido correspondiente a este tramo.

Figura 73. *Recorrido del Tramo Autopista*



En la Tabla 20 se presentan las principales vías e intersecciones incluidas en este trayecto, el cual finaliza en el sector de ingreso al Museo del Hielero. De manera complementaria, este tramo presenta una variación de altitud entre 3063 y 3646 m s. n. m.

Tabla 20. *Calles Avenidas e Intersecciones que componen el Tramo Autopista*

Descripción del trayecto autopista		
Punto de partida	**Punto de llegada**	**Distancia (km)**
Panamericana sur E35, intersección con el nuevo acceso a la ciudad de Riobamba. En el semáforo, con dirección al peaje de San Andrés.	Peaje de San Andrés.	4.5
Estación de Peaje de San Andrés.	Ingreso al Museo del Hielero.	11.8
Entrada al Museo del Hielero.	Avanzar en la dirección de la Panamericana Sur E35 2.89 km más para terminar el circuito.	2.89

Tomado de: (Barros Merchán & Melo Arteaga, 2024)

3.7.3 Ensayo de termográfia

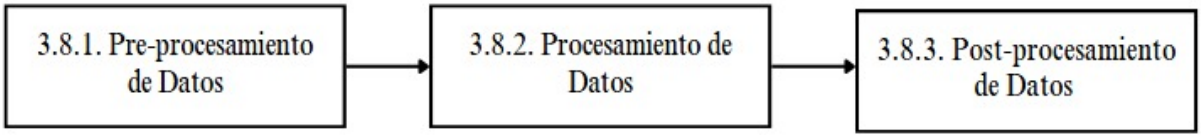
Para la ejecución del ensayo termográfico se utilizó la cámara TOPDON TC001, la cual fue conectada a un dispositivo móvil y configurada mediante la aplicación TopInfrared, conforme al procedimiento descrito en las secciones 3.6.4.1 y 3.6.4.2. Una vez que se terminó de configurar el sistema de medición, se procedió a poner en marcha el vehículo sin suministro de hidrógeno, y se esperó hasta que el vehículo alcanzara su temperatura normal de operación, condición que se requiere para iniciar la adquisición de las imágenes termográficas.

La primera evaluación se realizó con el vehículo detenido y el motor funcionando en vacío. En esta condición, las mediciones se hicieron primero en el colector de escape y luego en el convertidor catalítico. Se realizó una segunda evaluación con el vehículo detenido a 3000 RPM, manteniendo el mismo orden y forma de medición. Terminadas las evaluaciones correspondientes a la condición sin hidrógeno, el procedimiento se repitió bajo idénticas condiciones de operación incorporando el suministro de hidrógeno para comparar el comportamiento térmico entre ambos escenarios.

3.8 Procesamiento de datos

El análisis de datos corresponde a la etapa en la que la información recolectada por los equipos de medición se transforma en resultados interpretables. Este proceso se estructuró en tres fases secuenciales: preprocesamiento, orientado a la limpieza, filtrado y sincronización de señales; procesamiento, destinado a la ejecución de cálculos sobre los datos depurados; y postprocesamiento, enfocado en la validación final, la representación gráfica y la comparación de resultados con los objetivos de la investigación. La Figura 74 muestra el esquema general de las fases consideradas en esta etapa.

Figura 74. *Fases de procesamiento de datos*

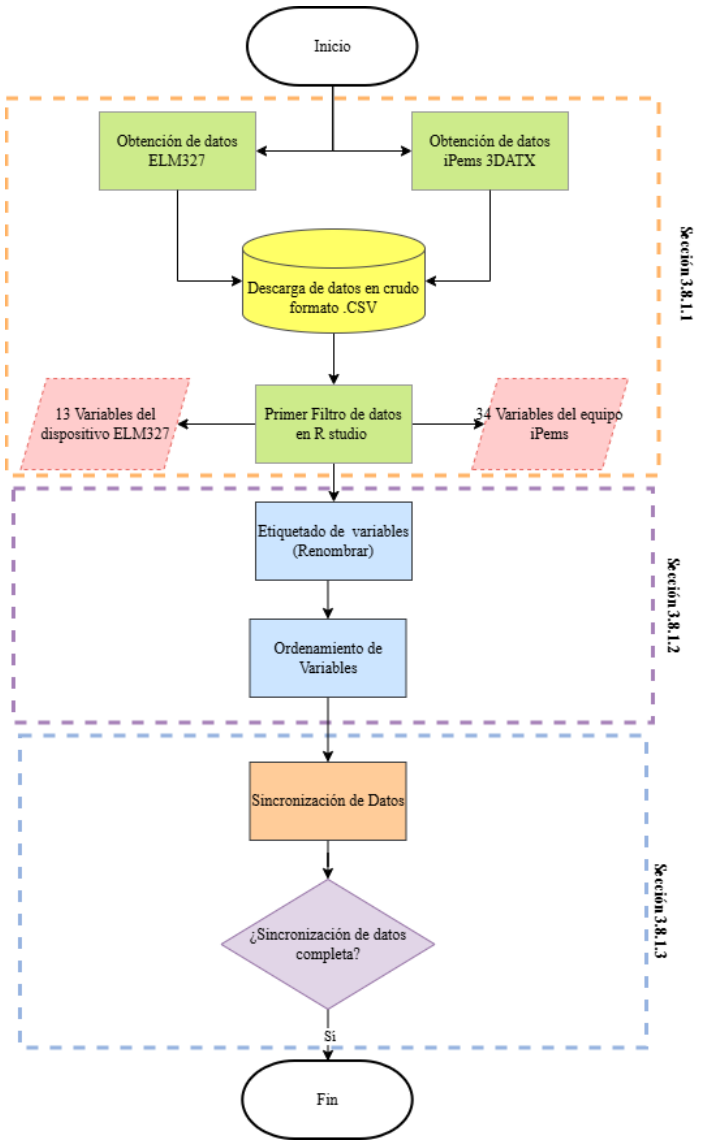


3.8.1 Pre-procesamiento de datos

El preprocesamiento de datos corresponde a la etapa en la que se prepararon los registros obtenidos durante la campaña experimental para su posterior análisis. Este proceso se desarrolló principalmente en el entorno RStudio e incluyó tres actividades principales. En la Sección 3.8.1.1

se describe la obtención y descarga de los archivos generados por los equipos registradores, junto con el primer filtrado de limpieza. En la Sección 3.8.1.2 se presenta la organización y el etiquetado de los datos. Finalmente, en la Sección 3.8.1.3 se detalla la sincronización temporal de los registros generados por los distintos equipos en cada escenario de ensayo. La Figura 75 presenta el flujo de trabajo seguido durante esta fase.

Figura 75. *Diagrama de flujo del pre-procesamiento de datos*



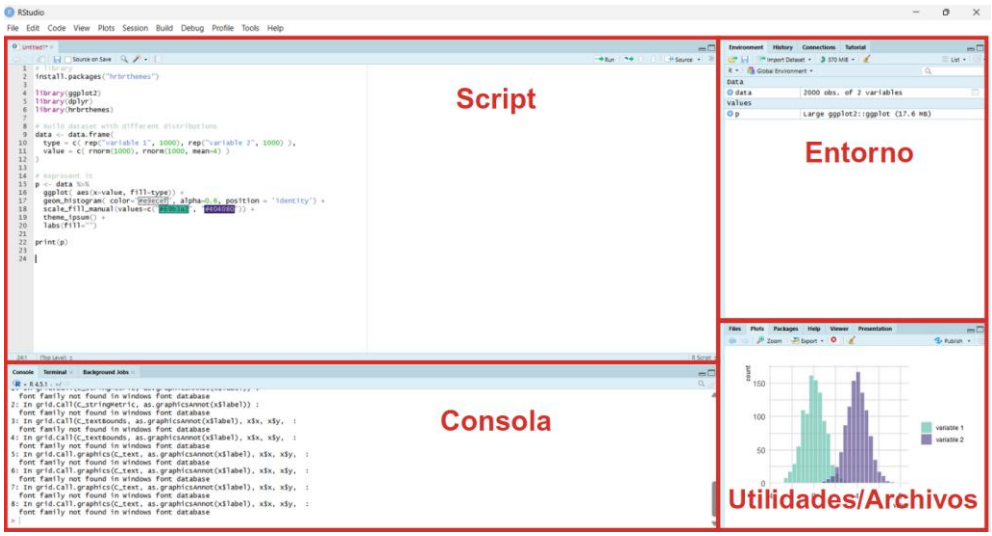
3.8.1.1 Obtención y descarga de datos

En esta etapa se realizó la descarga de los archivos generados por los equipos utilizados durante la campaña experimental. Los registros correspondientes a los parámetros de operación

del motor, obtenidos de los registradores ELM327 y OBD Vgate vLinker, no requirieron decodificación adicional, ya que este proceso se ejecuta automáticamente mediante la aplicación Torque Pro y el software FLEXstudio. De igual forma, los datos generados por el equipo PEMS fueron exportados directamente en formato CSV desde FLEXstudio.

Una vez almacenados los archivos que contenían información de operación del motor, posición, meteorología, emisiones y flujo de combustible, se inició la limpieza de datos mediante programación en lenguaje R en el entorno RStudio. Esta herramienta permitió manipular y depurar los registros de manera ordenada. La Figura 76 muestra la interfaz de trabajo empleada durante esta etapa.

Figura 76. *Interfaz de R Studio*



El proceso de limpieza comenzó con la selección de las variables de interés, debido a que cada registrador generó una cantidad considerable de registros, muchos de los cuales no eran necesarios para el estudio. A partir de los reportes del equipo PEMS se obtuvieron 64 variables, de las cuales se seleccionaron 33. De manera similar, de los reportes generados por el dispositivo ELM327 se obtuvieron 54 variables, de las cuales se eligieron 13 que complementaron la información del PEMS. Las variables filtradas para cada equipo se presentan en la Tabla 21 y Tabla 22 de la Sección 3.8.1.2, junto con su respectivo etiquetado.

3.8.1.2 Organización y etiquetado de datos

Una vez realizado el filtrado inicial, se procedió a renombrar las variables seleccionadas mediante la función *rename()* de la librería *dplyr*, con el fin de estandarizar los nombres y facilitar su manipulación en etapas posteriores. Este procedimiento se aplicó de forma individual a cada archivo CSV generado por los distintos equipos.

De manera paralela, se organizó las variables mediante una secuencia dentro de cada conjunto de datos. En los registros del equipo PEMS se estableció el siguiente orden: tiempo, emisiones de gases, variables meteorológicas, datos GPS y parámetros de operación del motor. En el caso del dispositivo ELM327 con Torque Pro, la organización se realizó en el orden: tiempo, datos GPS y variables de operación del motor. Con ello fue posible trasladar las variables de interés desde el data frame original hacia un nuevo data frame estructurado.

Este procedimiento puede resumirse mediante el concepto de codebook, eutilizado para describir el significado de cada variable, sus etiquetas y las unidades correspondientes dentro de una base de datos. La Tabla 21 presenta el codebook utilizado para organizar los registros obtenidos mediante el equipo PEMS.

Tabla 21. *Codebook iPems*

N°	Variable	Etiquetado de variable	Unidad
1	Timestamp	TIMESTAMP	ms
2	DateTime	TIEMPO	AAAA-MM-DD HH:MM:SS
3	Bag #	BOLSA	-
4	PN23 (#/cm3)	PN23	#/cm3
5	PN10 (#/cm3)	PN10	#/cm3
6	PM (µg/m3)	PM	µg/m3
7	LDSA (µm2/cm3)	LDSA	µm2/cm3
8	NO2 (ppm)	NO2	ppm
9	NO (ppm)	NO	ppm
10	CO2 (%)	CO2	%
11	CO (%)	CO	%
12	HC (ppm)	HC	ppm
13	O2 (%)	O2	%
14	NO2 (Vraw)	NO2 VOLT	V
15	NO (Vraw)	NO_VOLT	V
16	CO2 (Raw)	CO2_RAW	-
17	CO (Raw)	CO_RAW	-
18	HC (Raw)	HC_RAW	-
19	O2 (Raw)	O2_RAW	-

20	Amb_Temp (degC)	TEMP_AMB	°C
21	Amb_Pressure (hPa)	PRES_AMB_HPA	hPa
22	Amb_Pressure (kPa)	PRES_AMB_KPA	kPa
23	Amb_Rel_Humidity (%)	HUM_REL	%
24	Amb_Abs_Humidity (g/m3)	HUM_ABS_G	g/m3
25	Amb_Abs_Humidity (%)	HUM_ABS_PCT	%
26	Amb_H20_Density (g/kg)	DENSIDAD_H2O	g/kg
27	Latitude (deg)	LATITUD	°
28	Longitude (deg)	LONGITUD	°
29	Altitude (m)	ALTITUD	m
30	Speed (km/h)	VEL_GPS	km/h
31	OBD_Intake_MAP (kPa)	MAP	kPa
32	OBD_Engine_RPM (rpm)	RPM	rpm
33	OBD_Vehicle_Speed (km/h)	VEL_OBD	km/h
34	OBD_Abs_Throttle_Pos (%)	TPS	%

De igual manera, la Tabla 22 presenta el codebook utilizado para organizar los registros obtenidos mediante el datalogger ELM327 y la aplicación Torque Pro.

Tabla 22. *Codebook Torque Pro*

N°	Variable	Etiquetado de variable	Unidad
1	GPS Time	TIEMPO_GPS	-
2	Device Time	TIEMPO_DISP	AAAA-MM-DD HH:MM:SS
3	Longitude	LON	°
4	Latitude	LAT	°
5	GPS Speed (Meters/second)	VEL_GPS_MS	m/s
6	Altitude	ALT	m
7	Engine Load(%)	CARGA_MOTOR	%
8	Trip Distance(km)	DISTANCIA_VIAJE	km
9	Torque(Nm)	TORQUE	Nm
10	Engine RPM(rpm)	RPM	rpm
11	Throttle Position(Manifold)(%)	TPS	%
12	Speed (GPS)(km/h)	VEL_GPS_KMH	km/h
13	Speed (OBD)(km/h)	VEL_OBD	km/h

En conjunto, después de aplicar la metodología del Codebook se obtuvieron un total de 47 variables listas para ser sincronizadas.

3.8.1.3 Sincronización de datos

Para la sincronización de datos, se identificaron los registros generados por cada equipo en los dos escenarios de ensayo: sin adición de hidrógeno y con adición de hidrógeno. Posteriormente,

ambos conjuntos se alinearon en función del tiempo y del número de filas, obteniéndose 6790 y 6253 registros para cada escenario, respectivamente. Estos valores corresponden al número de segundos que conforman la duración total del recorrido en la ruta de prueba.

Para este proceso se utilizó la Función de Correlación Cruzada (Cross-Correlation Function, CCF), la cual permite medir la similitud entre dos señales en función del desfase temporal aplicado a una de ellas (Konstantinovsky, 2024). Su aplicación permitió identificar el punto en el que la similitud entre ambas series era máxima y, por lo tanto, determinar el desfase necesario para su alineación temporal. La Figura 77 muestra el código utilizado para la aplicación de esta función en la sincronización de los datos.

Figura 77. *Código de sincronización de datos*

```r
# 3.5 Sincronización automática mediante CCF
Sincronizar_Datos <- function(df_PEMS_clean, df_TorquePro_clean) {

  n_filas <- min(nrow(df_PEMS_clean), nrow(df_TorquePro_clean))

  ccf_calc <- ccf(
    df_PEMS_clean$RPM[1:n_filas],
    df_TorquePro_clean$RPM[1:n_filas],
    lag.max = 100,
    plot = TRUE
  )

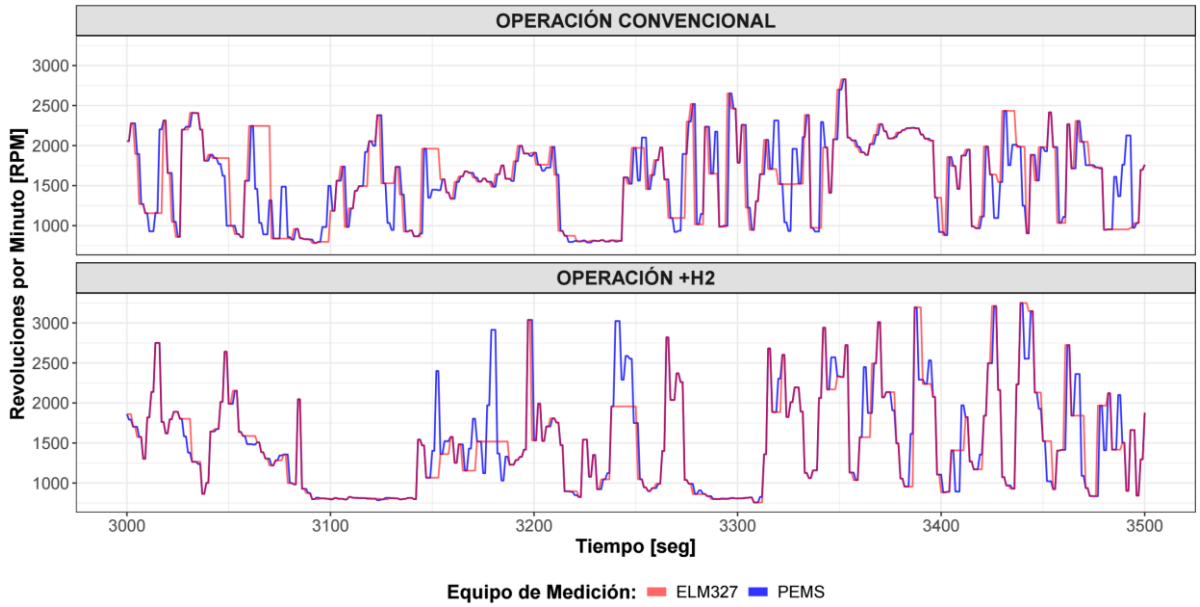
  desfase <- ccf_calc$lag[which.max(ccf_calc$acf)]

  df_PEMS_clean %>%
    inner_join(
      df_TorquePro_clean %>%
        mutate(TIEMPO_S = TIEMPO_S + desfase),
      by = c("ENSAYO", "CIUDAD", "TIEMPO_S"),
      suffix = c("_PEMS", "_ELM327")
    ) %>%
    arrange(TIEMPO_S)
}
```

Una vez determinado el desfase temporal, se utilizó la función *inner_join()* de la librería *dplyr* para combinar los dos *data frames* correspondientes a cada escenario de ensayo, tomando como referencia la variable tiempo. Esta función permitió conservar únicamente las filas con

coincidencias en ambos conjuntos de datos. Después de aplicar esta unión y considerar el desfase obtenido mediante la CCF, los registros fueron integrados en un solo *data frame* manteniendo el orden cronológico. La Figura 78 presenta la comprobación gráfica de la sincronización realizada.

Figura 78. *Gráfica de sincronización de datos RPM vs Tiempo(s)*



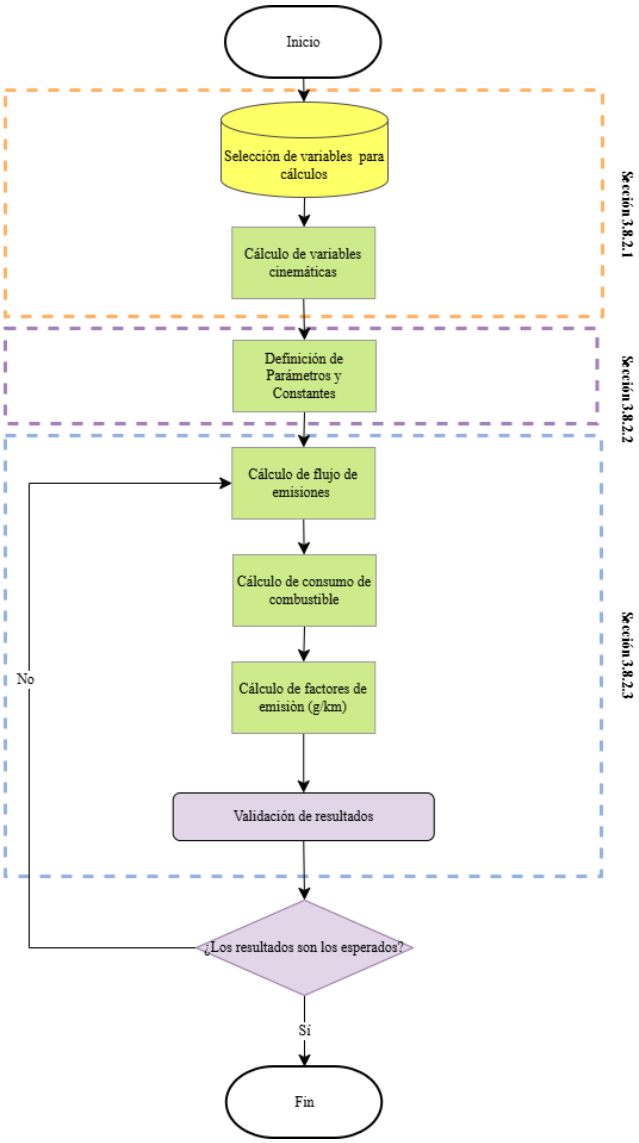
3.8.2 Procesamiento de datos

La fase de procesamiento de datos corresponde a la etapa en la que se realizaron los cálculos de las variables previamente seleccionadas durante el preprocesamiento. Estos cálculos se desarrollaron en función de las variables de estudio definidas para la investigación.

En la Figura 79 se presenta el diagrama de flujo de esta fase, organizado en tres secciones principales. En la Sección 3.8.2.1 se efectuó la selección de las variables necesarias para los cálculos y se desarrollaron los cálculos cinemáticos del vehículo. En la Sección 3.8.2.2 se definieron los parámetros y constantes del motor, las propiedades termodinámicas y del combustible, así como los pesos moleculares de los gases de escape.

Finalmente, en la Sección 3.8.2.3 se describen los procedimientos empleados para calcular el flujo de gases de escape y de emisiones a partir de los pesos moleculares; además, con base en estos resultados, se determinaron el consumo de combustible y los factores de emisión en función de la distancia y de la energía.

Figura 79. *Diagrama de flujo del procesamiento de datos*



3.8.2.1 Selección de variables y cálculos cinemáticos

En este apartado se realizó la selección de las variables más útiles para el desarrollo de los cálculos cinemáticos, a partir de la base de datos previamente sincronizada durante el preprocesamiento. Entre las principales variables analizadas se encuentra la ***aceleración instantánea***, determinada mediante la Ec. (10).

$$a_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta t} \ [m/s^2] \qquad \textbf{Ec. (10)}$$

En esta ecuación, a_i representa la aceleración en el instante i. La variable v_i corresponde a la velocidad actual del vehículo, mientras que v_{i-1} representa la velocidad registrada en el instante anterior. Por su parte, Δt_i es el ***intervalo de tiempo transcurrido*** entre ambas mediciones. Este intervalo se determina mediante la Ec. (11).

$$\Delta t = t_i - t_{i-1} \ [s] \qquad \textbf{Ec. (11)}$$

Aquí, Δt_irepresenta el intervalo de tiempo entre dos registros consecutivos. La variable t_i corresponde al tiempo actual y t_{i-1} al tiempo del registro anterior, ambos expresados en segundos. Esta diferencia permite establecer la base temporal para los cálculos de aceleración y distancia.

Por otra parte, la ***distancia instantánea recorrida*** se determinó mediante la Ec. (12).

$$d_i = v_i \cdot \Delta t_i \ [m] \qquad \textbf{Ec. (12)}$$

Donde d_i corresponde a la distancia recorrida durante el intervalo i. La variable v_i es la velocidad del vehículo en ese instante, expresada en metros por segundo, y Δt_i corresponde al intervalo de tiempo asociado, en segundos. El producto de ambas magnitudes permite estimar la distancia recorrida en dicho intervalo.

A partir de las distancias parciales obtenidas, se determinó la ***distancia total acumulada*** durante el recorrido de la ruta de ensayo, como se indica en la Ec. (13)

$$D = \sum_{k=1}^{i} d_i \ [km] \qquad \textbf{Ec. (13)}$$

En este caso, D representa la distancia acumulada hasta el instante i, mientras que d_k corresponde a cada distancia parcial registrada en los diferentes intervalos de medición. La sumatoria indica que la distancia total se obtiene mediante la acumulación sucesiva de todas las distancias parciales.

Con base en estos cálculos cinemáticos, también fue posible determinar el ***porcentaje de permanencia del vehículo*** en los distintos modos de operación. Este parámetro expresa la proporción del tiempo total de la prueba durante la cual el vehículo permaneció en un modo específico, como aceleración, crucero, desaceleración o ralentí. Su cálculo se presenta en la Ec. (14).

$$E_R = \sum_{i=1}^{n} \frac{T_{Mi}}{T_{Ti}} * 100 \qquad \textbf{Ec. (14)}$$

En la cual, E_R representa el porcentaje de permanencia en un determinado modo de operación. La variable T_{Mi}corresponde al tiempo de permanencia en el modo evaluado, mientras que T_T representa el tiempo total de la prueba. La multiplicación por 100 permite expresar el resultado en porcentaje.

Finalmente, con el propósito de caracterizar la intensidad de las aceleraciones desarrolladas durante el recorrido, se determinó la aceleración relativa positiva (RPA), parámetro empleado en los ensayos RDE para evaluar la dinámica de conducción a partir de la relación entre la velocidad, las aceleraciones positivas y la distancia recorrida. Su cálculo se presenta en la Ec. (15).

$$RPA = \frac{\sum(v \cdot a_{pos})}{\sum v \cdot \Delta t} \qquad \textbf{Ec. (15)}$$

Aquí se representa RPA como la aceleración relativa positiva del recorrido. La variable v corresponde a la velocidad instantánea del vehículo, mientras que a_{pos} representa la aceleración instantánea considerando únicamente los intervalos en los que esta es positiva. La variable Δt corresponde al intervalo de tiempo entre mediciones. La sumatoria del numerador integra el producto de la velocidad y la aceleración positiva durante todo el recorrido, mientras que la sumatoria del denominador representa la distancia total recorrida. Esta relación permite cuantificar la intensidad de las aceleraciones positivas experimentadas por el vehículo durante el ensayo.

3.8.2.2 Definición de Parámetros y Constantes

Como parte del procesamiento de datos, fue necesario definir los parámetros y constantes empleados en el cálculo de flujos, consumo de combustible y emisiones. Entre ellos se consideraron constantes físicas del motor, propiedades termodinámicas y del combustible, así como los pesos moleculares de los gases contaminantes y de la masa molar del gas de escape. Estos últimos valores se establecieron con base en los estándares internacionales de la EPA 40 CFR 1065.640. La Tabla 23 presenta el conjunto de parámetros y constantes utilizados en esta fase.

Tabla 23. *Parámetros y Constantes del estudio*

Variable	Magnitud	Unidad
Constantes físicas del motor [a]		
Cilindraje	1.5	L
Volumen de desplazamiento	0.015	m^3
Potencia máxima	83	kW
Par motor máximo	128	Nm
Constantes Termodinámicas [b]		
Relación Estequiométrica (AFR)	14.7	-
Constante del aire	287	J/(kg·K)
Constantes de combustible (Extra) [c]		
Relación Hidrógeno/Carbono [H/C]	2.25	-
Densidad	0.730	kg/L
Poder Calorífico Inferior	46.3	kJ/g
Pesos Moleculares [b]		
CO2	0.04401	kg/mol
CO	0.02801	kg/mol
NO	0.03001	kg/mol
NO2	0.04601	kg/mol
HC Propano	0.04409	kg/mol
HC Hexano	0.08618	kg/mol
Masa Molar Aparente del gas de Escape [b]		
Base seca	0.02896559	g/mol
Base Húmeda	0.0287805	g/mol

Tomado de: (Chevrolet, 2017a; United States Federal Fegulations, 2026; Petroecuador, 2026)

3.8.2.3 Cálculo de flujo de emisiones y consumo de combustible

Una vez definidos los parámetros y constantes necesarios, se procedió al cálculo del flujo de gases de escape, debido a que el equipo PEMS no dispone de un medidor físico para esta variable. A partir de este valor fue posible determinar el flujo másico de cada contaminante, así como el consumo de combustible y los factores de emisión del vehículo y del motor.

3.8.2.3.1 Cálculo de flujo másico de aire

El primer paso consistió en estimar la ***densidad del aire de admisión*** mediante la ley de los gases ideales, expresada en la Ec. (16):

$$\rho_{aire} = \frac{P}{R \cdot T} \qquad \textbf{Ec. (16)}$$

En esta ecuación, ρ_{air} corresponde a la densidad del aire, P es la presión absoluta en el múltiple de admisión, R representa la constante específica del aire y T es la temperatura del aire de admisión. La relación entre estas variables permite obtener la densidad del aire en kg/m³.

A continuación, se estimó el ***caudal volumétrico*** de aire que ingresa al motor, para lo cual se empleó la siguiente Ec. (17):

$$Q_{aire} = \frac{V_d \cdot RPM}{120} \cdot VE \qquad \textbf{Ec. (17)}$$

Aquí, Q_{aire} representa el caudal volumétrico de aire, V_d corresponde a la cilindrada del motor, RPM es el régimen de giro y *VE* es la eficiencia volumétrica. Esta última expresa la capacidad real de llenado del cilindro respecto a su capacidad teórica.

Conviene señalar que el valor de la ***eficiencia volumétrica*** suele obtenerse a partir de mapas de rendimiento almacenados en la ECU del vehículo. Sin embargo, la extracción de esta información requiere equipos ajenos al desarrollo del presente trabajo. Por esta razón, *VE* se estimó mediante el modelo empírico speed-density, en función de la presión en el múltiple de admisión y del régimen del motor, como se muestra a continuación en la Ec. (18):

$$VE = 0.30 + 0.60\left(\frac{MAP}{P_{amb}}\right) - 0.05\left(\frac{|\ RPM - 3500\ |}{3500}\right) \qquad \textbf{Ec. (18)}$$

En esta relación, MAP es la presión absoluta en el múltiple de admisión y P_{amb} a la presión atmosférica, ambas expresadas en kPa, mientras que RPM corresponde al régimen del motor en rev/min. El valor 0.30 corresponde a una eficiencia volumétrica base en ralentí, mientras que 0.60 considera el efecto de la carga del motor y 0.05 incorpora una penalización cuando el régimen se aleja de 3500 rpm.

Con la densidad del aire y el caudal volumétrico ya definidos, se obtuvo ***el flujo másico de aire*** a partir del producto de ambas magnitudes mediante la Ec. (19):

$$\dot{m}_{aire} = \rho_{aire} \cdot Q_{aire} \qquad \textbf{Ec. (19)}$$

En este caso, $\dot{m}_{aire}$ representa el flujo másico de aire en kg/s, mientras que ρ_{aire} y Q_{ire} corresponden a la densidad y al caudal volumétrico del aire, respectivamente.

3.8.2.3.2 Flujo másico de combustible

Una vez determinado el flujo másico de aire, se calculó el flujo másico de combustible consumido, ya que este valor resulta necesario para estimar posteriormente el flujo másico de gases de escape. Para ello se utilizó la siguiente Ec. (20):

$$\dot{m}_{comb} = \frac{\dot{m}_{aire}}{AFR_{st} \cdot \lambda} \qquad \textbf{Ec. (20)}$$

Representado $\dot{m}_{comb}$ como el flujo másico de combustible, AFR_{st} como la relación aire-combustible estequiométrica y λ como el factor de proporción de aire y combustible en la mezcla de la combustión. Este último fue obtenido directamente a partir de los registros generados por los dispositivos ELM327 y Vgate vLinker.

3.8.2.3.3 Flujo másico total de los gases de escape

El flujo másico total de los gases de escape se estimó a partir de la suma del flujo másico de aire y del flujo másico de combustible consumido, de acuerdo con la siguiente Ec. (21):

$$\dot{m}_{escape} = \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{comb} \qquad \textbf{Ec. (21)}$$

E término $\dot{m}_{escape}$ representa el flujo másico total de la mezcla de gases que sale por el escape, en kg/s. Este valor sirvió de base para determinar el flujo molar del gas de escape y, posteriormente, el flujo másico de cada contaminante analizado.

3.8.2.3.4 Flujo molar total de los gases de escape

El flujo molar representa la cantidad de sustancia que atraviesa una sección por unidad de tiempo. Su cálculo se realizó a partir del flujo másico total de los gases de escape y de la masa molar aparente de la mezcla, según la Ec. (22):

$$\dot{n}_{escape} = \frac{\dot{m}_{escape}}{PM_{escape}} \qquad \textbf{Ec. (22)}$$

Aquí, $\dot{n}_{escape}$ corresponde al flujo molar total de los gases de escape, en mol/s de gases de escape y PM_{escape} al peso molecular promedio del gas de escape en kg/mol. Este resultado permitió convertir las concentraciones volumétricas medidas por el equipo en tasas másicas de emisión.

3.8.2.3.5 Conversión de concentración volumétrica a flujo másico

Esta etapa fue una de las más relevantes del procesamiento, debido a que el equipo iPEMS entrega los resultados en unidades de concentración volumétrica, las cuales debieron transformarse a flujo másico para calcular los factores de emisión del vehículo. Para ello se empleó la Ec. (23) propuesta por la EPA en el documento 40 CFR Parte 1065:

$$\dot{m}_i = x_i \cdot \dot{n}_{escape} \cdot PM_i \qquad \textbf{Ec. (23)}$$

En esta relación $\dot{m}_i$ corresponde el flujo másico del contaminante, x_i representa su fracción molar y PM_i indica el peso molecular del gas analizado. Estas variables mantienen una relación directamente proporcional, lo que permite convertir la concentración medida en una tasa másica expresada en g/s. La aplicación de esta ecuación a cada uno de los gases analizados se presenta en la Tabla 24.

Tabla 24. *Ecuaciones de flujo másico por gas de escape*

Gas de escape	Ecuación
CO_2	$\dot{m}_{CO_2} = \left(\frac{CO_2}{100}\right) \cdot \dot{n}_{escape} \cdot PM_{CO_2}$
CO	$\dot{m}_{CO} = \left(\frac{CO}{100}\right) \cdot \dot{n}_{escape} \cdot PM_{CO}$
HC	$\dot{m}_{HC} = \left(\frac{HC}{10^6}\right) \cdot \dot{n}_{escape} \cdot PM_{HC}$
NO	$\dot{m}_{NO} = \left(\frac{NO}{10^6}\right) \cdot \dot{n}_{escape} \cdot PM_{NO}$
NO_2	$\dot{m}_{NO_2} = \left(\frac{NO_2}{10^6}\right) \cdot \dot{n}_{escape} \cdot PM_{NO_2}$

3.8.2.3.6 Cálculo de emisiones de CO_2 mediante la química de la combustión

Como método adicional de cálculo, la tasa de emisión de CO_2 puede determinarse a partir de la composición química del combustible y de la relación estequiométrica de la combustión. Esta metodología no fue empleada para obtener los resultados finales de los factores de emisión del presente estudio, ya que para este propósito se utilizaron los resultados de concentración registrados por el sistema iPEMS y transformados mediante la Ec. (24). Su aplicación se considera únicamente para realizar posteriormente una comparación entre ambos métodos de cálculo.

La expresión empleada se presenta en la Ec. (24):

$$\frac{kg\ CO_2}{kg\ combustible} = \frac{44}{12 + \frac{H}{C}} \qquad \textbf{Ec. (24)}$$

Este procedimiento considera que la regulación de carga en los MEP es cuantitativa y que la combustión se desarrolla bajo una relación estequiométrica. La relación (H/C) representa la proporción entre hidrógeno y carbono del combustible. Para la gasolina, cuya formulación química es C_8H_{18}, esta relación corresponde a 2.25. A partir de esta relación se determina la cantidad de CO_2 generada por unidad de masa de combustible consumido.

La tasa de emisión de CO_2 se obtiene posteriormente al relacionar este resultado con el flujo instantáneo de combustible, como se presenta en la Ec. (25).

$$Tasa\ CO_2\ [g/s] = \frac{44}{12+\frac{H}{C}} * Flujo\ combustible\ \text{(g/s)} \qquad \textbf{Ec. (25)}$$

3.8.2.3.7 Factores de emisión del vehículo

Para evaluar las emisiones y el consumo de combustible a nivel del vehículo, los resultados se expresaron en función de la distancia recorrida. De este modo, las emisiones se presentaron en g/km y el consumo de combustible en L/100 km.

En primer lugar, se calculó ***la masa total emitida de cada contaminante*** mediante la sumatoria del flujo másico a lo largo del tiempo, representada en la Ec. (26):

$$M_T = \sum(\dot{m}_i \cdot dt) \qquad \textbf{Ec. (26)}$$

Donde, M_i representa la masa total emitida del contaminante y dt el intervalo de tiempo entre registros. Una vez obtenida esta magnitud, el ***factor de emisión vehicular*** se calculó al dividir la masa total emitida para la distancia recorrida mostrada en la Ec. (27) :

$$FE = \frac{M_T}{Distancia} \qquad \textbf{Ec. (27)}$$

En esta expresión, FE_i corresponde al factor de emisión del contaminante en g/km, M_i es la masa total emitida y $Distancia$ representa el recorrido total del ensayo en kilómetros.

Por otra parte, para determinar el ***consumo de combustible*** fue necesario obtener primero el volumen total consumido, a partir de la relación entre la masa de combustible y su densidad, mostrada en la Ec. (28):

$$V_{comb} = \frac{M_{comb}}{\rho_{comb}} \qquad \textbf{Ec. (28)}$$

Aquí, V_{comb} representa el volumen de combustible consumido, M_{comb} es la masa total de combustible y ρ_{comb} corresponde a la densidad del combustible. Con este resultado se calculó el consumo en litros por cada 100 kilómetros mediante la Ec. (29) siguiente:

$$Factor\ Consumo = \frac{V_{comb}}{Distancia} \cdot 100 \qquad \textbf{Ec. (29)}$$

De esta manera se obtuvo una medida comparable del consumo de combustible a nivel vehicular.

3.8.2.3.8 Factores de emisión del motor

Además del análisis a nivel del vehículo, las emisiones y el consumo también se expresaron en función de la energía generada por el motor. Esto permitió obtener factores de emisión específicos al freno y consumo específico de combustible al freno en g/kWh, así como la eficiencia térmica al freno en porcentaje.

Para iniciar estos cálculos, se utilizó la variable de carga del motor registrada por el ELM327. Dado que esta señal se obtiene en porcentaje, primero fue necesario expresarla como fracción mediante la siguiente Ec. (30):

$$\phi_i = \frac{Engine\ load_i}{100} \qquad \textbf{Ec. (30)}$$

En esta ecuación, ϕ_i representa la fracción de carga del motor en el instante i, mientras que $Engine\ load_i$ corresponde a la carga expresada en porcentaje. Esta relación permitió estimar la potencia y el torque efectivos.

La ***potencia efectiva*** del motor se obtuvo multiplicando la fracción de carga por la potencia máxima del motor, representada en la Ec. (31):

$$P_{e,i} = \phi_i \cdot P_{\max} \qquad \textbf{Ec. (31)}$$

Aquí se expresa $P_{e,i}$ como la potencia efectiva en kW. La variable ϕ_i representa la fracción de carga del motor y $P_{\max}$ corresponde a la potencia máxima del motor. Bajo el mismo criterio, el torque efectivo se estimó mediante la Ec. (32):

$$T_{e,i} = \phi_i \cdot T_{\max} \qquad \textbf{Ec. (32)}$$

La variable $T_{e,i}$ significa el ***torque efectivo*** del motor en Nm y $T_{\max}$ el torque máximo. Ambas relaciones permiten aproximar el desempeño instantáneo del motor a partir de la carga registrada.

Para continuar con los cálculos energéticos, se determinó la ***potencia térmica*** liberada por la combustión del combustible. Esta magnitud corresponde al calor generado por unidad de tiempo y se obtuvo a partir del flujo másico de combustible y su poder calorífico, representada en la Ec. (33):

$$P_{t,i} = \dot{m}_{f,i} \cdot PCI_f \qquad \textbf{Ec. (33)}$$

Se observa que $P_{t,i}$ representa la potencia térmica en kW, $\dot{m}_{f,i}$ es el flujo másico de combustible en g/s y PC_f el poder calorífico del combustible en kJ/g. Dado que 1 kJ/s equivale a 1 kW, el producto de ambas variables entrega directamente la potencia térmica.

A partir de la potencia efectiva y la potencia térmica, se estimó la ***eficiencia térmica al freno***, que expresa el porcentaje de energía química transformada en trabajo útil en el cigüeñal, mostrada en la Ec. (34):

$$BTE = \frac{P_{e,i}}{P_{t,i}} \cdot 100 \qquad \textbf{Ec. (34)}$$

Aquí, BTE representa la eficiencia térmica al freno en porcentaje. Esta relación muestra qué fracción de la energía suministrada por el combustible se convierte en potencia efectiva.

Otro parámetro de interés fue el ***consumo específico de combustible al freno o BSFC***, que indica la cantidad de combustible requerida para producir una unidad de potencia durante una hora. Su cálculo se realizó con la siguiente Ec. (35):

$$BSFC_i = \frac{3600 \cdot \dot{m}_{f,i}}{P_{e,i}} [g/kWh] \qquad \textbf{Ec. (35)}$$

En la cual, $BSFC_i$ representa el consumo específico de combustible al freno en g/kWh, $\dot{m}_{f,i}$ es el flujo másico de combustible en g/s y $P_{e,i}$ la potencia efectiva en kW. El factor 3600 permite convertir el flujo de combustible de una base temporal en segundos a una base horaria.

Finalmente, se calculó el ***factor de emisión específico al freno*** para cada uno de los contaminantes haciendo uso de la Ec. (36), con el fin de relacionar la masa emitida con la potencia útil desarrollada por el motor:

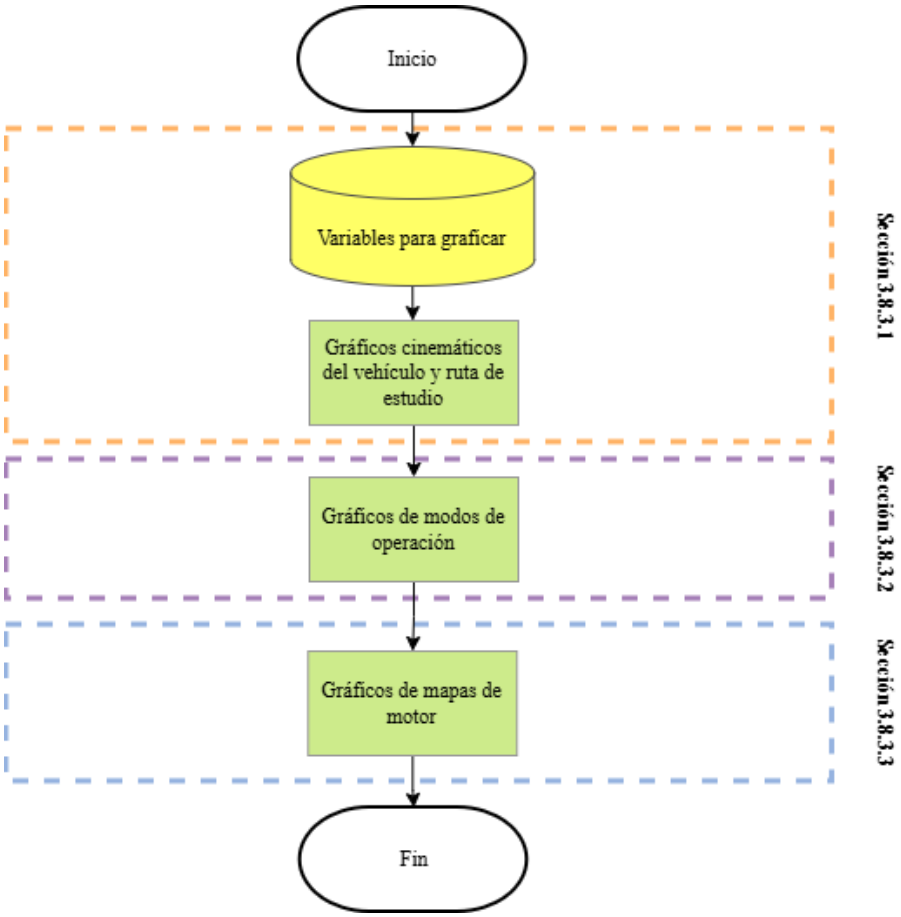
$$FE_i = \frac{3600 \cdot \dot{m}_i}{P_{e,i}} [g/kWh] \qquad \textbf{Ec. (36)}$$

El parámetro FE_i representa el factor de emisión específico al freno en g/kWh, $\dot{m}_i$ corresponde al flujo másico del contaminante y $P_{e,i}$ es la potencia efectiva. El factor 3600 permite convertir nuevamente la tasa másica de una base por segundo a una base por hora.

3.8.3 Post-procesamiento de datos

La etapa de post-procesamiento de datos correspondió a la validación final de los resultados obtenidos, mediante su representación gráfica y su organización para el análisis que se presenta en el capítulo siguiente. En esta fase, los datos ya procesados fueron transformados en recursos visuales que permitieron interpretar con mayor claridad la cinemática de la ruta y del vehículo, los modos de operación, la variación de las emisiones y el consumo de combustible, así como el comportamiento del motor en distintas condiciones de carga y régimen. La Figura 80 presenta el diagrama de flujo seguido durante esta etapa.

Figura 80. *Diagrama de flujo del post-procesamiento de datos*



Para su desarrollo, el post-procesamiento se dividió en tres apartados. En la Sección 3.8.3.1 se elaboraron los gráficos de la cinemática del vehículo y de la ruta de estudio; en la Sección 3.8.3.2 se representaron los modos de operación del vehículo; y, finalmente, en la Sección 3.8.3.3 se describe el procedimiento para construir los mapas de motor de emisiones de gases y consumo de combustible.

3.8.3.1 Gráficos cinemáticos del vehículo y ruta de estudio

En este apartado se elaboraron las representaciones gráficas destinadas a describir la dinámica del vehículo a lo largo de la ruta de ensayo. Para ello, se consideraron el perfil de velocidad en función del tiempo, el perfil de aceleración y la variación de altitud, debido a que estas variables permiten caracterizar de forma conjunta el comportamiento cinemático del vehículo durante el recorrido. Con el fin de distinguir los diferentes tramos de la ruta, se emplearon

variaciones de color según la clasificación previamente establecida en la Tabla 4. El fragmento de código utilizado para la generación de estas gráficas se presenta en la Figura 81.

Figura 81. *Fragmento de código de Perfil Velocidad vs Tiempo*

```r
# A. Generación Base
Velocidad <- ggplot(df_RDE_Procesado, aes(x = TIEMPO_S, y = VEL_OBD_ELM327, color = TRAMO)) +
  geom_line(
    alpha = 0.85,
    linewidth = 0.6,
    na.rm = TRUE
  ) +
  facet_wrap(~ENSAYO, ncol = 1)

# B. Etiquetas, Leyendas y Tema
Plot_Velocidad <- Velocidad +
  scale_color_brewer(palette = "Set1") +
  theme_bw() +
  labs(
    title = "Perfil de Velocidad",
    x = "Tiempo [s]",
    y = "Velocidad [km/h]",
    color = "Tramo:"
  ) +
  theme(
    legend.position = "bottom",
    plot.title = element_text(face = "bold", hjust = 0.5),
    strip.background = element_rect(fill = "#E0E0E0", color = "black"),
    strip.text = element_text(face = "bold", size = 10)
  )

print(Plot_Velocidad)
```

El perfil de velocidad se generó mediante la función *ggplot()*, utilizando *aes()* para establecer *TIEMPO_S* como variable del eje horizontal, *VEL_OBD_ELM327* como variable del eje vertical y *TRAMO* como criterio de diferenciación entre los segmentos de la ruta. La evolución de la velocidad durante el recorrido se representó mediante *geom_line()*, permitiendo visualizar su comportamiento en función del tiempo. Para distinguir las condiciones experimentales, se empleó *facet_wrap(~ ENSAYO)*, con lo cual los resultados se organizaron de manera independiente para cada ensayo. Finalmente, *labs()* permitió configurar el título y las etiquetas de los ejes del gráfico. El perfil de aceleración se obtuvo a partir de la misma estructura de código, manteniendo la configuración utilizada para el perfil de velocidad y modificando únicamente la variable asignada al eje vertical para representar la aceleración registrada durante el recorrido. La Figura 82 muestra el fragmento de código correspondiente a esta segunda representación.

Figura 82. *Fragmento de código de Perfil Aceleración vs Tiempo*

```
# A. Generación Base
Aceleracion <- ggplot(df_RDE_Procesado, aes (x = TIEMPO_S, y Aceleracion, color TRAMO)) +
geom_hline(yintercept = 0, linetype = "solid", color = "black", linewidth = 0.5) +
geom_line(alpha= 0.7, linewidth = 0.4, na.rm = TRUE) +
facet_wrap(~ENSAYO, ncol = 1)

#B. Etiquetas, Leyendas y Tema
Plot_Aceleracion <- Aceleracion +
scale_color_brewer(palette = "Set1") +
coord_cartesian(ylim = c(-4, 4)) + # Ajuste de zoom para descartar picos de ruido
theme_bw() +
labs(
title = "Perfil de Aceleración",
x = "Tiempo [s]",
y = "Aceleración [m/s²]",
color = "Tramo:"
) +
theme(
legend.position = "bottom",
plot.title = element_text(face = "bold", hjust = 0.5),
plot.subtitle element_text(hjust = 0.5),
strip.background = element_rect(fill = "#E0E0E0", color = "black"),
strip.text = element_text(face = "bold", size = 10)
)

print(Plot_Aceleracion)
```

Siguiendo el mismo criterio, también se elaboró el gráfico de variación de altitud de la ruta, conservando la lógica del código anterior y modificando solo la variable del eje Y. La Figura 83 presenta el fragmento de código utilizado para esta representación.

Figura 83. *Fragmento de código de Perfil Altitud vs Tiempo*

```
# A. Generación Base
Altitud <- ggplot(df_RDE_Procesado, aes(x = TIEMPO_S, y = ALTITUD, color = TRAMO)) +
  geom_line(alpha = 0.9, linewidth = 0.7, na.rm = TRUE) +
  facet_wrap(~ENSAYO, ncol = 1)

# B. Etiquetas, Leyendas y Tema
Plot_Altitud <- Altitud +
  scale_color_brewer(palette = "Set1") +
  theme_bw( ) +
  labs(
    title = "Perfil de Elevación de la Ruta",
    x = "Tiempo [s]",
    y = "Altitud [m.s.n.m.]",
    color = "Tramo:"
  ) +
  theme(
    legend.position = "bottom",
    plot.title = element_text(face = "bold", hjust = 0.5),
    strip.background = element_rect(fill = "#E0E0E0", color = "black"),
    strip.text = element_text(face = "bold", size = 10)
  )

print(Plot_Altitud)
```

3.8.3.2 Gráficos de Modos de Operación

Una vez caracterizada la cinemática de la ruta, se procedió a representar los modos de operación del vehículo en cada ensayo y en cada tramo del recorrido. Para ello, primero fue necesario clasificar los registros según los modos definidos en la Tabla 5. Con estos datos se construyeron gráficos de barras apiladas, orientados a mostrar la participación porcentual de cada modo de operación en las diferentes zonas de la ruta. La representación se realizó en RStudio empleando la librería ggplot2, usando una escala de colores que facilitó la diferenciación entre modos.

El código usado para esta representación se estructuró en dos partes. La primera se dedicó a la preparación de los datos y se muestra en la Figura 84.

Figura 84. *Código de preparación de datos para gráfico de barras apiladas*

```
# 4.1 PREPARACIÓN DE DATOS
df_Tramos <- df_RDE_Procesado %>%
  group_by(ENSAYO, TRAMO, MODO_OPERACION) %>%
  summarise(T_Seg = sum(dt, na.rm = TRUE), groups = "drop")

#2. Agrupación para la "Ruta completa"
df_Completo <- df_Tramos %>%
  group_by(ENSAYO, MODO_OPERACION) %>%
  summarise(T_Seg sum(T_Seg), groups "drop") %>%
  mutate(TRAMO = "Ruta completa")

#3. Unión, cálculo de porcentajes y renombrado de etiquetas
Modos <- bind_rows(df_Tramos, df_Completo) %>%
  mutate(
    MODO_OPERACION = ifelse(MODO_OPERACION == "Aceleración Positiva", "Aceleración",
MODO_OPERACION),actor(ENSAYO, levels = c("SIN HIDROGENO", "CON HIDROGENO"))
  ) %>%
group_by(ENSAYO, TRAMO) %>%
mutate(
  Porcentaje = T_Seg / sum(T_Seg),
  # Configuración de niveles para el orden visual
  TRAMO = factor(TRAMO, levels = c("Urbano", "Suburbano", "Autopista", "Ruta completa")),
  MODO_OPERACION = factor(MODO_OPERACION, levels = c(
  "Aceleración",
  "Crucero",
  "Desaceleración",
  "Ralenti"
  ))
) %>%
ungroup()
```

En esta fase se utilizaron funciones de *dplyr* para resumir y reorganizar los tiempos de operación del vehículo por ensayo, tramo y modo de operación. Mediante *group_by()* y *summarise()* se calculó el tiempo acumulado *(T_Seg)* para cada combinación de las variables *ENSAYO*, *TRAMO* y *MODO_OPERACION*. Posteriormente, se añadió la agrupación correspondiente al recorrido completo y ambos resultados se unificaron en un solo conjunto de datos con *bind_rows()*. Finalmente, *mutate()* permitió renombrar categorías, calcular el porcentaje

de participación de cada modo de operación y definir el orden de los datos de *TRAMO* y *MODO_OPERACION* mediante la función *factor()*.

La segunda parte del código correspondió a la construcción del gráfico, cuya estructura se muestra en la Figura 85.

Figura 85. *Fragmento de código para gráfica de barras apiladas*

```r
# 4.2 VISUALIZACIÓN
Colores_Modos <- c("#fde725", "#a0da39", "#4ac16d", "#277f8e")

Plot_Modos <- ggplot(Modos, aes(x = TRAMO, y = Porcentaje, fill = MODO_OPERACION)) +
  geom_col(position = "fill", color = "black", linewidth = 0.3) +
  geom_text(
    aes(label = percent(Porcentaje, accuracy = 0.1)),
    position = position_stack(vjust = 0.5),
    size = 3.5,
    fontface = "bold",
    color = "black"
  ) +
  facet_wrap(~ENSAYO, ncol = 2) +
  scale_fill_manual(values = Colores_Modos) +
  # scale_fill_viridis_d(direction = -1)
  # scale_fill_viridis_d(option = "turbo", direction = -1) +
  scale_y_continuous(labels = percent_format()) +
  labs(
    title = "Modos de Operación por Tramos",
    x = "Tramo de la Ruta",
    y = "Porcentaje de Conducción",
    fill = "Modo de Operación:"
  ) +
  theme_bw() +
  theme(
    legend.position = "bottom",
    plot.title = element_text(face = "bold", hjust = 0.5, size = 14),
    axis.title = element_text(face = "bold"),
    axis.text.x = element_text(size = 10, face = "bold"), # Ajustado para que quepa "Ruta completa"
    strip.background = element_rect(fill = "#E0E0E0", color = "black", linewidth = 1),
    strip.text = element_text(face = "bold", size = 12)
  )

print(Plot_Modos)
```

La visualización se generó usando las funciones *ggplot()* y *geom_col(position = "fill")* para obtener barras apiladas, donde cada segmento representa la proporción de un modo de operación dentro de cada tramo. Para facilitar la lectura, se aplicó la función *geom_text()*, permitiendo incorporar etiquetas de porcentaje sobre cada barra. Por otra parte, *facet_wrap(~ ENSAYO)* permitió separar los resultados según la condición experimental, mientras que *scale_y_continuous(labels = percent_format())* expresó el eje vertical en términos porcentuales. Finalmente, *labs()* se utilizó para asignar el título del gráfico y las etiquetas de los ejes y de la leyenda.

3.8.3.3 Gráficos de mapas de motor

Como parte final del post-procesamiento, se elaboraron mapas de motor para analizar la variación del consumo de combustible y de las emisiones gaseosas antes y después de la adición de hidrógeno. Estos gráficos, también conocidos como mapas de contorno o curvas características, permiten representar el comportamiento del motor a partir de la relación entre el régimen de giro, la carga y una variable de salida determinada. Por esta razón, se emplearon como una de las principales herramientas de análisis del rendimiento del motor. La Figura 86 muestra un fragmento del código utilizado para su elaboración.

Figura 86. *Fragmento de código para gráficos de mapa motor*

```r
# 1. Límites del mapa motor
RPM_Min <- 600; RPM_Max <- 4000; Paso_RPM <- 200
Carga_Min <- 3.7; Carga_Max <- 60; Paso_Carga <- 5
Span_Loess <- 0.15
Resolucion_Grid_RPM <- 10
Resolucion_Grid_Carga <- 0.2

# 2. Regresión LOESS
Matriz_Loess <- function(df_ensayo, variable_z) {

  df_limpio <- df_ensayo %>%
    filter(
      RPM_PEMS >= RPM_Min & RPM_PEMS <= RPM_Max,
      CARGA_MOTOR_RF >= Carga_Min & CARGA_MOTOR_RF <= Carga_Max,
      is.finite(.data[[variable_z]])
    )

  Modelo_Loess <- loess(
    as.formula(paste(variable_z, "~ RPM_PEMS + CARGA_MOTOR_RF")),
    data = df_limpio,
    span = Span_Loess
  )

  df_Malla <- expand.grid(
    RPM_PEMS = seq(RPM_Min, RPM_Max, by = Resolucion_Grid_RPM),
    CARGA_MOTOR_RF = seq(Carga_Min, Carga_Max, by = Resolucion_Grid_Carga)
  )

  predict(Modelo_Loess, newdata = df_Malla)
}
```

Al igual que en los apartados anteriores, estos gráficos se desarrollaron con la librería ggplot2 en RStudio. Su construcción se basó en un método de agrupación por intervalos, definiendo rangos para las variables RPM en el eje X y carga o par motor en el eje Y, formando así una malla. A partir de esta malla, cada valor de la variable de estudio a representar se asignó a la celda o grid correspondiente y se representó mediante una escala de color. De esta manera, fue posible visualizar la distribución espacial de las emisiones y del consumo dentro del mapa de operación del motor.

Con el fin de completar las zonas donde no existían registros directos, se incorporó además un modelo de regresión LOESS, el cual permitió suavizar la superficie y estimar valores intermedios. Así se obtuvieron mapas continuos de tipo isocurva, más adecuados para interpretar tendencias generales de funcionamiento.

El procedimiento implementado en el código se organizó se estructuró en dos etapas: Primero, se definieron los límites operativos del mapa mediante las variables*: RPM_Min, RPM_Max, Carga_Min, Carga_Max* y la resolución de la malla, determinada por *Resolucion_Grid_RPM* y *Resolucion_Grid_Carga*, posteriormente, con la variable Matriz_Loess(), aplicando la función filter(), se filtró los datos válidos, teniendo en cuenta el rango de RPM, carga del motor y la variable de estudio a representar. Se utilizó *loess()* para ajustar una superficie suavizada como función del régimen y carga del motor, y *expand.grid()* para crear una malla regular de predicción. Finalmente, *predict()* permitió estimar los valores suavizados sobre dicha malla y construir la base de cada mapa de motor.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se analizan cada uno de los resultados obtenidos durante la campaña experimental, con el fin de comparar el comportamiento de las emisiones, el consumo de combustible y las condiciones de operación del vehículo antes y después de la adición de hidrógeno. Inicialmente, se caracterizó el gas generado por la celda de electrólisis mediante la evaluación de su caudal volumétrico bajo diferentes suministros de alimentación, y la determinación de su composición mediante cromatografía de gases.

Después, se hizo una comparación termográfica del sistema de escape para ver si había cambios de temperatura por el hidrógeno que se había añadido, y cómo esto estaba relacionado con el consumo de combustible y las emisiones que se producían. Con estos resultados se estudió la cinemática de la ruta y el comportamiento del vehículo, tomando en cuenta la distribución de los diferentes modos de operación. A partir de las condiciones registradas, se elaboraron los mapas de motor correspondientes a cada escenario de ensayo integrando variables como el consumo instantáneo de combustible, las tasas de emisión, indicadores de eficiencia energética BTE y BSFC, factores de emisión específicos.

También, se evaluaron las variaciones en las emisiones y el consumo de combustible mediante diagramas de caja y bigotes, permitiendo identificar la dispersión de los datos a lo largo de los distintos tramos de la ruta. Finalmente, el capítulo concluye con una comparación de los factores de emisión y consumo obtenidos durante las pruebas, resumiendo el desempeño del motor y del vehículo bajo condiciones reales de circulación.

4.1 Caracterización del hidrógeno

Para dar inicio al análisis de los resultados, se realizó una evaluación del gas hidrógeno generado por la celda de electrólisis. Esta evaluación comprendió dos aspectos principales: la variación del caudal volumétrico bajo diferentes condiciones de alimentación eléctrica y la determinación de la composición del gas mediante cromatografía de gases.

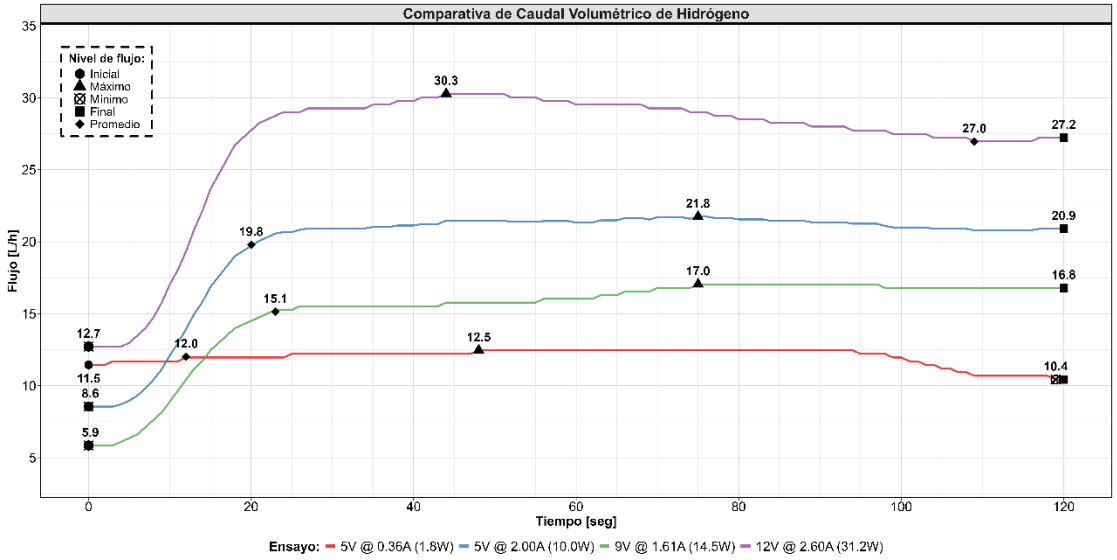
4.1.1 Comparativa de caudal volumétrico del hidrógeno generado

Para determinar la producción de hidrógeno bajo distintas condiciones de operación, se modificó la energía suministrada a la celda mediante una fuente regulable. Se establecieron cuatro

niveles de alimentación: 5 V @ 0.36 A, 5 V @ 2.00 A, 9 V @ 1.6 A y 12 V @ 2.60 A, equivalentes a 1.8, 10, 14.5 y 31.2 W, respectivamente. Estos valores representaron condiciones habituales de los circuitos eléctricos del vehículo.

El caudal volumétrico se calculó a partir de la velocidad del gas, medida con el anemómetro Testo 480, y del área transversal de la tubería. Los resultados se presentan en la Figura 87.

Figura 87. *Comparativa de Caudal volumétrico del gas hidrógeno*



Los resultados mostraron que el caudal aumentó con la corriente y la potencia de suministro. Se obtuvieron promedios de 12 L/h para 5 V @ 0.36 A, 21.8 L/h para 5 V @ 2.00 A, 15.1 L/h para 9 V @ 1.6 A y 27 L/h para 12 V @ 2.60 A. Durante la campaña experimental, la celda operó con 5 V y 2 A, por lo que el caudal generado se estimó en un promedio de 21.8 L/h. No obstante, al ingresar al motor mediante el conducto de vacío del múltiple de admisión, el flujo efectivo de gas en la mezcla varía según la apertura del obturador de aceleración.

Por otra parte, las curvas de flujo mostraron que la producción de gas no fue constante. Este comportamiento se relacionó con el aumento progresivo de la temperatura del agua por el paso de corriente, la adherencia temporal de burbujas a los electrodos, el incremento de la conductividad del electrolito y el consumo continuo de agua. En conjunto, estos factores modificaron las condiciones de operación de la celda, redujeron progresivamente el nivel del líquido y afectaron su rendimiento a largo plazo.

4.1.2 Composición del gas hidrógeno

Después de determinar el caudal, se realizó el ensayo de cromatografía de gases para caracterizar el gas producido por la celda, utilizando el cromatógrafo PerkinElmer Clarus 500 del Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D1945; para tomar la muestra se usaron bolsas Tedlar, con el fin de preservar su estanqueidad y evitar pérdidas o contaminaciones. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 88, mientras que el reporte completo se incluye en el Anexo 1.

Figura 88. *Resultados de cromatografía de gases*

PARÁMETROS DE LA MUESTRA							
Identificación:	M-LAI-26-12-01				**Fecha de muestreo:**	10/3/2026	
Tipo de muestra:	Gas de hidrógeno (H2) generado por electerólisis				**Plan de muestreo:**	No especificado por el cliente	
Tipo de contenedor:	Bolsa tedlar				**Fecha inicio del ensayo:**	12/3/2026	
Fecha de Recepción:	11/3/2026				**Fecha entrega informe:**	16/3/2026	
CONDICIONES DE TRABAJO							
Temperatura de ensayo y %HR ambiente:	18,3	ºC	50,0	%	**Norma de referencia:**	ASTM D 1945: Cromatografía	
Temperatura y Presión de muestra:	65,0	ºF	0,7	psi	**Procedimiento interno:**	PE-7.2-01	
	18,3	ºC	4964,2	Pa		PE-7.2-02	
RESULTADOS							
COMPOSICIÓN	**COMPONENTE**					**% Moles**	**Desv. Std**
	Hidrógeno					58,91	0,277
PROPIEDADES	**Densidad relativa**					0,53	
	Peso molecular promedio [g/mol]					14,57	
	Densidad de la muestra (g/L) a 60°F					0,65	
	Poder calorífico superior [kJ/m^3]					7115,98	
	Poder calorífico inferior [kJ/m^3]					6011,93	
	Factor de compresibilidad (z)					1,0618	

El análisis de la muestra permitió establecer una concentración de hidrógeno de 58.91 % mol, con un volumen de gas equivalente aproximadamente a dos tercios de la capacidad de una bolsa Tedlar de 0.5 L, en términos energéticos, se obtuvo un poder calorífico superior (PCS) de 7115.98 kJ/m³ y un poder calorífico inferior (PCI) de 6011.93 kJ/m³ en comparación con el PCI de la gasolina extra, establecido en 46.3 MJ/g o 34 262 000 kJ/m³, se evidencia una diferencia considerable entre ambos combustibles; esta diferencia es un aspecto relevante para la interpretación de los resultados posteriores, debido a que permite analizar las variaciones observadas en el consumo y las emisiones considerando tanto el aporte energético del hidrógeno como las posibles modificaciones generadas en el proceso de combustión.

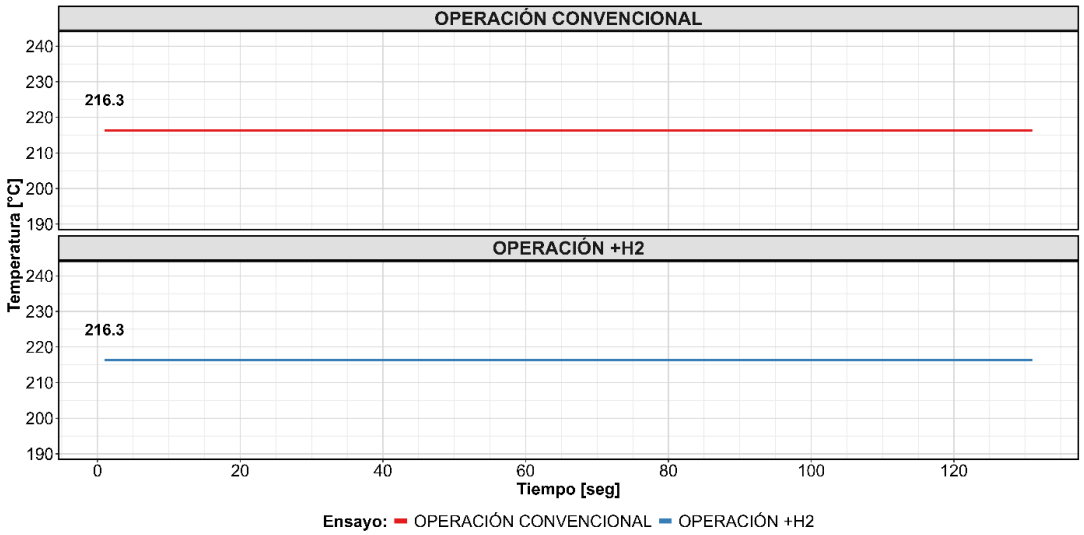
4.2 Comparativa Termográfica

Con la anterior caracterización se hizo una comparación de temperaturas del sistema de escape con la cámara termográfica descrita en selección de equipos, utilizando las configuraciones dadas en la metodología. El análisis se centró en dos componentes: el colector de escape y el convertidor catalítico. El objetivo fue identificar posibles variaciones de temperatura asociadas a la incorporación de hidrógeno y su impacto en el comportamiento de las emisiones, el consumo de combustible y el rendimiento del motor. Todas las mediciones se realizaron con el vehículo en condición estacionaria, tanto en ralentí como a un régimen de 3000 RPM.

4.2.1 Colector de escape

Inicialmente se evaluó el comportamiento térmico del colector de escape con el fin de verificar si la incorporación de hidrógeno producía variaciones en la temperatura de los gases después de la combustión. En la Figura 89 se muestra la evolución de la temperatura durante aproximadamente dos minutos con el motor al ralentí.

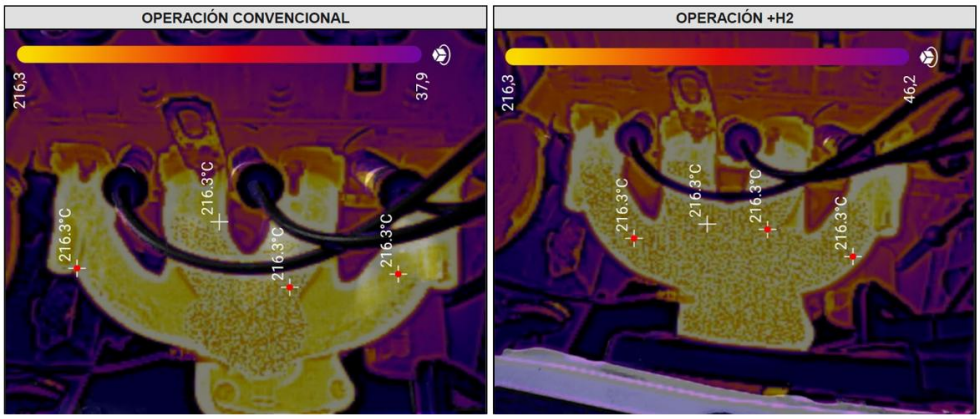
Figura 89. *Comparativa térmica del colector de escape a 820 RPM*



Los resultados muestran una temperatura prácticamente constante en ambos ensayos, con valores de 216.3 °C a lo largo de todo el colector. No se observaron diferencias apreciables entre la condición sin hidrógeno y la condición con hidrógeno durante este régimen de operación.

La Figura 90 complementa este análisis mediante la representación térmica del colector de escape para la misma condición de ralentí.

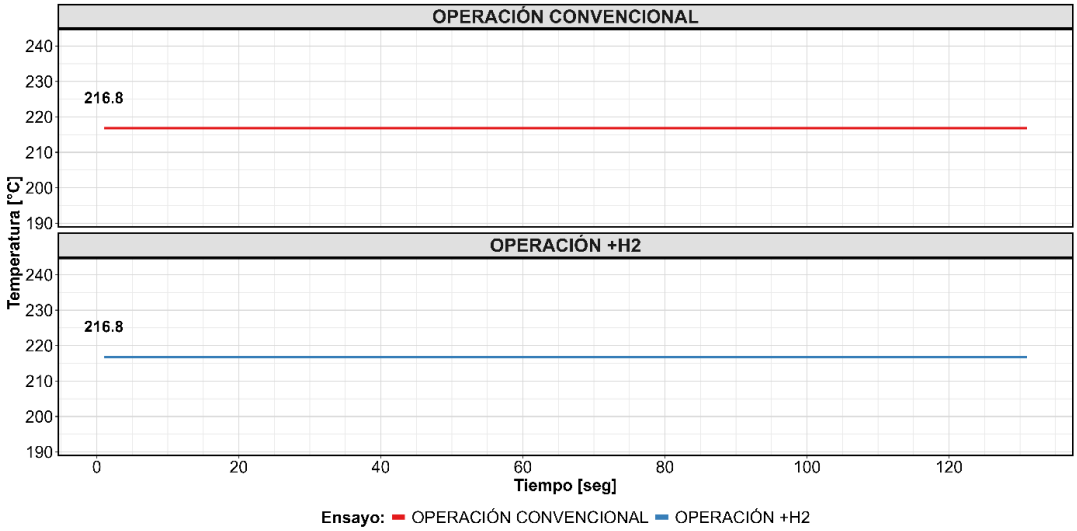
Figura 90. *Mapa térmico del colector de escape a 820 RPM*



Las imágenes confirman la ausencia de variaciones térmicas relevantes entre ambos ensayos, demostrando una distribución de temperatura similar en los puntos evaluados.

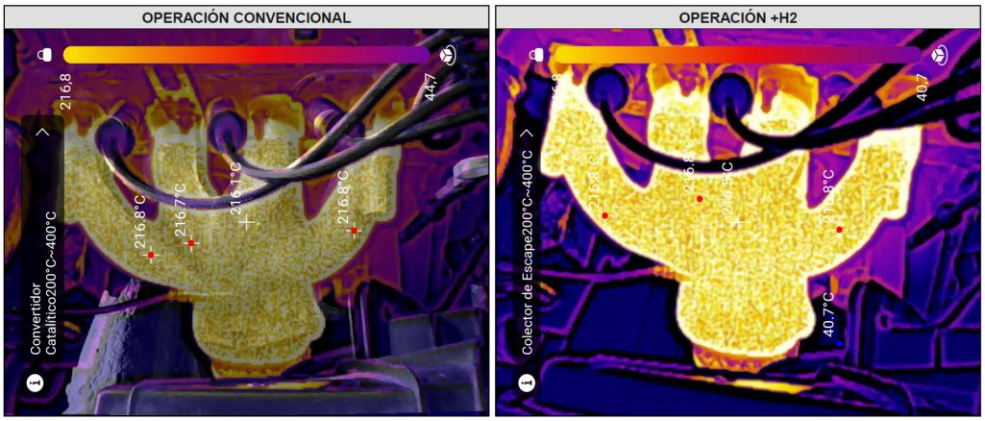
Posteriormente, se repitió la evaluación a un régimen de 3000 RPM con el propósito de analizar el comportamiento térmico del colector bajo una mayor demanda de operación. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 91.

Figura 91. *Comparativa térmica del colector de escape a 3000 RPM*



Al igual que en la condición de ralentí, las temperaturas registradas permanecieron prácticamente constantes en ambos ensayos, con valores de 216.8 °C durante todo el periodo de medición. La Figura 92 presenta la distribución térmica correspondiente a esta condición de operación.

Figura 92. *Mapa térmico del colector de escape a 3000 RPM*



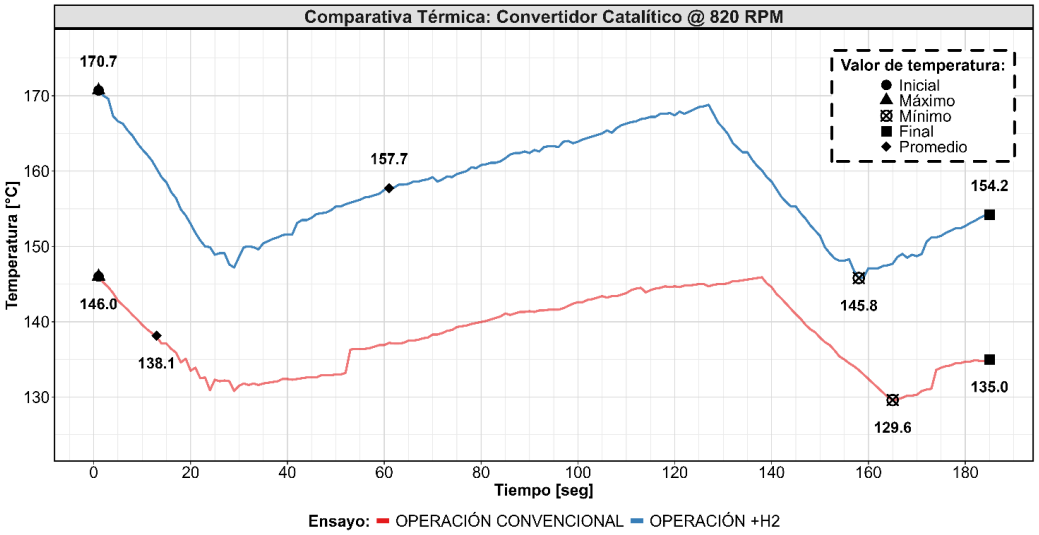
Las imágenes muestran una distribución térmica muy similar para ambas condiciones de ensayo, sin diferencias apreciables que se atribuyan a la incorporación de hidrógeno. Asimismo, al comparar los resultados obtenidos a ralentí y a 3000 RPM, se observa una diferencia aproximada de 0.5 °C, una variación poco significativa frente al rango de temperatura registrado durante las pruebas.

4.2.2 Convertidor Catalítico

Posteriormente, se evaluó el comportamiento térmico del convertidor catalítico, debido a su papel dentro de los procesos de oxidación y reducción de los gases de escape. El análisis permitió verificar si la incorporación de hidrógeno producía variaciones de temperatura que pudieran relacionarse con los cambios observados en las emisiones contaminantes.

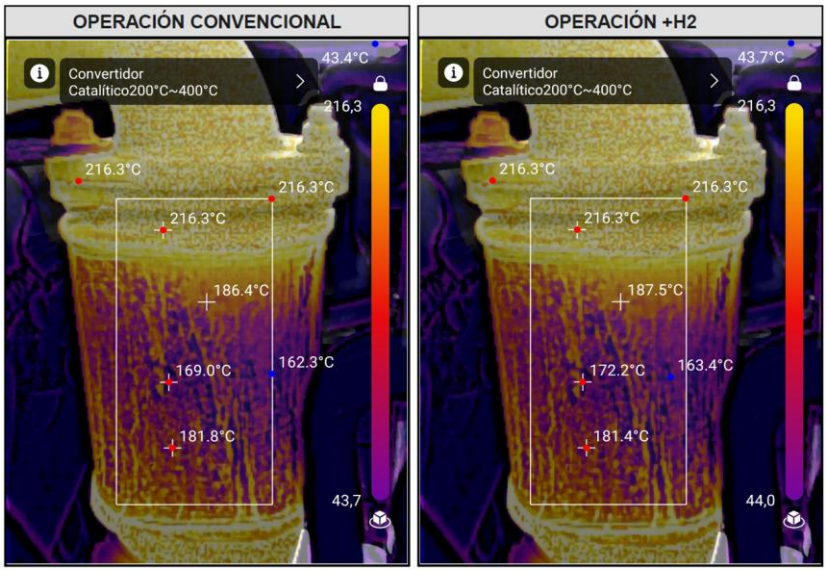
En primer lugar, se realizó la comparación bajo condiciones de ralentí, a un régimen aproximado de 820 RPM. Los resultados se presentan en la Figura 93.

Figura 93. *Comparativa térmica del convertidor catalítico a 820 RPM*



A diferencia de lo observado en el colector de escape, el convertidor catalítico presentó un incremento de temperatura en la condición con hidrógeno. La diferencia promedio registrada entre ambos ensayos fue cercana a 20 °C, manteniéndose de forma relativamente estable durante el intervalo de medición. La distribución térmica correspondiente se muestra en la Figura 94.

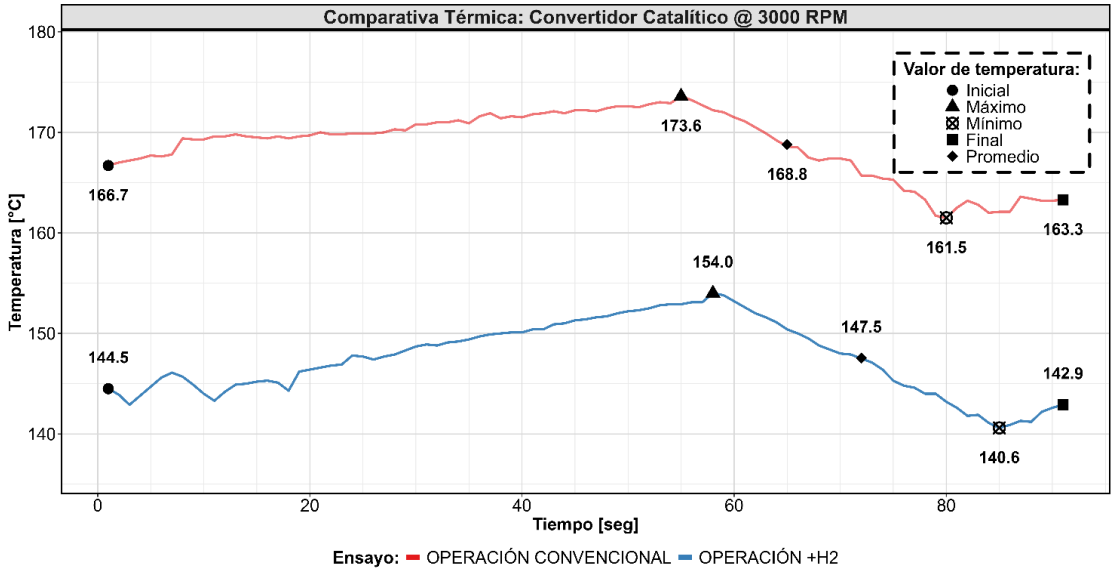
Figura 94. *Mapa térmico del convertidor catalítico a 820 RPM*



Las imágenes muestran una mayor temperatura superficial en la condición con hidrógeno, sobre todo en áreas similares del componente, lo que confirma el comportamiento identificado en las curvas de temperatura.

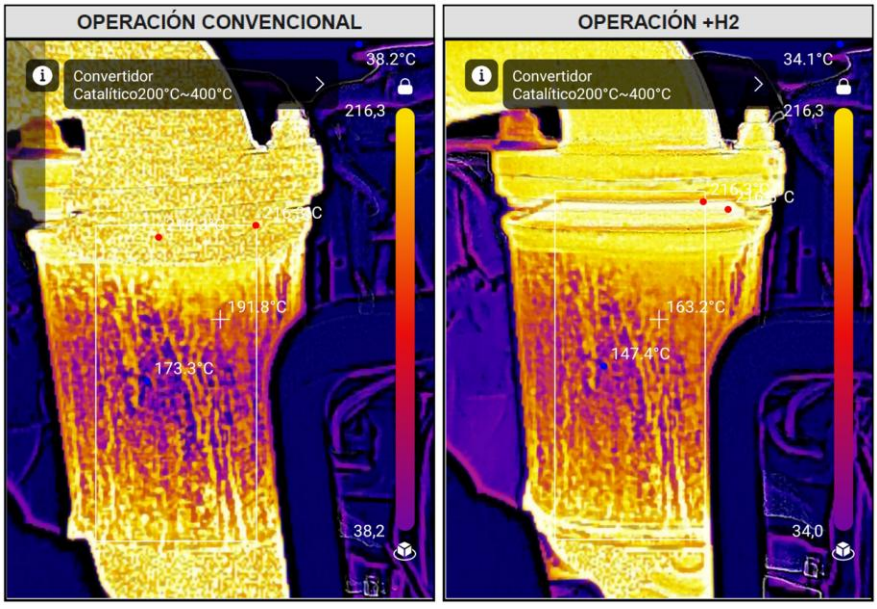
Finalmente, se realizó la evaluación del convertidor catalítico a un régimen de 3000 RPM. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 95.

Figura 95. *Comparativa térmica del colector de escape a 3000 RPM*



En esta condición se observó un comportamiento opuesto al registrado en ralentí. La temperatura del convertidor catalítico disminuyó en la condición con hidrógeno, registrándose una diferencia promedio aproximada de 21.3 °C respecto al ensayo sin hidrógeno. La Figura 96 presenta la distribución térmica correspondiente a esta condición de operación.

Figura 96. *Mapa térmico del convertidor catalítico a 3000 RPM*



Las imágenes obtenidas coinciden con la reducción de temperatura observada en las curvas térmicas, mostrando una menor intensidad durante la operación con hidrógeno, donde los resultados muestran que la inyección de hidrógeno no provocó variaciones significativas en la temperatura del colector de escape. Sin embargo, en el convertidor catalítico se detectaron alteraciones en su comportamiento térmico, que se manifestaron como un aumento de temperatura durante el ralentí y una disminución cuando el motor trabajó a 3000 rpm.

4.3 Cinemática del vehículo y la ruta de estudio

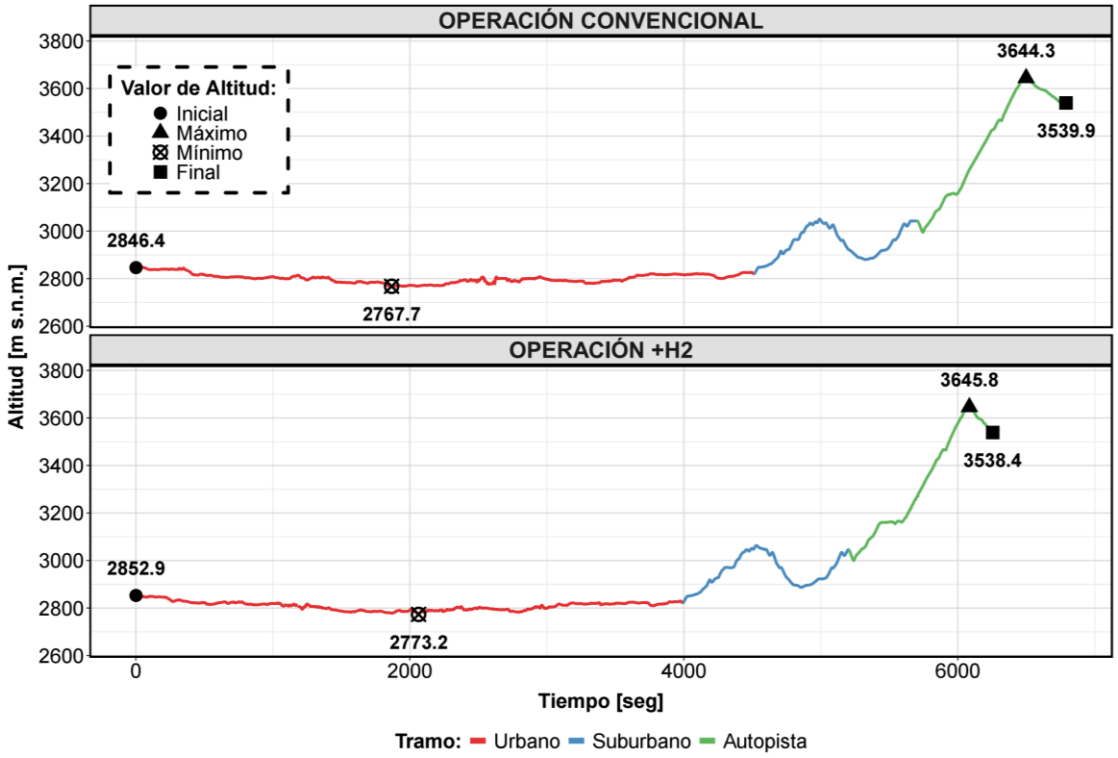
Posterior al análisis termográfico, se analizó la cinemática del vehículo a lo largo de la ruta de prueba realizada en la ciudad de Riobamba provincia de Chimborazo, tomando en cuenta los perfiles de velocidad, aceleración y altitud; además, se comparó los indicadores cinemáticos entre ensayos de prueba: operación convencional y con inyección de hidrógeno, para verificar que se desarrollaron bajo condiciones de circulación comparables.

4.3.1 Caracterización cinemática de la ruta de estudio

En este primer apartado se describe el comportamiento general del vehículo durante la ruta de ensayo mediante los perfiles de velocidad, aceleración y altitud correspondientes a los tramos urbano, suburbano y autopista. Este análisis permitió establecer las condiciones cinemáticas y topográficas a las que estuvo sometido el vehículo durante las pruebas, proporcionando una referencia para la interpretación de los resultados obtenidos.

La Figura 97 presenta el perfil de altitud registrado en cada ensayo. En esta representación se puede observar la diferencia de elevación entre el punto de origen hasta el destino, así como la delimitación de cada uno de los tramos evaluados. Este perfil permite comprender las condiciones topográficas del recorrido y facilita la interpretación de los perfiles de velocidad y aceleración observados durante la circulación.

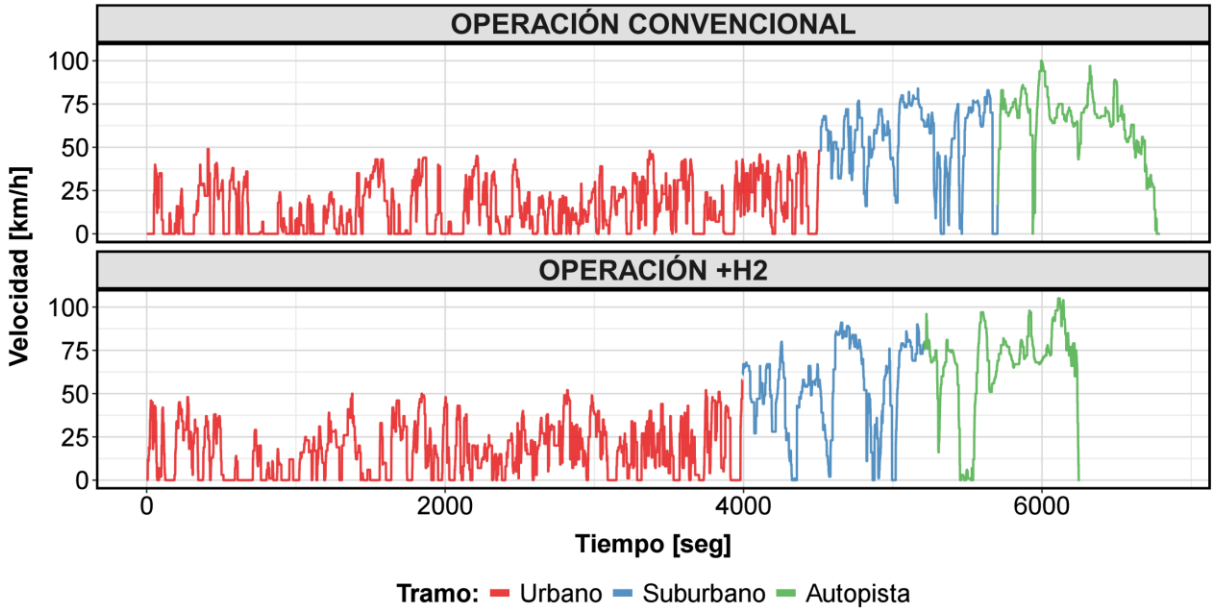
Figura 97. *Perfil Altitud vs Tiempo*



Por otra parte, la Figura 98 muestra el perfil de velocidad obtenido para las dos condiciones de ensayo. La distribución de velocidades permite diferenciar las características de circulación propias de cada tramo de la ruta. En la zona urbana se registran velocidades cercanas a 50 km/h, interrumpidas por frecuentes reducciones que se relacionan con las condiciones propias de circulación. En el tramo suburbano las velocidades se aproximan a los 90 km/h y hay menos interrupciones, aunque todavía hay algunos puntos del trayecto donde se interrumpe. En la autopista las velocidades son iguales o mayores a 90 km/h, con una circulación más continua y menos interrupciones.

Durante la circulación dentro del tramo suburbano se observaron ciertos intervalos en que la velocidad tiende a cero, principalmente en zonas correspondientes a intersecciones y semáforos. En el tramo de autopista, la principal disminución de velocidad se dio en el peaje de San Andrés, donde se detuvo temporalmente el vehículo durante un breve intervalo.

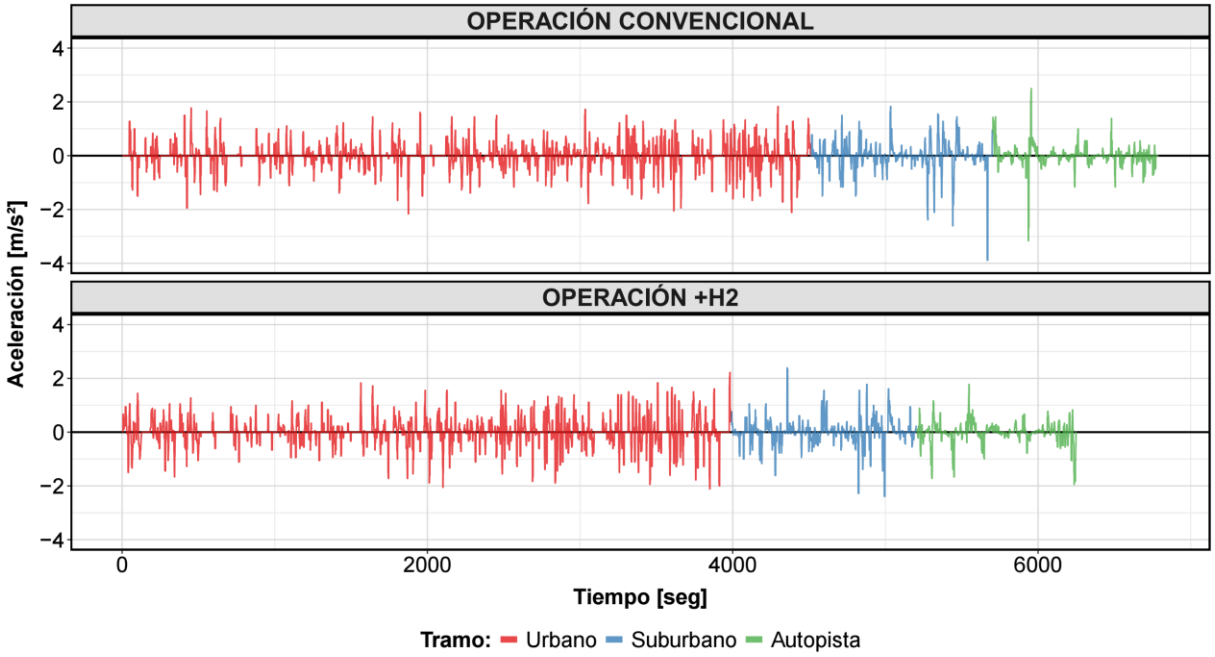
Figura 98. *Perfil Velocidad vs Tiempo*



A partir del perfil de velocidad se obtuvo el perfil de aceleración presentado en la Figura 99. La gráfica muestra una relación directa entre las desaceleraciones y las reducciones de velocidad registradas en cada tramo. En la zona urbana donde se concentró la mayor frecuencia de desaceleraciones, asociada principalmente a las detenciones recurrentes propias de las condiciones de circulación de este entorno, alcanzándose valores promedio de hasta -0.55 m/s². Esta frecuencia se vio reducida en el tramo suburbano, donde se registraron valores promedio de hasta -0.49 m/s², presentando una menor incidencia en la autopista, con registros de hasta -0.34 m/s², comportamiento relacionado con una circulación más continua y una mayor permanencia en condiciones de crucero.

En el perfil global de aceleración de la ruta, los valores máximos se aproximaron a ±2,2 m/s² y la desaceleración media fue de aproximadamente -0,48 m/s². Los resultados obtenidos coinciden con las características dinámicas identificadas en los diferentes tramos del recorrido.

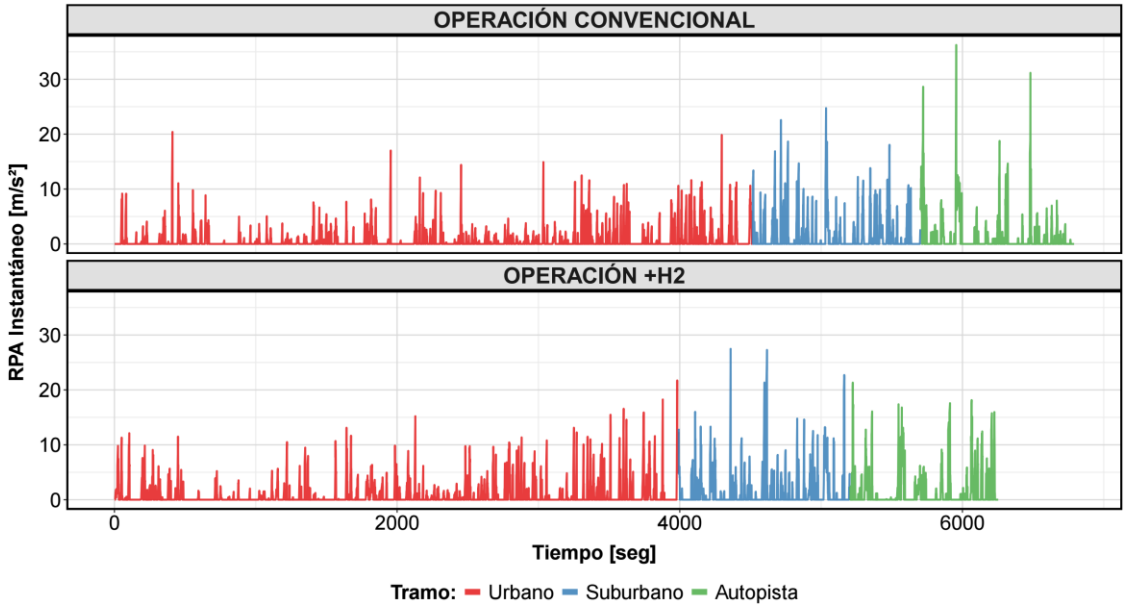
Figura 99. *Perfil Aceleración vs Tiempo*



4.3.2 Aceleración Relativa Positiva de la ruta

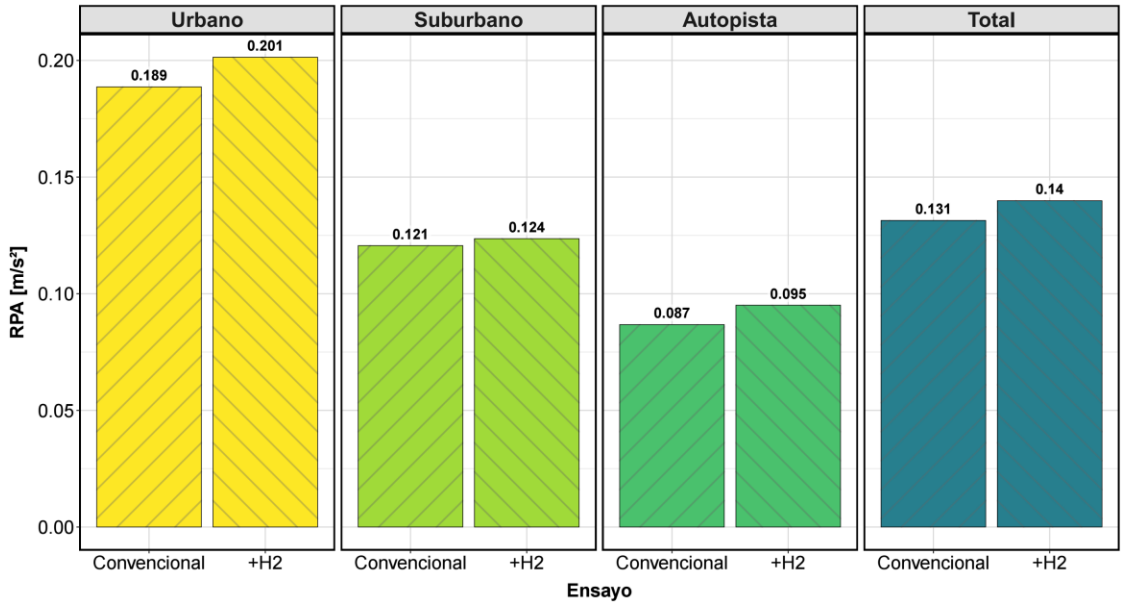
Como complemento de la caracterización cinemática anterior, se analizó la aceleración positiva relativa (RPA, por sus siglas en inglés), indicador utilizado para cuantificar la agresividad del estilo de conducción mediante la frecuencia y magnitud de las aceleraciones positivas. Este parámetro permite relacionar las condiciones dinámicas de la ruta con los resultados obtenidos posteriormente en el consumo de combustible y las emisiones de gases. En primera instancia, la Figura 100 presenta el RPA instantáneo registrado en ambos ensayos, diferenciando los tramos urbano, suburbano y autopista.

Figura 100. *Aceleración relativa positiva instantánea de la ruta*



A partir del RPA instantáneo se calcularon los valores acumulativos para cada tramo y para el recorrido completo empleando la Ec. (15) descrita en la metodología a través de la sumatoria de los datos obtenidos. Los resultados se presentan en la Figura 101 mediante gráficos de barras.

Figura 101. *Valor acumulativo de la aceleración relativa positiva en ruta*



Los valores obtenidos indican que ambos ensayos tuvieron un comportamiento dinámico similar. La condición con hidrógeno mostró un incremento de 6.7 % en el tramo urbano, donde el

RPA pasó de 0.189 a 0.201 m/s². En el tramo suburbano se registró un ligero aumento del 2.5 %, con valores de 0.121 y 0.124 m/s² para las condiciones convencional y con hidrógeno, respectivamente. Por su parte, en autopista se obtuvo un incremento del 9.2 %, al pasar de 0.087 m/s² en la condición convencional a 0.095 m/s² con hidrógeno. Para la ruta completa, el RPA presentó un incremento del 6.9 %, pasando de 0.131 a 0.140 m/s². Aunque no se observaron diferencias sumamente significativas en el RPA acumulativo, estos valores muestran una demanda de aceleración ligeramente mayor durante el ensayo con hidrógeno. Por ello, ambos recorridos pueden considerarse comparables, aunque pueden presentar ligeras influencias sobre las diferencias observadas posteriormente en el consumo de combustible y las emisiones.

4.3.3 Comparativa cinemática entre ensayos

Una vez analizados los perfiles cinemáticos y el comportamiento del RPA, esta sección reúne los principales indicadores de ambos ensayos para verificar su grado de similitud. Para ello se comparan la duración del recorrido, la distancia, las velocidades máxima y promedio, las aceleraciones positiva y negativa promedio, junto con el valor promedio del RPA. Este análisis permite establecer que las diferencias observadas en el consumo de combustible y las emisiones se relacionaron principalmente con la implementación de hidrógeno y no con cambios en el estilo de conducción.

La Tabla 25 presenta un resumen de las principales características cinemáticas correspondientes a cada uno de los tramos y al total de la ruta.

Tabla 25. *Características cinemáticas de la ruta de estudio*

	Urbano		**Suburbano**		**Autopista**		**Total**	
Parámetro	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
Duración (min)	75.2	66.53	19.83	20.22	18.13	17.47	113.17	104.22
Distancia (km)	18.47	18.74	17.97	17.81	19.34	19.28	55.78	55.83
Velocidad máxima (km/h)	49	58	84	91	100	105	100	105
Velocidad promedio (km/h)	14.73	16.9	54.36	52.85	63.99	66.23	29.57	32.14
Aceleración positiva promedio (m/s^2)	0.51	0.54	0.47	0.47	0.38	0.36	0.48	0.5
Desaceleración promedio (m/s^2)	-0.51	-0.55	-0.49	-0.42	-0.3	-0.34	-0.47	-0.48
RPA (m/s^2)	0.19	0.20	0.12	0.12	0.09	0.1	0.13	0.14

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno. H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

La duración de los recorridos mostró una variación reducida entre las dos condiciones evaluadas. En el tramo urbano se registraron 75.20 y 66.53 minutos, mientras que en el suburbano los tiempos fueron de 19.83 y 20.22 minutos. Para la autopista se obtuvieron duraciones de 18.13 y 17.47 minutos en las condiciones convencional y con hidrógeno, respectivamente. Al considerar la ruta completa, los tiempos alcanzaron 113.17 y 104.22 minutos, lo que corresponde a una diferencia inferior a 9 minutos, equivalente al 7.9 %. Si bien la investigación no constituye un procedimiento de homologación RDE, el diseño de la ruta tomó este enfoque como referencia, manteniendo una duración comprendida dentro del intervalo de 90 a 120 minutos establecido para este tipo de ensayos.

Respecto a la velocidad promedio, los valores más bajos correspondieron al tramo urbano, con 14.73 km/h en la condición convencional y 16.90 km/h con hidrógeno. En el recorrido suburbano se alcanzaron velocidades de 54.36 y 52.85 km/h, mientras que en autopista se registraron 63.99 y 66.23 km/h, respectivamente. Para la totalidad de la ruta, las velocidades promedio fueron de 29.57 km/h y 32.14 km/h. Las diferencias entre segmentos responden a las condiciones particulares de circulación de cada entorno: en la zona urbana, la presencia de semáforos, congestión y detenciones frecuentes limita la velocidad media; estas restricciones disminuyen en el tramo suburbano y son aún menores en autopista, donde se alcanzaron las mayores velocidades.

Las aceleraciones positivas promedio también conservaron valores próximos entre ambas condiciones. En el tramo urbano se obtuvieron registros de 0.51 y 0.54 m/s², mientras que en el suburbano ambas pruebas alcanzaron 0.47 m/s². En autopista, los valores fueron de 0.38 m/s² para la condición convencional y 0.36 m/s² con hidrógeno. Por su parte, las desaceleraciones promedio oscilaron entre -0.51 y -0.55 m/s² en el tramo urbano, entre -0.49 y -0.42 m/s² en el suburbano, y entre -0.30 y -0.34 m/s² en autopista. Para la ruta completa, las aceleraciones positivas promedio fueron de 0.48 y 0.50 m/s², mientras que las desaceleraciones alcanzaron -0.47 y -0.48 m/s², respectivamente. La reducida diferencia entre estos indicadores permite establecer que las dos condiciones de ensayo estuvieron sometidas a patrones de conducción comparables.

El RPA mostró diferencias reducidas entre las dos condiciones evaluadas. En la zona urbana se encontraron valores de 0.189 y 0.201 m/s² y en la zona suburbana, de 0.121 y 0.124 m/s². Para la autopista los valores fueron de 0.087 y 0.095 m/s² respectivamente y en la ruta completa se alcanzó a registrar 0.131 y 0.140 m/s². La cercanía de estos resultados complementa lo señalado

en el apartado anterior, y permite establecer que las variaciones registradas en los indicadores cinemáticos fueron reducidas, sin mostrar cambios relevantes en las características generales de conducción.

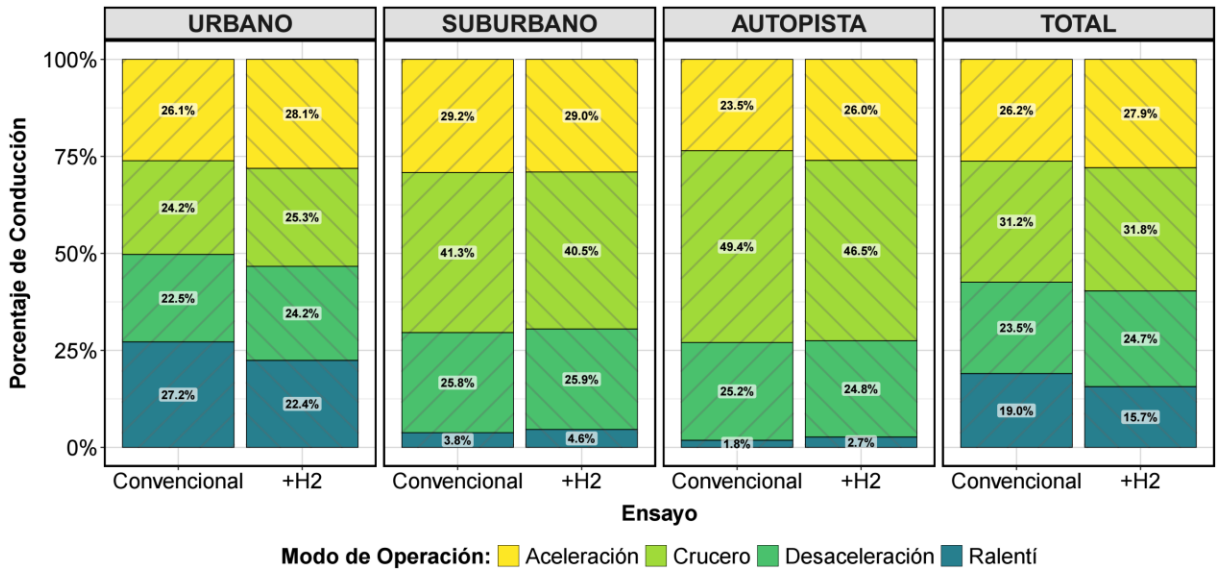
La comparación con el estudio de Barros Merchán & Melo Arteaga (2024), mostró un comportamiento similar en las velocidades promedio correspondientes a los tramos urbano y suburbano, lo que permite identificar condiciones de circulación comparables. En el tramo de autopista se notó la diferencia más clara. Esta variación podría estar relacionada con las condiciones particulares del tráfico durante los ensayos, especialmente por la acumulación de vehículos en el peaje de San Andrés, que aumentó los períodos de detención y produjo pequeñas modificaciones en la velocidad promedio. Si bien difieren en este aspecto, los perfiles de velocidad obtenidos en ambas pruebas mantuvieron una tendencia similar, por lo cual pueden considerarse comparables las condiciones cinemáticas generales del recorrido.

Dado que se encontró similitud entre los principales indicadores cinemáticos, el análisis se completa con la evaluación de los modos de operación del vehículo. Esta clasificación permite establecer la distribución del tiempo de marcha a lo largo del recorrido y, por consiguiente, contextualizar las condiciones de funcionamiento bajo las que se obtuvieron los valores de consumo de combustible y emisiones de gases.

4.4 Modos de operación

En esta sección se presenta la distribución porcentual de los modos de operación definidos en la Tabla 5: aceleración, crucero, desaceleración y ralentí. El análisis se desarrolló para los tramos urbano, suburbano, autopista y para la ruta completa. Esta representación permite visualizar la participación de cada modo de operación dentro de cada segmento de la ruta e identificar posibles diferencias entre ambos ensayos. Los resultados se presentan en los gráficos de barras apiladas de la Figura 102.

Figura 102. *Modos de Operación del Vehículo*



A partir de esta comparación, se puede ver que la zona urbana tuvo diferencias moderadas entre ambos ensayos. En la condición sin hidrógeno, el porcentaje de ralentí fue de 27.2 %, mientras que con hidrógeno se redujo a 22.4 %, lo cual indica una menor permanencia del vehículo detenido con motor encendido. A la vez, la aceleración creció del 26,1 % al 28,1 %, y la desaceleración del 22,5 % al 24,2 %. En el modo crucero se registró una menor variación, pasando de 24,2 % a 25,3 %. El tramo en conjunto conservó el patrón de conducción ininterrumpido típico del entorno urbano.

Los dos ensayos mostraron una distribución muy similar de los modos de operación en el tramo suburbano. El porcentaje de ralentí se mantuvo en valores bajos, 3.8 % sin hidrógeno y 4.6 % con hidrógeno. La participación de la aceleración prácticamente no varió, pasando del 29,2 % al 29,0 %, y la desaceleración permaneció en niveles similares, con un 25,8 % y un 25,9 %, respectivamente. El crucero mantuvo la mayor participación dentro del tramo aunque con una ligera caída, del 41,3 % al 40,5 %. Esta distribución corresponde a un patrón de circulación fluida y menos interrumpida que el tramo urbano.

En la autopista, el ralentí fue prácticamente nulo en los dos casos, con valores del 1,8 % y el 2,7 %. La mayor diferencia se encontró en la aceleración, que pasó de 23.5 % a 26.0 % en la condición con hidrógeno, mientras que el tiempo de crucero disminuyó de 49.4 % a 46.5 %. Así se refleja una conducción un poco menos uniforme durante ese ensayo, aunque el modo de

funcionamiento predominante continuó siendo el de velocidad constante. La caída tuvo apenas cambios, y se mantuvo alrededor del 25 % en ambos tests.

En el tiempo de ralentí se vio una diferencia más acusada para la ruta completa. En el ensayo con hidrógeno este parámetro cayó de 19,0 % a 15,7 %, señal de que el vehículo se quedó parado menos tiempo. Al mismo tiempo, la aceleración creció desde 26.2 % hasta 27.9 % y la desaceleración desde 23.5 % hasta 24.7 %. Los porcentajes de tiempo en crucero se mantuvieron prácticamente constantes, 31.2 % y 31.8 %. En general, la distribución de los modos de operación fue parecida en ambos ensayos, aunque la condición con hidrógeno tuvo una ligera disminución del tiempo de detención y una mayor proporción del tiempo en movimiento.

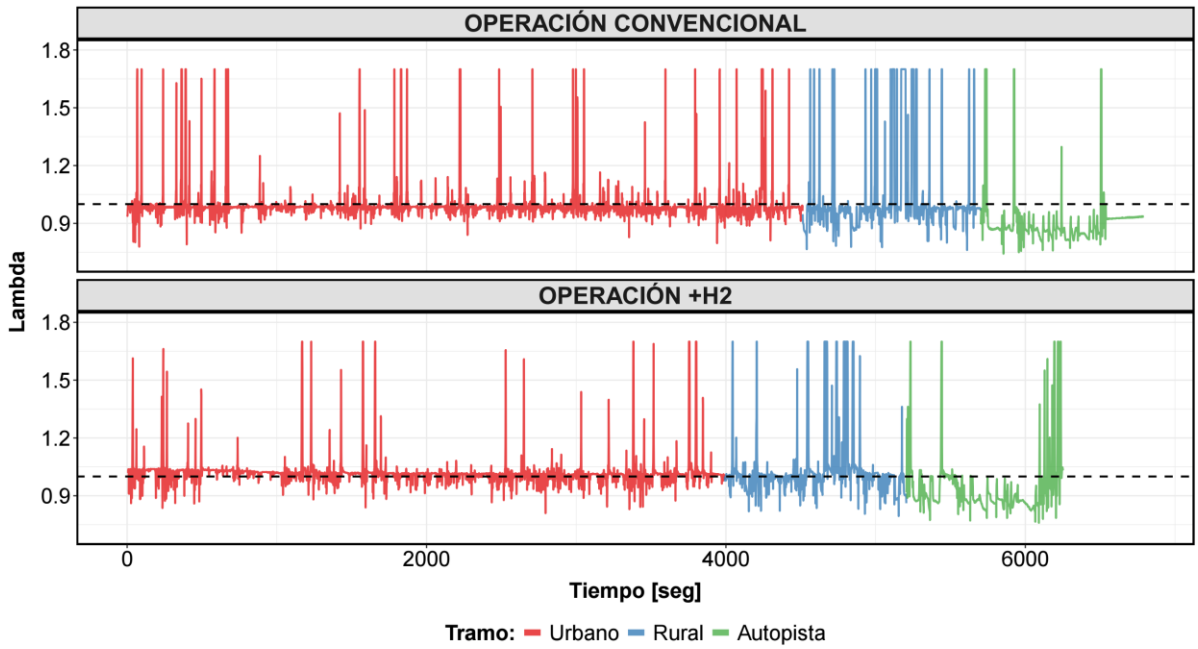
4.5 Variación de la concentración los gases de escape

Una vez establecidas las condiciones de operación del vehículo se analiza el comportamiento de las emisiones de gases de escape registradas en los dos ensayos. Se comienza por analizar el factor lambda para determinar los cambios en la mezcla aire-combustible y se continúa con el estudio de las concentraciones volumétricas de los gases que se obtienen directamente del sistema iPEMS. El conjunto de estas variables permite ver el comportamiento de la combustión a lo largo del recorrido y sirve de base para determinar después las tasas y factores de emisión.

4.5.1 Variación de la mezcla aire combustible

Como punto de partida, se analiza la variación de la mezcla aire/combustible (lambda) obtenida para todo el recorrido, debido a que este parámetro permite interpretar las condiciones bajo las cuales se desarrolló la combustión y facilita el análisis de la concentración volumétrica de los gases de escape. La Figura 103 presenta la variación de la mezcla aire-combustible durante los ensayos de operación convencional y con implementación de hidrógeno. La línea punteada representa el valor de referencia próximo a $\lambda = 1$, correspondiente a una mezcla estequiométrica. Los valores inferiores indican una mezcla rica, mientras que los superiores corresponden a una mezcla pobre.

Figura 103. *Variación de la mezcla aire-combustible*



En el ensayo de operación convencional, la señal lambda se mantuvo durante varios intervalos por debajo o cerca del valor estequiométrico, principalmente en los tramos urbano y de autopista, esto fue señal de que, a lo largo del recorrido, había una mayor presencia de mezclas ricas, aunque, se registraron valores máximos por encima de $\lambda = 1$, estos correspondieron a eventos transitorios que no cambiaron la tendencia general.

Con la implementación de hidrógeno, la señal mostró una mayor proporción de valores superiores a $\lambda = 1$, especialmente en los tramos urbano y suburbano, esta conducta presentó una operación más cercana a mezclas pobres que el ensayo convencional, sin embargo, se mantuvieron oscilaciones de la señal a lo largo de todo el recorrido, debido a las variaciones de velocidad, par motor y demanda del motor que son propias de la conducción en condiciones reales de tráfico.

Con el propósito de complementar esta interpretación, la Tabla 26 resume los principales parámetros estadísticos del factor lambda para cada tramo de la ruta y para el recorrido total. Además del valor promedio y mínimo, se presenta el percentil 75, empleado para identificar la tendencia predominante de lambda, y el valor máximo representativo obtenido mediante el percentil 95, con el fin de reducir la influencia de valores atípicos relacionados al ruido de la señal.

Tabla 26. *Valores característicos del factor Lambda por tramo*

	Urbano		Suburbano		Autopista		Total	
Valor	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
Promedio	1.00	1.02	1.03	1.04	0.90	0.94	0.99	1.01
Mínimo	0.78	0.81	0.76	0.79	0.74	0.76	0.74	0.76
Máximo (P95)	1.08	1.05	1.70	1.64	0.97	1.15	1.10	1.08
Percentil 75	0.99	1.02	0.99	1.02	0.93	0.99	0.99	1.02

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno. H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.
Los valores máximos corresponden al percentil 95 del conjunto de datos, utilizado para reducir la influencia de valores atípicos presentes en la señal.

Los resultados de la Tabla 26 refuerzan la tendencia observada en la Figura 103, donde el factor lambda promedio aumentó ligeramente en todos los tramos analizados, pasando de 1.00 a 1.02 en la zona urbana, de 1.03 a 1.04 en el tramo suburbano y de 0.90 a 0.94 en autopista, como resultado, el promedio de la ruta completa se incrementó de 0.99 a 1.01. El percentil 75 también subió ligeramente, pasando de 0.99 a 1.02 en la ruta completa y en los tramos urbano y suburbano, lo que indica que durante la operación con hidrógeno una proporción mayor de los datos se sitúa por encima del valor estequiométrico. En autopista, aunque esta relación continuó por debajo de 1, creció desde 0.93 hasta 0.99, lo que indica que la mezcla se está moviendo hacia condiciones cercanas a la estequiometría.

Por su parte, los valores mínimos presentaron leves incrementos en todos los segmentos, mientras que los valores máximos representativos (percentil 95) mostraron variaciones reducidas entre ambos ensayos. En la autopista se registró la mayor diferencia, con un valor que pasó de 0.97 a 1.15, mientras que para la ruta completa y la zona urbana las diferencias fueron menores. Estos resultados en conjunto indican un ligero desplazamiento del factor lambda a mezclas más pobres durante la operación con hidrógeno, pero manteniendo las fluctuaciones transitorias propias de la conducción en condiciones reales de tráfico.

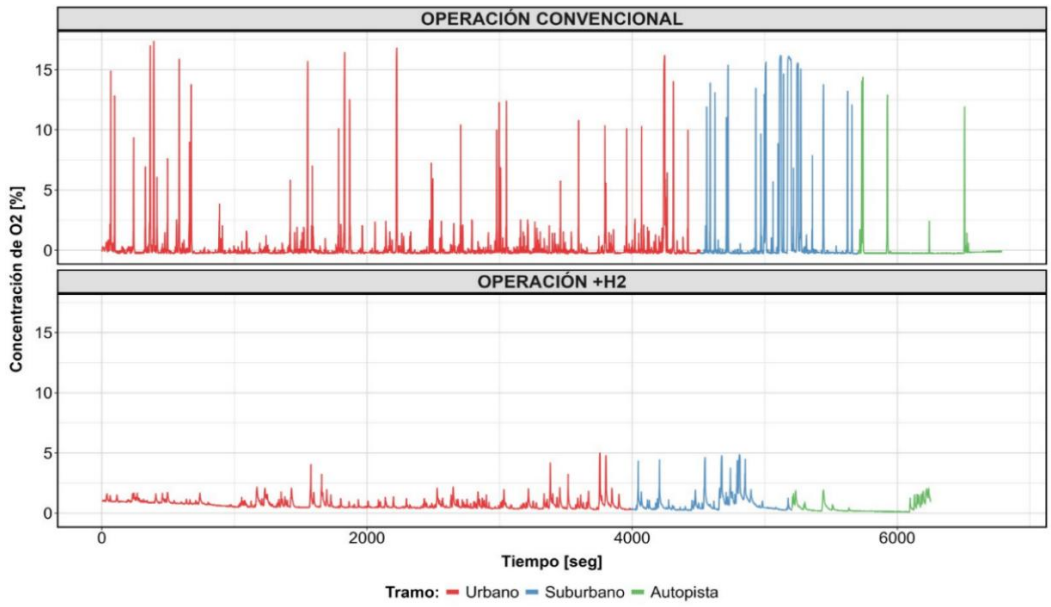
4.5.2 Comparativa en concentración volumétrica de las emisiones por tramos

Una vez analizado el comportamiento de la mezcla aire-combustible, se presentan los perfiles de concentración volumétrica de los gases de escape obtenidos mediante el sistema iPEMS. Estos registros permiten evaluar la evolución instantánea de cada contaminante durante el recorrido y relacionar su comportamiento con las condiciones de la combustión del motor.

4.5.2.1 Perfil de concentración volumétrica de O_2

En primer lugar, se analiza el perfil de concentración volumétrica del oxígeno residual a la salida del tubo de escape, presentado en la Figura 104. Esta representación permite observar las variaciones instantáneas del O_2 a lo largo de los distintos tramos de la ruta y evaluar su relación con el proceso de combustión.

Figura 104. *Concentración volumétrica de O_2*

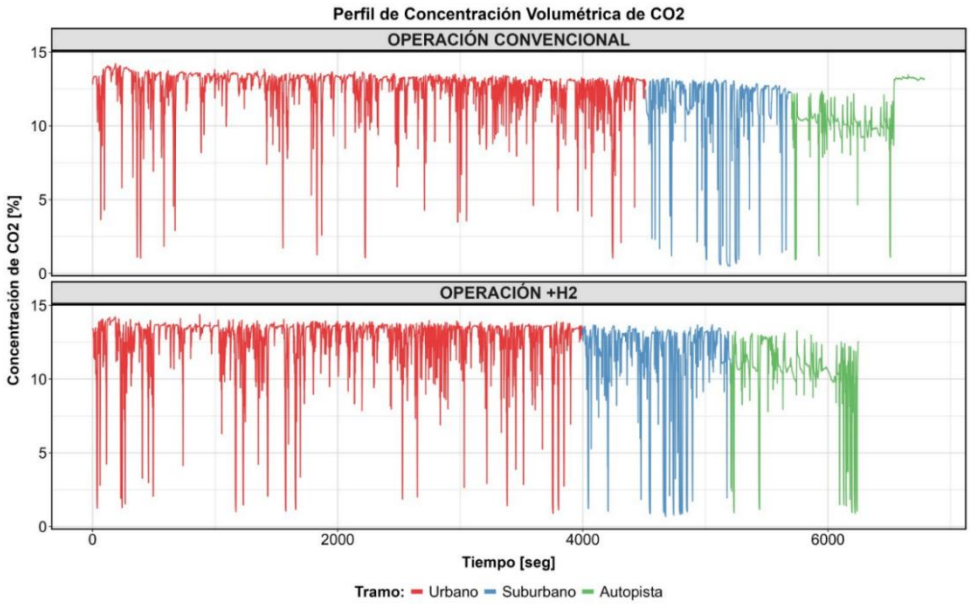


En la condición de operación convencional la concentración volumétrica de O_2 tuvo mayor variación con numerosos máximos cercanos al 17 % en particular en los tramos urbano y suburbano. Este comportamiento sugiere que parte del oxígeno admitido no tomó parte en el proceso de combustión y fue arrojado con los gases de escape. Con la introducción de hidrógeno se redujo mucho la concentración de O_2, que durante la mayor parte del recorrido se mantuvo por debajo del 2 %, alcanzando valores máximos cercanos al 5 %. Este comportamiento indica que se está utilizando mejor el oxígeno durante la combustión, lo que ayuda a que los gases de escape se oxiden mejor.

4.5.2.2 Perfil de concentración volumétrica de CO_2

A continuación, se analiza el perfil de concentración volumétrica del dióxido de carbono (CO_2), presentado en la Figura 105. Esta representación permite evaluar las variaciones instantáneas del CO_2 a lo largo de la ruta y relacionarlas con la eficiencia del proceso de oxidación del combustible.

Figura 105. *Concentración volumétrica de CO_2*

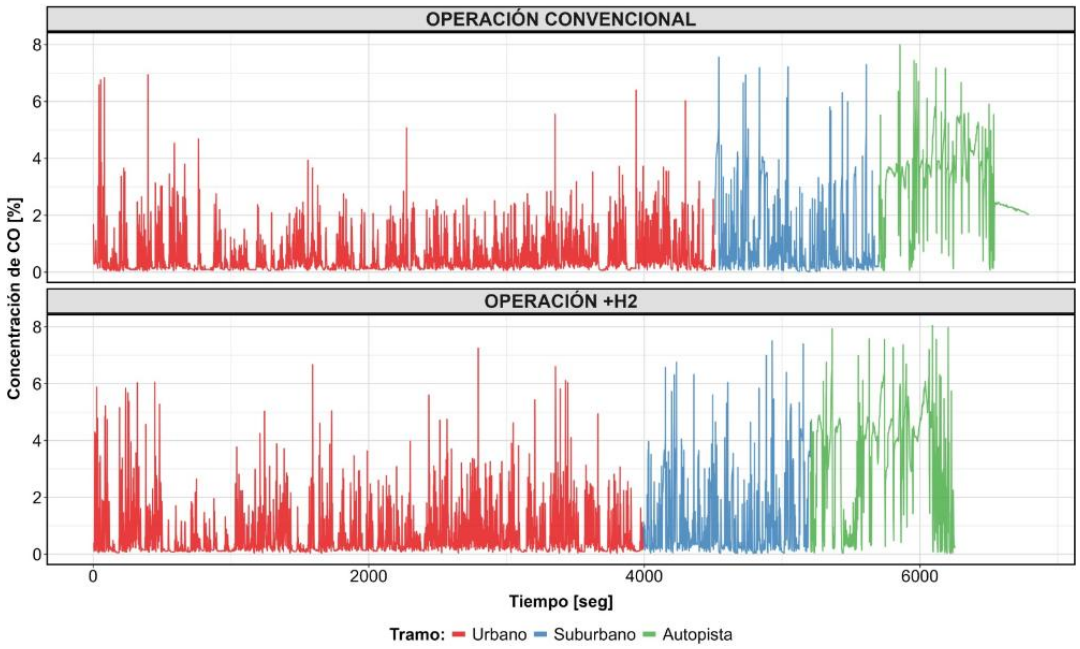


En la operación convencional, la concentración volumétrica de CO_2 se mantuvo generalmente entre 12 y 14 %, alcanzando sus valores más elevados durante el ralentí o a baja carga, mientras que, durante los tramos urbano, suburbano y de autopista existieron variaciones en función de la demanda del motor. Con la implementación de hidrógeno, la concentración de CO_2 presentó un ligero incremento y un comportamiento más estable durante gran parte del recorrido. Este resultado indica una mejor oxidación del carbono del combustible, comportamiento consistente con la disminución del oxígeno residual observada en el apartado anterior. Hacia el final del tramo de autopista también se registraron variaciones más pronunciadas, relacionadas con las oscilaciones del factor lambda descritas previamente.

4.5.2.3 Perfil de concentración volumétrica de CO

Posteriormente, se analiza el perfil de concentración volumétrica del monóxido de carbono (CO), presentado en la Figura 106. Esta representación permite identificar las variaciones instantáneas del CO y su relación con las condiciones de combustión durante el recorrido.

Figura 106. *Concentración volumétrica de CO*

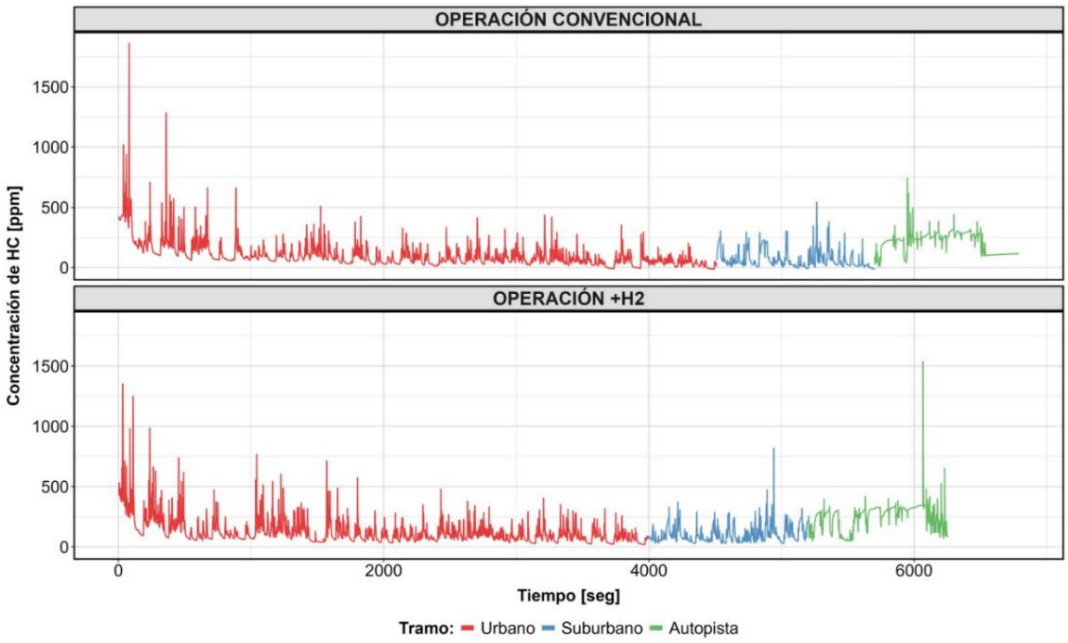


En el ensayo de operación convencional, la concentración volumétrica de CO permaneció la mayor parte del recorrido alrededor del 2 %, aunque se registraron valores máximos próximos al 7–8 %, principalmente en los tramos suburbano y de autopista. Estas variaciones estuvieron relacionadas con los cambios de carga del motor asociados a la demanda de potencia del vehículo. Con la implementación de hidrógeno, la concentración de CO presentó un ligero incremento, observándose una mayor frecuencia de valores comprendidos entre 2 y 5 % y máximos cercanos al 8 %, especialmente en autopista. De igual manera, al final de este tramo se identificaron mayores fluctuaciones, asociadas al comportamiento del factor lambda registrado durante esa misma sección del recorrido.

4.5.2.4 Perfil de concentración volumétrica de HC

Seguidamente, se analiza el perfil de concentración volumétrica de los hidrocarburos no quemados (HC), presentado en la Figura 107. Esta representación permite evaluar la presencia de combustible que no completó el proceso de combustión bajo las diferentes condiciones de operación.

Figura 107.*Concentración volumétrica de HC*



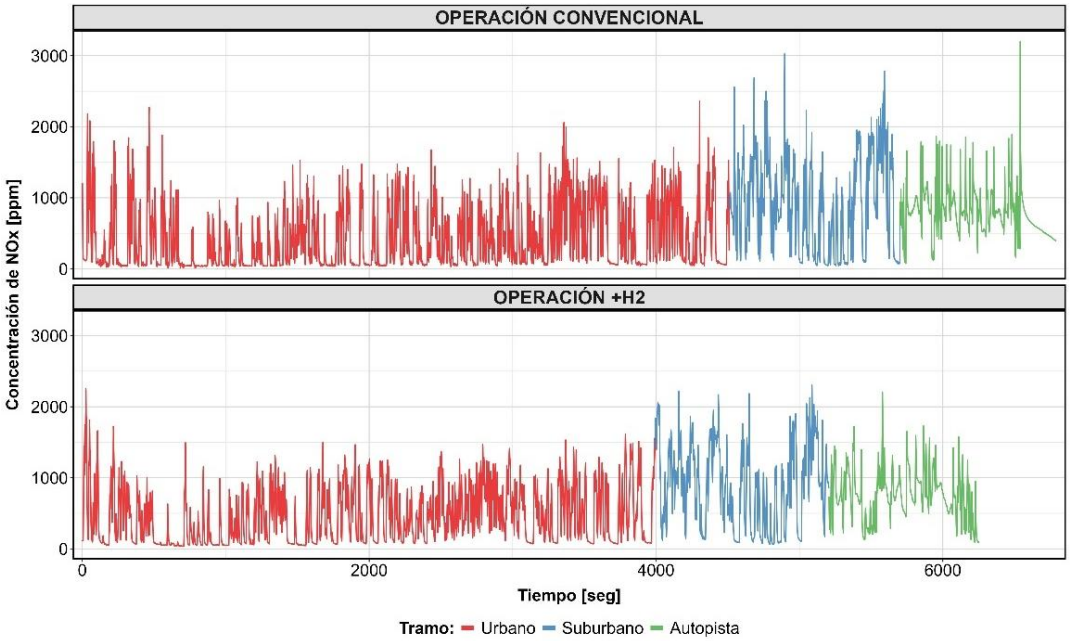
En la operación convencional, la concentración volumétrica de HC disminuyó progresivamente después del inicio del recorrido, manteniéndose generalmente por debajo de 500 ppm durante la mayor parte del ensayo, sin embargo, al inicio del recorrido se identificaron incrementos transitorios cercanos a 1800 ppm, mientras que en el tramo de autopista se registraron valores próximos a 750 ppm, estas variaciones se relacionaron con los cambios de carga y las demandas de potencia experimentadas por el motor durante la conducción.

Con la incorporación de hidrógeno, el comportamiento global de la concentración de HC mantuvo una tendencia similar, aunque se observó una mayor frecuencia de fluctuaciones y los valores máximos alcanzaron aproximadamente 800 ppm en el tramo suburbano y 1500 ppm en autopista. Estas variaciones coinciden con los cambios observados en el factor lambda dentro de esos mismos intervalos de operación y pueden asociarse a incrementos puntuales de hidrocarburos no quemados durante condiciones transitorias.

4.5.2.5 Perfil de concentración volumétrica de NOx

Finalmente, se analiza el perfil de concentración volumétrica de los óxidos de nitrógeno (NOx), presentado en la Figura 108. Su evaluación permite identificar la respuesta de este contaminante frente a las variaciones de carga, temperatura y mezcla aire-combustible durante el recorrido.

Figura 108. *Concentración volumétrica de NOx*



En la operación convencional, la concentración volumétrica de NOx presentó una gran variabilidad durante todo el recorrido, con valores comprendidos generalmente entre 500 y 2000 ppm y máximos transitorios próximos a 3200 ppm, principalmente en el tramo de autopista, asociados a condiciones de mayor carga y temperatura de combustión. Con la implementación de hidrógeno, la concentración de NOx disminuyó tanto en magnitud como en la frecuencia de estos máximos, registrando valores predominantes entre 500 y 1500 ppm y máximos cercanos a 2200 ppm. Al final del tramo de autopista se identificaron también fluctuaciones asociadas a las variaciones del factor lambda, lo que indica la influencia de las condiciones de mezcla sobre la formación de este contaminante. En este sentido, la incorporación de hidrógeno mostró menor concentración de NOx en determinadas condiciones operativas, particularmente en aquellas asociadas a los mayores valores registrados durante el ensayo convencional.

Los valores de concentración volumétrica obtenidos fueron posteriormente procesados para la determinación de las tasas y de los factores de emisión correspondientes. A partir de estas variables se generaron los mapas de motor, que permiten analizar la distribución de las emisiones en función del régimen de giro y del par motor, así como identificar las zonas de operación donde se concentran los mayores niveles de emisión para cada condición evaluada.

4.6 Mapas de motor de consumo de combustible y emisiones

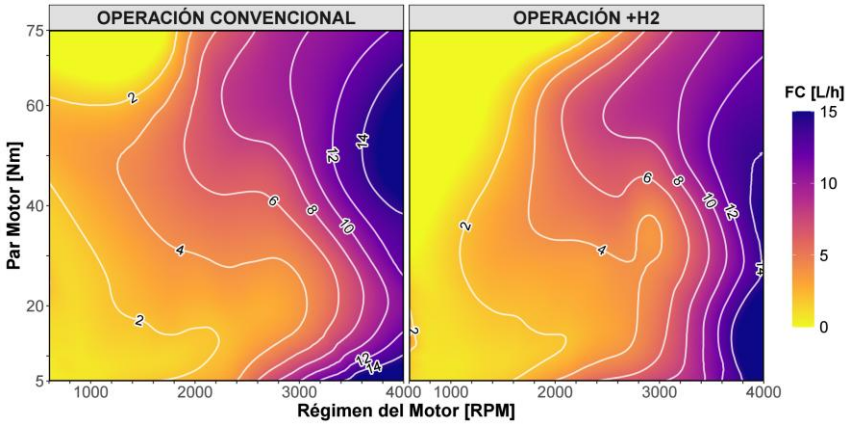
Una vez analizados los perfiles instantáneos de concentración volumétrica de los gases de escape, se representaron el consumo de combustible y las emisiones mediante mapas de motor, los cuales muestran su distribución en función del régimen de giro y del par motor, considerando los puntos de operación registrados durante la ruta de ensayo.

A diferencia de los análisis anteriores, organizados por tramos de conducción, los mapas de motor combinan los datos de todo el recorrido sin diferenciar los segmentos urbano, suburbano y autopista. De esta manera, es posible obtener una visión global del comportamiento del motor dentro de las diferentes zonas de funcionamiento. En primer lugar, se analizaron las tasas de consumo y emisiones; posteriormente, se evaluaron los indicadores de desempeño energético, como la eficiencia térmica al freno (BTE), el consumo específico de combustible al freno (BSFC) y las emisiones generadas por unidad de energía.

4.6.1 Mapas de motor de tasas de consumo y emisiones

Los mapas de tasas muestran la distribución del consumo de combustible y de las emisiones instantáneas dentro del rango de operación del motor. La Figura 109 presenta el mapa correspondiente a la tasa de consumo de combustible para ambas condiciones de ensayo.

Figura 109. *Mapa de motor de la tasa de Consumo de combustible (FC)*

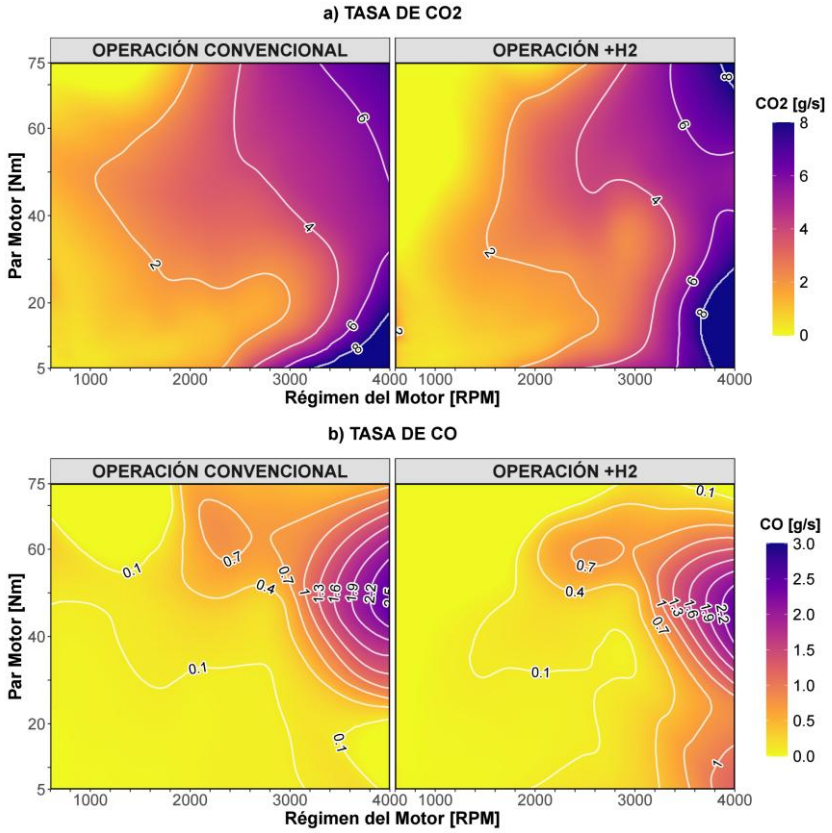


En esta representación se observa que la condición con hidrógeno presentó una distribución de consumo diferente respecto al ensayo convencional. En este último, las zonas de mayor consumo se extendieron principalmente entre 3000 y 4000 RPM, especialmente a medida que aumentó el par motor, alcanzando valores entre 10 y 14 L/h. Con la inyección de hidrógeno, estas

regiones se concentraron principalmente en regímenes de giro más elevados, mientras que una mayor proporción del mapa permaneció dentro de rangos de consumo bajos e intermedios, comprendidos entre 2 y 6 L/h. En consecuencia, las zonas asociadas con los mayores consumos presentaron una distribución más localizada dentro del rango operativo analizado.

A continuación, Figura 110 muestra los mapas correspondientes a las tasas de emisión de CO_2 y CO, permitiendo analizar la distribución de ambos contaminantes y establecer las variaciones presentadas entre la operación convencional y la incorporación de hidrógeno.

Figura 110. *Mapas de motor de tasas de emisiones de CO2 y CO*



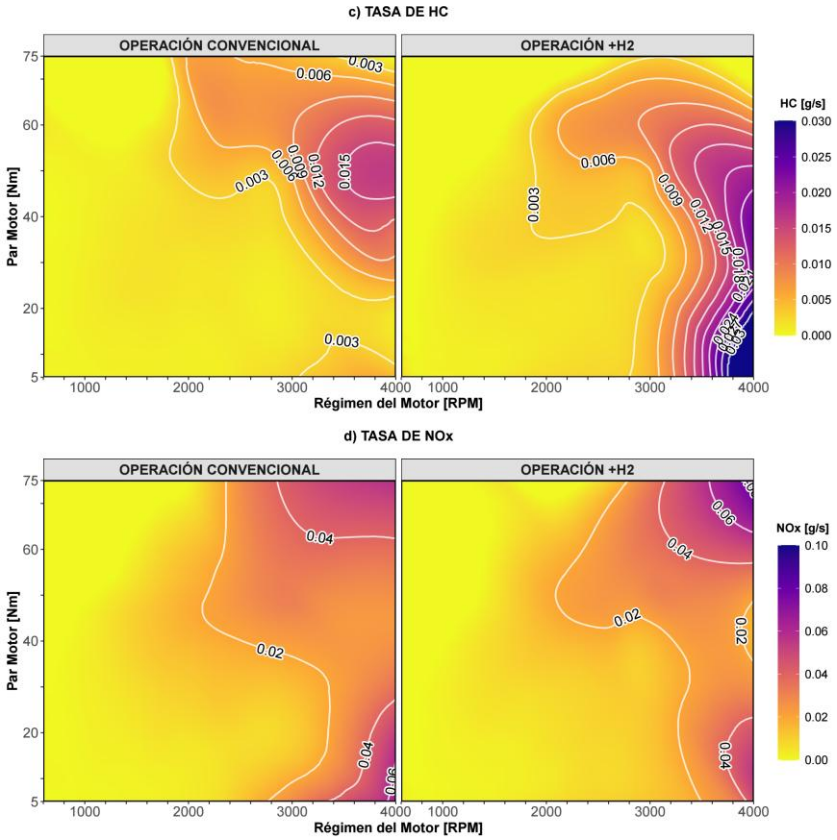
Para la tasa de CO_2, la condición con hidrógeno registró valores superiores respecto a la operación convencional. En ambos casos, las mayores emisiones se concentraron entre 4 y 6 g/s a regímenes comprendidos entre 3000 y 4000 RPM. No obstante, durante la operación con hidrógeno se identificaron tasas cercanas a 8 g/s y regiones de mayor intensidad que ocuparon una superficie más amplia en los regímenes elevados.

En la tasa de CO también se registraron incrementos bajo la condición con hidrógeno. Durante la operación convencional, las mayores emisiones se localizaron principalmente en zonas

de alto régimen y par motor medio-alto, con tasas cercanas a 0.4 g/s. Con la incorporación de hidrógeno, estas regiones aumentaron su intensidad y se desplazaron hacia valores comprendidos entre 0.7 y 1 g/s, principalmente entre 3500 y 4000 RPM.

De manera similar, la Figura 111 presenta los mapas correspondientes a las tasas de emisión de HC y NOx, permitiendo comparar la distribución de ambos contaminantes bajo las mismas condiciones de ensayo.

Figura 111. *Mapas de motor de tasas de emisiones de HC y NOx*



En la tasa de HC, las principales diferencias se concentraron en los regímenes elevados del motor. En la condición convencional, las mayores emisiones alcanzaron aproximadamente 0.015 g/s entre 3200 y 4000 RPM con par motor medio y alto. Con la incorporación de hidrógeno, la región de mayor intensidad se amplió hacia el extremo inferior derecho del mapa, alcanzando valores cercanos a 0.03 g/s, especialmente bajo condiciones de par motor bajo y medio.

Para la tasa de NOx, el ensayo convencional presentó incrementos moderados hacia el extremo derecho del mapa, con valores entre 0.04 y 0.06 g/s en zonas comprendidas entre 3000 y 4000 RPM y diferentes niveles de par motor. Por su parte, la condición con hidrógeno registró

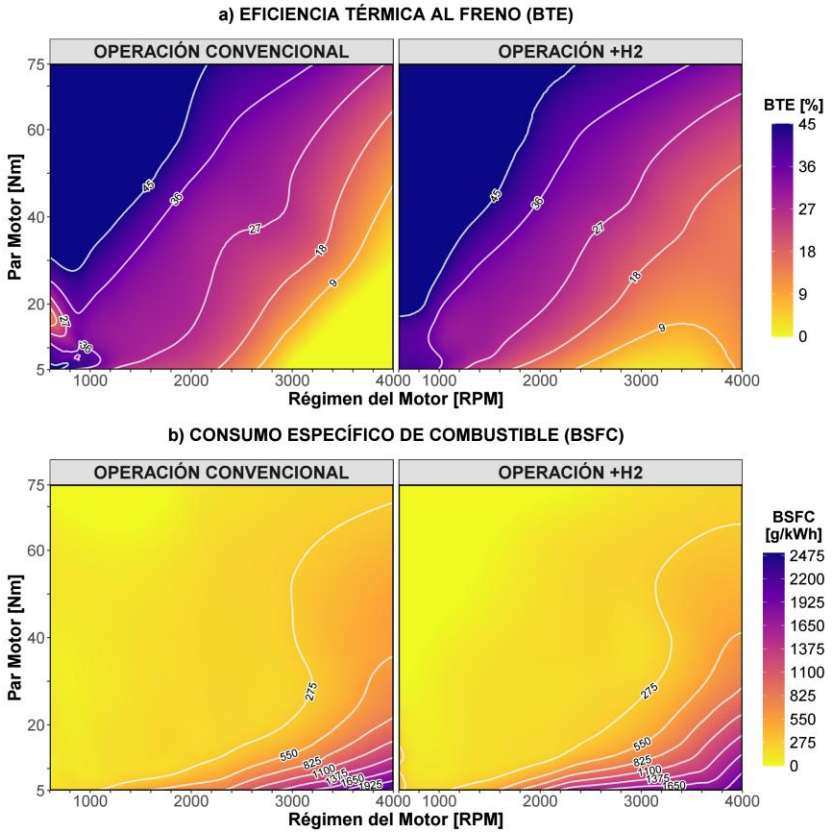
valores próximos a 0.06 g/s principalmente en zonas de alto régimen y par motor elevado, observándose una región más extensa de alta intensidad.

En conjunto, las tasas de emisión registraron incrementos para los cuatro contaminantes bajo determinadas condiciones de operación.

4.6.2 Mapas de motor de Consumo y emisiones específicas

Como complemento al análisis de tasas, se evaluó el comportamiento del motor mediante indicadores relacionados con la potencia generada. Este enfoque relaciona el consumo de combustible y las emisiones con el trabajo útil producido por el motor. Para ello, se analizaron la eficiencia térmica al freno, el consumo específico de combustible al freno y las emisiones específicas. La Figura 112 presenta los mapas de BTE y BSFC para ambas condiciones de estudio.

Figura 112. *Mapas de motor de eficiencia térmica y consumo de combustible efectivo*



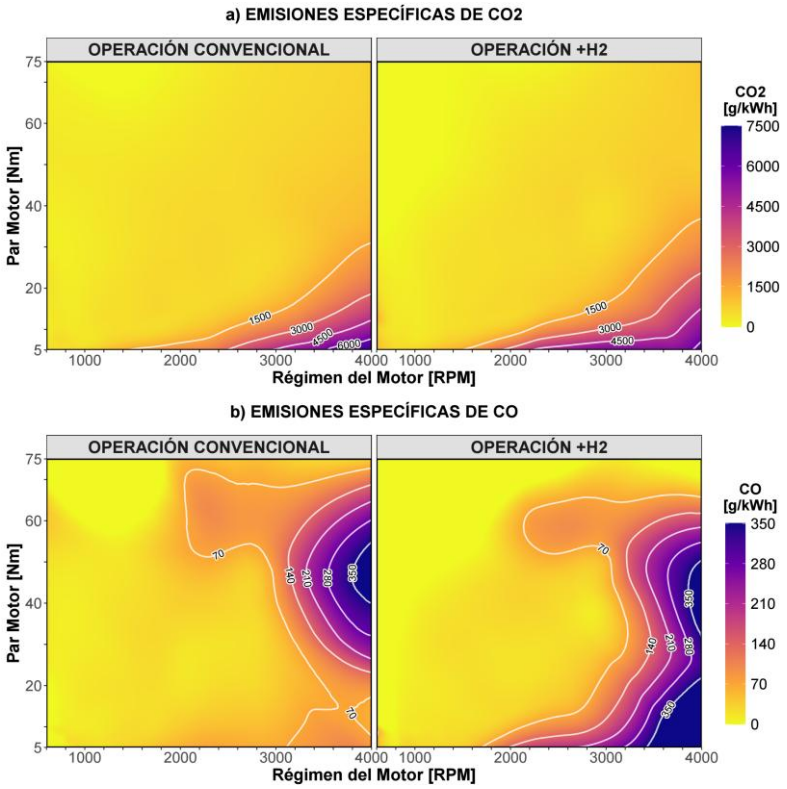
En el caso del BTE, las zonas de mayor eficiencia se localizaron principalmente en regímenes bajos y valores elevados de par motor, alcanzando aproximadamente el 45 %. Bajo la condición con hidrógeno, estas regiones abarcaron una mayor proporción de las zonas de operación intermedia, especialmente entre 1200 y 3000 RPM y con valores medios de par motor.

En consecuencia, la operación con hidrógeno presentó valores ligeramente superiores de eficiencia respecto al ensayo convencional; sin embargo, este comportamiento se concentró en determinadas condiciones de funcionamiento y no se extendió de manera uniforme a todo el rango operativo del motor.

En cuanto al BSFC, la condición con hidrógeno mostró una reducción en determinadas regiones del mapa respecto a la operación convencional, aunque su comportamiento estuvo condicionado por el régimen de giro y el par motor. En ambas condiciones, los valores más elevados se concentraron en zonas de alto régimen y bajo par motor, principalmente entre 3500 y 4000 RPM. No obstante, durante la operación con hidrógeno disminuyó la extensión de las regiones de mayor consumo específico, pasando de aproximadamente 1925 a 1650 g/kWh, mientras que aumentaron ligeramente las áreas asociadas a valores bajos e intermedios comprendidos entre 275 y 825 g/kWh.

Posteriormente, la Figura 113 presenta los mapas de emisiones específicas de CO_2 y CO. Esta representación complementa el análisis anterior al relacionar la cantidad de gases emitida con la energía producida por el motor.

Figura 113. *Mapas motor de emisiones específicas efectivas de CO_2 y CO*

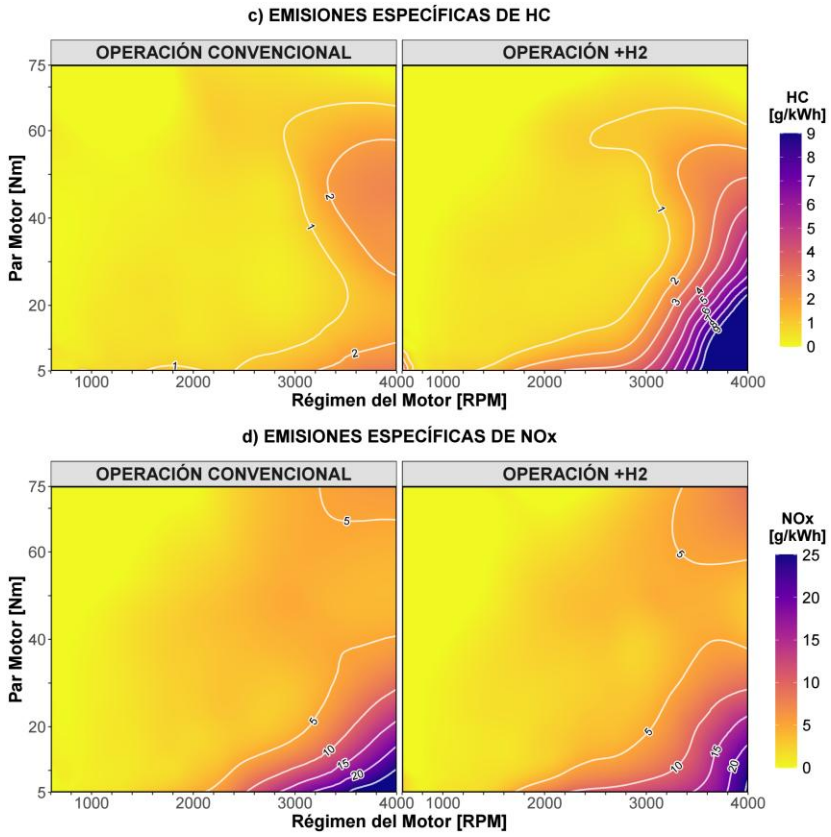


Para las emisiones específicas de CO_2, la condición con hidrógeno presentó regiones más extensas por encima de 1500 g/kWh respecto al ensayo convencional. En ambos mapas, las mayores emisiones se concentraron principalmente entre 3000 y 4000 RPM, especialmente bajo condiciones de bajo par motor.

Las emisiones específicas de CO también aumentaron durante la operación con hidrógeno. Las regiones de mayor emisión ocuparon una superficie más amplia entre 3000 y 4000 RPM, donde se registraron valores comprendidos entre 140 y 350 g/kWh. En la condición convencional, estas zonas fueron más reducidas y predominaron emisiones de similar magnitud, concentradas en áreas más localizadas del mapa.

De igual forma, la Figura 114 presenta los mapas de emisiones específicas de HC y NOx, permitiendo comparar su distribución bajo las mismas condiciones de ensayo.

Figura 114. *Mapas motor de emisiones específicas efectivas de HC y NOx*



Para las emisiones específicas de HC, la condición con hidrógeno registró valores superiores respecto al ensayo convencional, especialmente en regímenes elevados del motor. En ambas condiciones, las mayores emisiones se concentraron entre 3000 y 4000 RPM y bajo

condiciones de bajo par motor. Sin embargo, con la incorporación de hidrógeno aumentó considerablemente la extensión de las regiones de mayor emisión, alcanzando valores cercanos a 9 g/kWh. Durante la operación convencional predominaron valores inferiores a 4 g/kWh, mientras que las zonas de mayor intensidad permanecieron más localizadas hacia el extremo derecho del mapa.

En cuanto a las emisiones específicas de NOx, la condición con hidrógeno presentó un incremento moderado respecto a la operación convencional. Se identificaron regiones más extensas alrededor de 5 g/kWh, principalmente entre 3000 y 4000 RPM y bajo condiciones de par motor elevado. En la condición convencional, por otra parte, se registraron de manera localizada valores de hasta 20 g/kWh en zonas caracterizadas por altos regímenes y bajos niveles de par, donde las emisiones alcanzaron valores superiores a los obtenidos con hidrógeno.

La interpretación de los mapas de motor se complementa con el análisis del rendimiento general del vehículo, considerando la relación entre la mezcla aire-combustible, las tasas instantáneas de emisión, los indicadores específicos y las condiciones de operación registradas durante los ensayos.

4.7 Comparativa de emisiones y consumo de combustible

Tras realizarse la comparativa de operación del motor y del vehículo mediante los mapas de motor, se complementó el análisis mediante una comparación estadística de las variables registradas durante la ruta de estudio. Para ello, se emplearon diagramas de cajas y bigotes junto con tablas de estadísticos descriptivos, con el propósito de identificar la variación de los datos en cada tramo de conducción.

Bajo este enfoque, en primer lugar, se evaluaron las tasas de consumo de combustible y emisiones contaminantes, seguidas de los indicadores de rendimiento y emisiones específicas. En cada caso se representaron los valores: mínimo, primer cuartil, mediana, media aritmética, tercer cuartil, máximo y media aritmética. La media se representó mediante una marca en forma de rombo, facilitando su identificación dentro de cada diagrama.

4.7.1 Comparativa de tasas de consumo y emisiones por tramos

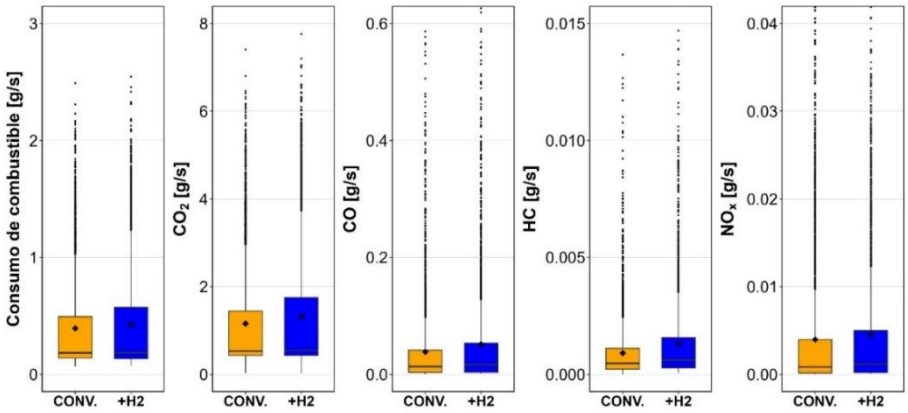
En este apartado, se evaluaron las tasas de consumo de combustible y emisiones contaminantes. Estas variables permiten cuantificar el combustible consumido y los gases emitidos

por unidad de tiempo. El análisis comparó los ensayos de operación convencional y operación con hidrógeno en los tramos urbano, suburbano, autopista y en la ruta completa mediante diagramas de cajas y bigotes acompañados de tablas de estadísticos descriptivos.

4.7.1.1 Variación en tramo urbano

La Figura 115 presenta la distribución de las tasas de consumo de combustible y de las emisiones de CO_2, CO, HC y NOx correspondientes al tramo urbano para ambas condiciones de ensayo.

Figura 115. *Distribución de tasas de consumo y emisiones del tramo urbano*



Los valores estadísticos descriptivos del tramo urbano se presentan en la Tabla 27. Los valores completos obtenidos de la gráfica de cajas y bigotes pueden consultarse en el Anexo 5.

Tabla 27. *Resumen estadístico del consumo de combustible y emisiones del tramo urbano*

	Mediana		Media		Máximo	
Variable	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
FC (g/s)	0.18	0.19	0.39	0.43	2.49	2.55
CO_2 (g/s)	0.53	0.54	1.16	1.32	7.41	7.76
CO (g/s)	0.01	0.02	0.04	0.05	1.57	2.22
HC (mg/s)	0.48	0.61	0.91	1.32	21.89	26.34
NOx (mg/s)	0.84	1.17	3.98	4.53	50.39	61.30

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno.
H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

En el tramo urbano, la condición con hidrógeno presentó incrementos en todas las variables analizadas. La tasa de consumo de combustible aumentó ligeramente, con medianas de 0.18 y 0.19 g/s y medias de 0.39 y 0.43 g/s para la condición convencional y con hidrógeno, respectivamente.

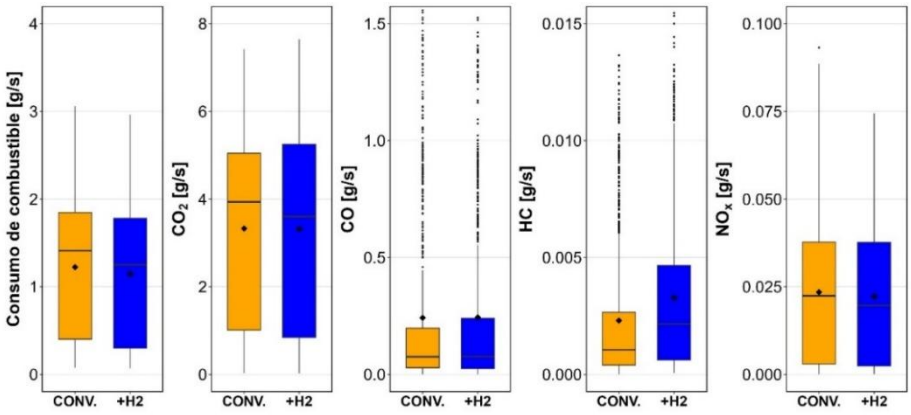
El CO_2 también registró valores superiores, pasando de 0.53 a 0.54 g/s en mediana y de 1.16 a 1.32 g/s en media.

Las emisiones de CO, HC y NOx siguieron la misma tendencia. El CO duplicó su mediana de 0.01 a 0.02 g/s, mientras que los HC aumentaron de 0.48 a 0.61 mg/s en mediana y de 0.91 a 1.32 mg/s en media. Por su parte, el NOx pasó de 0.84 a 1.17 mg/s en mediana y de 3.98 a 4.53 mg/s en media. Los valores máximos también fueron superiores para todas las variables, indicando mayores tasas instantáneas de consumo y emisiones durante este tramo.

4.7.1.2 Variación en tramo suburbano

La Figura 116 presenta la distribución de las tasas de consumo de combustible y emisiones correspondientes al tramo suburbano.

Figura 116. *Distribución de tasas de consumo y emisiones del tramo suburbano*



Los valores estadísticos descriptivos de este tramo se resumen en la Tabla 28. Los valores completos obtenidos de la gráfica de cajas y bigotes pueden consultarse en el Anexo 6.

Tabla 28. *Resumen estadístico del consumo de combustible y emisiones del tramo suburbano*

	Mediana		Media		Máximo	
Variable	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
FC (g/s)	1.41	1.25	1.22	1.15	3.06	2.96
CO_2 (g/s)	3.93	3.60	3.33	3.32	7.42	7.64
CO (g/s)	0.08	0.08	0.24	0.24	2.65	2.42
HC (mg/s)	1.05	2.16	2.31	3.27	16.84	26.89
NOx (mg/s)	22.38	19.67	23.45	22.24	93.17	74.41

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno.
H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

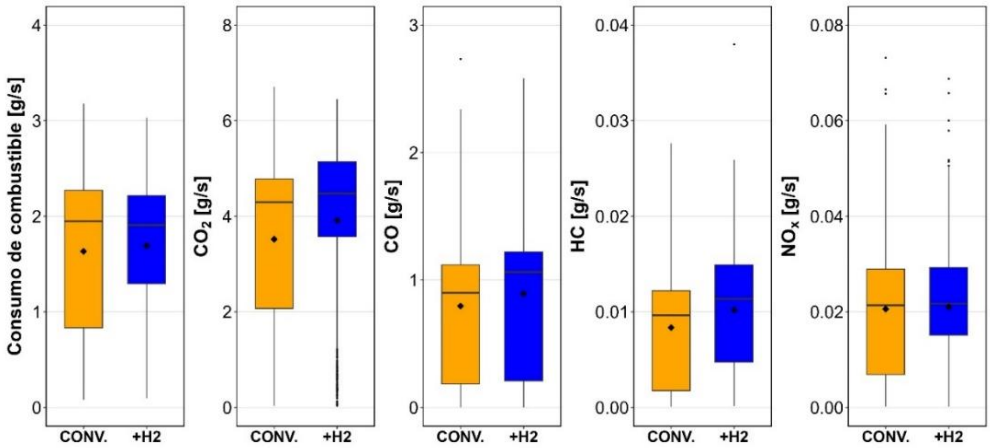
En el tramo suburbano, la tasa de consumo de combustible disminuyó de 1.41 a 1.25 g/s en mediana y de 1.22 a 1.15 g/s en media. El CO_2 también presentó una reducción en la mediana, de 3.93 a 3.60 g/s, mientras que la media permaneció prácticamente constante. De igual forma, el NOx disminuyó tanto en la mediana como en la media, pasando de 22.38 a 19.67 mg/s y de 23.45 a 22.24 mg/s, respectivamente.

Sin embargo, las emisiones de HC aumentaron de forma notable, con medianas de 1.05 y 2.16 mg/s y medias de 2.31 y 3.27 mg/s para la condición convencional y con hidrógeno. El CO mantuvo prácticamente los mismos valores centrales, aunque presentó una ligera reducción en el valor máximo. En conjunto, este tramo concentró las principales reducciones observadas en consumo de combustible, CO_2 y NOx, acompañadas por incrementos en HC.

4.7.1.3 Variación en tramo autopista

La Figura 117 presenta la distribución de las tasas de consumo de combustible y emisiones correspondientes al tramo de autopista.

Figura 117. *Distribución de tasas de consumo y emisiones del tramo de autopista*



Los valores estadísticos descriptivos obtenidos para este tramo se presentan en la Tabla 29. Los valores completos obtenidos de la gráfica de cajas y bigotes pueden consultarse en el Anexo 7.

Tabla 29. *Resumen estadístico del consumo de combustible y emisiones del tramo de autopista*

	Mediana		Media		Máximo	
Variable	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
FC (g/s)	1.95	1.91	1.63	1.69	3.18	3.03
CO_2 (g/s)	4.29	4.48	3.52	3.91	6.71	6.45
CO (g/s)	0.90	1.06	0.80	0.89	2.73	2.58
HC (mg/s)	9.65	11.36	8.36	10.20	27.66	86.73
NOx (mg/s)	21.37	21.76	20.60	21.04	73.15	68.76

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno.
H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

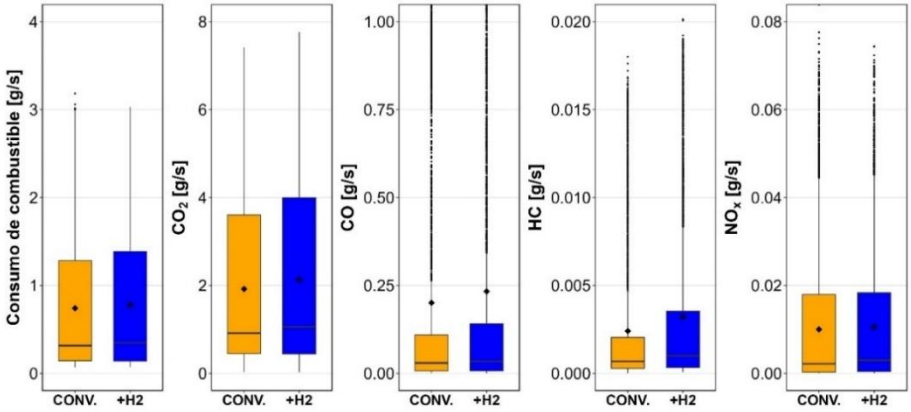
En el tramo de autopista, la inyección de hidrógeno no generó una reducción general de las variables evaluadas. La tasa de consumo disminuyó ligeramente en la mediana, de 1,95 a 1,91 g/s; sin embargo, la media aumentó de 1,63 a 1,69 g/s. El CO_2 siguió una tendencia ascendente, tanto en la mediana como en la media, al pasar de 4,29 a 4,48 g/s y de 3,52 a 3,91 g/s, respectivamente.

El CO y los HC también registraron incrementos bajo la condición con hidrógeno. La variación más marcada correspondió a los HC, cuyo valor máximo pasó de 27,66 a 86,73 mg/s. En el caso del NOx, las diferencias fueron menores, aunque tanto la mediana como la media presentaron valores ligeramente superiores. Este tramo concentró las mayores tasas instantáneas de consumo y emisiones del recorrido, lo que refleja una respuesta más elevada del motor bajo las condiciones de operación propias de la autopista.

4.7.1.4 Variación en ruta completa

La ruta completa combina los resultados de los tramos urbano, suburbano y autopista, permitiendo evaluar el comportamiento global del vehículo durante todo el recorrido. La Figura 118 presenta la distribución de las tasas de consumo de combustible y emisiones correspondientes a la totalidad de la ruta.

Figura 118. *Distribución de tasas de consumo y emisiones de la ruta completa*



Los valores estadísticos correspondientes a la ruta completa se presentan en la Tabla 30. Los valores completos obtenidos de la gráfica de cajas y bigotes pueden consultarse en el Anexo 8.

Tabla 30. *Valores estadísticos del consumo de combustible y emisiones de la ruta completa*

	Mediana		**Media**		**Máximo**	
Variable	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
FC (g/s)	0.32	0.35	0.74	0.78	3.18	3.03
CO_2 (g/s)	0.91	1.06	1.92	2.13	7.42	7.76
CO (g/s)	0.03	0.03	0.20	0.23	2.73	2.58
HC (mg/s)	0.68	1.00	2.41	3.22	27.66	86.73
NOx (mg/s)	2.16	2.96	10.00	10.58	93.17	74.41

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno. H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

En el recorrido completo, la condición con hidrógeno presentó incrementos en los valores centrales de la tasa de consumo de combustible y de las emisiones evaluadas. La tasa de consumo pasó de 0,32 a 0,35 g/s en la mediana y de 0,74 a 0,78 g/s en la media. De forma similar, el CO_2 aumentó de 0,91 a 1,06 g/s en la mediana y de 1,92 a 2,13 g/s en la media.

Los cambios más pronunciados correspondieron a los HC. La mediana aumentó de 0,68 a 1,00 mg/s, mientras que la media pasó de 2,41 a 3,22 mg/s. Además, esta variable alcanzó el valor máximo más elevado de la campaña experimental, con 86,73 mg/s. Aunque algunos valores máximos de CO y NOx fueron inferiores a los registrados bajo la condición convencional, las medias y medianas mostraron una tendencia general hacia mayores tasas instantáneas de consumo y emisiones durante la operación con hidrógeno.

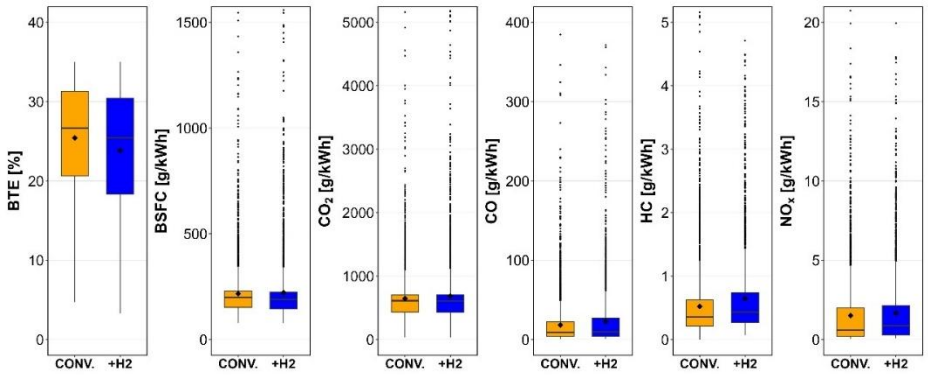
4.7.2 Comparativa de rendimiento y emisiones específicas efectivas por tramos

Después de analizar las tasas de consumo de combustible y emisiones, se evaluó el rendimiento del vehículo en función de la potencia efectiva, correspondiente a la potencia disponible a la salida del cigüeñal. De esta manera, fue posible relacionar el consumo de combustible y las emisiones con la potencia generada por el motor. De esta forma, los resultados consideran no solo la cantidad consumida o emitida por unidad de tiempo, sino también el desempeño del motor en función del trabajo útil producido.

4.7.2.1 Variación en tramo urbano

La Figura 119 presenta la distribución de la eficiencia térmica al freno (BTE), el consumo específico de combustible al freno (BSFC) y las emisiones específicas para las condiciones de operación convencional y operación con hidrógeno en el tramo urbano.

Figura 119. *Distribución de BTE, BSFC y emisiones específicas del tramo urbano*



Los valores completos obtenidos de la gráfica de cajas y bigotes se pueden observar en el Anexo 9. La Tabla 31 presenta los principales estadísticos descriptivos para el tramo urbano.

Tabla 31. *Valores estadísticos del BTE, BSFC y emisiones específicas del tramo urbano*

	Mediana		Media		Máximo	
Variable	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
BTE (%)	26.68	25.43	25.44	23.85	35.00	35.00
BSFC (g/kWh)	199.96	190.44	217.31	221.48	1643.63	2358.52
CO_2 (g/kWh)	613.60	609.80	646.27	684.10	5163.65	7719.69
CO (g/kWh)	9.17	9.66	18.36	22.78	567.09	872.77
HC (g/kWh)	0.36	0.43	0.52	0.65	5.34	13.89
NOx (g/kWh)	0.61	0.88	1.52	1.68	24.30	24.19

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno. H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

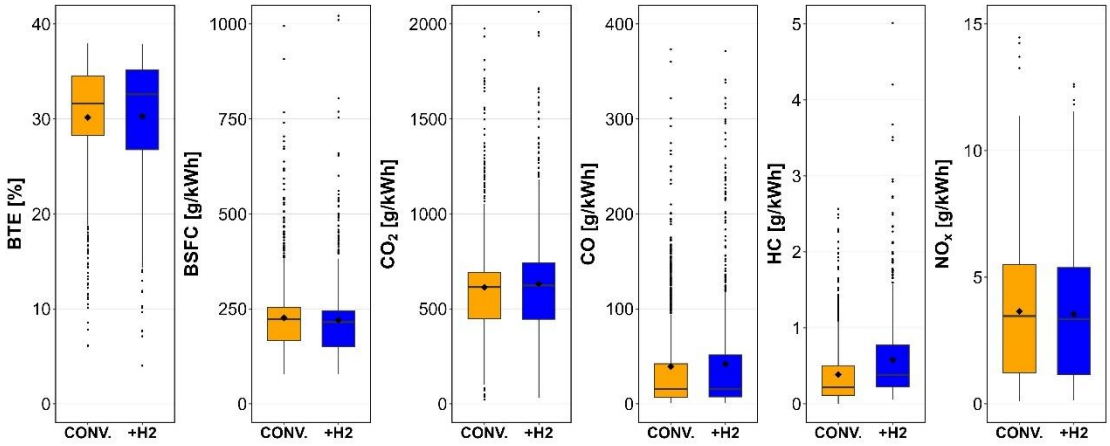
En el tramo urbano, la condición con hidrógeno presentó una ligera reducción en los indicadores de eficiencia térmica. El BTE disminuyo de 26.68 a 25.43 % en mediana y de 25.44 a 23.85 % en media. De igual manera, la mediana del BSFC disminuyó de 199.96 a 190.44 g/kWh, mientras que la media aumentó ligeramente de 217.31 a 221.48 g/kWh. Esta diferencia estuvo relacionada a la presencia de valores máximos superiores durante el ensayo con hidrógeno.

Las emisiones específicas mostraron incrementos en la mayoría de las variables analizadas. El CO_2 mantuvo una mediana similar, pasando de 613.60 a 609.80 g/kWh, mientras que la media aumentó de 646.27 a 684.10 g/kWh. Por su parte, el CO, los HC y NOx registraron incrementos tanto en la mediana como en la media. Los mayores incrementos correspondieron a los HC, cuya media aumentó de 0.52 a 0.65 g/kWh y cuyo valor máximo pasó de 5.34 a 13.89 g/kWh. En conjunto, el tramo urbano presentó aumentos en la eficiencia térmica, acompañados por incrementos en las emisiones específicas.

4.7.2.2 Variación en tramo suburbano

La Figura 120 muestra la distribución del BTE, BSFC y las emisiones específicas correspondientes al tramo suburbano.

Figura 120. *Distribución de BTE, BSFC y emisiones específicas del tramo suburbano*



Los valores completos obtenidos de la gráfica de cajas y bigotes se pueden observar en el Anexo 10. La Tabla 32 resume los estadísticos descriptivos obtenidos para ambas condiciones de operación.

Tabla 32. *Valores estadísticos del BTE, BSFC y emisiones específicas del tramo suburbano*

	Mediana		Media		Máximo	
Variable	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
BTE (%)	31.63	32.60	30.16	30.27	37.97	37.91
BSFC (g/kWh)	222.32	214.93	226.34	220.55	1275.44	1938.34
CO_2 (g/kWh)	614.32	622.83	613.34	632.53	3828.28	5025.73
CO (g/kWh)	15.74	15.32	39.16	41.94	494.83	788.92
HC (g/kWh)	0.21	0.38	0.39	0.58	2.57	8.98
NOx (g/kWh)	3.47	3.35	3.65	3.54	14.47	32.24

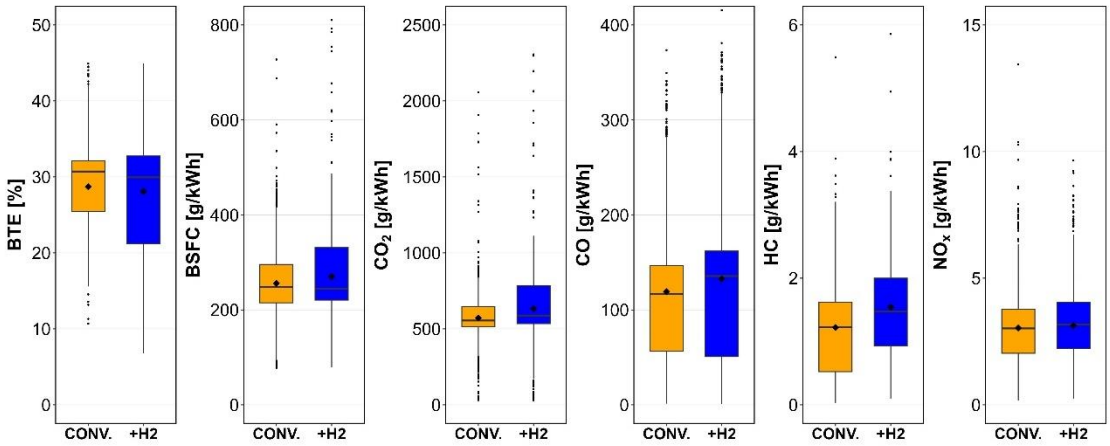
Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno. H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

En el tramo suburbano, el BTE disminuyó de 31.63 a 32.60 % en mediana y de 30.16 a 30.27% en media. De igual forma, el BSFC disminuyó tanto en la mediana como en la media, pasando de 222.32 a 214.93 g/kWh y de 226.34 a 220.55 g/kWh, respectivamente. Las emisiones específicas registraron variaciones diferentes según la variable analizada. El CO_2 aumentó en la mediana y en la media, pasando de 614.32 a 622.83 g/kWh y de 613.34 a 632.53 g/kWh, mientras que el CO presentó una ligera disminución en la mediana, de 15.74 a 15.32 g/kWh, aunque la media aumentó de 39.16 a 41.94 g/kWh. Los HC registraron incrementos en los dos indicadores, pasando de 0.21 a 0.38 g/kWh en la mediana y de 0.39 a 0.58 g/kWh en la media. Por el contrario, los NOx disminuyó ligeramente tanto en la mediana como en la media, pasando de 3.47 a 3.35 g/kWh y de 3.65 a 3.54 g/kWh, respectivamente. En términos generales, este tramo registró los mejores resultados en BTE y BSFC, a pesar de que la reducción de las emisiones específicas no fue uniforme.

4.7.2.3 Variación en tramo de autopista

La Figura 121 presenta la distribución del BTE, BSFC y las emisiones específicas correspondientes al tramo de autopista.

Figura 121. *Distribución de BTE, BSFC y emisiones específicas del tramo de autopista*



Los valores completos obtenidos de la gráfica de cajas y bigotes se pueden observar en el Anexo 11. Por su parte, los estadísticos descriptivos calculados para ambas condiciones de ensayo se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33. *Valores estadísticos del BTE, BSFC y emisiones específicas del tramo de autopista*

	Mediana		**Media**		**Máximo**	
Variable	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
BTE (%)	30.72	29.95	28.70	28.09	32.11	32.76
BSFC (g/kWh)	248.58	244.73	255.80	270.11	727.26	1146.76
CO_2 (g/kWh)	554.74	587.85	571.82	633.08	2057.15	3633.86
CO (g/kWh)	116.51	135.60	119.11	132.62	373.48	727.29
HC (g/kWh)	1.23	1.48	1.22	1.54	5.49	13.95
NOx (g/kWh)	3.02	3.17	3.03	3.13	19.18	9.65

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno. H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

En el tramo de autopista, las variaciones en los indicadores de rendimiento fueron mínimos. La mediana del BTE redujo ligeramente de 30.72 a 29.95 %, mientras que la media disminuyó de 28.70 a 28.09%. De forma similar, la mediana del BSFC se redujo de 248.58 a 244.73 g/kWh; sin embargo, la media aumentó de 255.80 a 270.11 g/kWh. Estos resultados muestran que las mejoras de los indicadores centrales fueron irregulares durante todo el tramo.

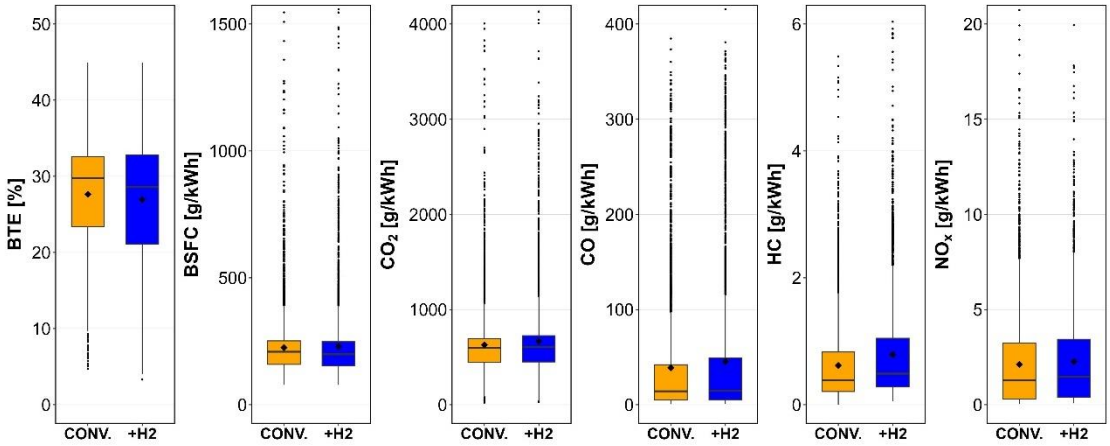
Las emisiones específicas presentaron incrementos en la mayoría de variables. El CO_2 aumentó tanto en la mediana como en la media, pasando de 554.74 a 587.85 g/kWh y de 571.82 a 633.08 g/kWh, respectivamente. De igual manera, el CO aumentó de 116.51 a 135.60 g/kWh en mediana y de 119.11 a 132.62 g/kWh en media. Los HC también registraron incrementos notables

de su valor máximo, pasando de 5.49 a 13.95 g/kWh. Por su parte, el NOx mostró variaciones mínimas, con medianas y medias ligeramente superiores durante el ensayo con hidrógeno. En términos generales, las emisiones específicas presentaron valores más elevados bajo la condición con hidrógeno.

4.7.2.4 Variación en ruta completa

La Figura 122 unifica los resultados obtenidos en los tramos urbano, suburbano y autopista, permitiendo evaluar el comportamiento global del vehículo durante todo el recorrido.

Figura 122. *Distribución de BTE, BSFC y emisiones específicas ruta completa*



Los valores completos obtenidos de la gráfica de cajas y bigotes se pueden observar en el Anexo 12. Para la ruta completa, los estadísticos descriptivos se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34. *Valores estadísticos del BTE, BSFC y emisiones específicas de la ruta completa*

	Mediana		Media		Máximo	
Variable	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
BTE (%)	29.74	28.57	27.64	26.94	44.93	44.94
BSFC (g/kWh)	208.56	198.41	225.33	229.79	1643.63	2358.52
CO_2 (g/kWh)	596.99	609.06	628.21	665.97	5163.65	7719.69
CO (g/kWh)	14.14	14.63	38.89	45.36	567.09	872.77
HC (g/kWh)	0.39	0.49	0.62	0.79	5.49	13.95
NOx (g/kWh)	1.27	1.47	2.12	2.27	24.30	32.24

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno. H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

Al considerar la ruta completa, la condición con hidrógeno presentó mejoras en los indicadores centrales de rendimiento. El BTE disminuyo de 29.74 a 28.64 % en mediana y de

27.64 a 26.94 % en media. De manera similar, la mediana del BSFC disminuyó de 208.56 a 198.41 g/kWh. No obstante, la media aumentó de 225.33 a 229.79 g/kWh debido a picos de consumo registrados durante determinados periodos de operación.

Las emisiones específicas registraron incrementos en todas las variables En el caso del CO_2, la mediana aumentó de 596,99 a 609,06 g/kWh, mientras que la media pasó de 628,21 a 665,97 g/kWh. El mismo comportamiento se presentó en el CO, los HC y el NOx, cuyos valores fueron superiores respecto a la condición convencional. La mayor variación correspondió a los HC. Su mediana se incrementó de 0,39 a 0,49 g/kWh y la media pasó de 0,62 a 0,79 g/kWh. Además, esta variable alcanzó el valor máximo más elevado de toda la campaña experimental, con 13,95 g/kWh, lo que evidencia una mayor dispersión de los resultados en determinadas condiciones de operación. El BTE presentó una mejora y la mediana del BSFC una reducción bajo la condición con hidrógeno. Sin embargo, las emisiones específicas aumentaron en todas las variables evaluadas durante el recorrido completo.

4.8 Comparativa del rendimiento del vehículo

Para finalizar el presente estudio, se comparó el desempeño global del vehículo bajo las dos condiciones de ensayo, evaluando variaciones en el consumo de combustible y emisiones contaminantes. Para ello, se utilizaron los valores promedio de los análisis estadísticos previos, incluyendo eficiencia térmica al freno, consumo específico de combustible al freno, tasa de consumo y factores de emisión específicos.

4.8.1 Valores promedio: BTE, BSFC y tasas de consumo de combustible

La Tabla 35 presenta los valores promedio correspondientes al BTE, BSFC y la tasa de consumo de combustible para cada tramo de conducción y para la ruta completa.

Tabla 35. *Valores promedio de BTE, BSFC y tasa de consumo de combustible*

	BTE (%)		BSFC (g/kWh)		FC (g/s)	
Tramo	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
Urbano	25.44	23.85	217.31	221.48	0.39	0.43
Suburbano	30.16	30.27	226.34	220.55	1.22	1.15
Autopista	28.70	28.09	255.80	270.11	1.63	1.69
Total	27.64	26.94	225.33	229.79	0.74	0.78

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno. H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

Con base en estos resultados, la Tabla 36 resume la variación porcentual registrada entre ambas condiciones de ensayo para cada una de las variables analizadas. Los incrementos se representan mediante el signo (+), mientras que las reducciones se indican con el signo (−).

Tabla 36. *Valores porcentuales de BTE, BSFC y tasa de consumo de combustible*

VARIACIÓN PORCENTUAL (%)			
Tramo	**BTE**	**BSFC**	**FC**
Urbano	-6.3	+1.9	+8.9
Suburbano	+0.4	-2.6	-6.3
Autopista	-2.1	+5.6	+3.6
Total	-2.5	+2.0	+5.0

Nota. Todos los valores de variación porcentual se analizaron con relación al ensayo de operación convencional.

Al comparar ambas condiciones de ensayo, el desempeño promedio del motor mostró diferencias según el tramo de conducción. En la ruta completa, el BTE se redujo de 27.64 a 26.94%, equivalente a una leve disminución del 2.5%. Esta reducción también se presentó en los tramos urbano y autopista, con variaciones del 6.3% y 2.1 %, respectivamente, mientras que en el tramo suburbano se obtuvo un pequeño incremento del 0.4 %. Por su parte, el BSFC mostró una tendencia diferente. En el recorrido completo, el valor promedio aumentó de 225,33 a 229,79 g/kWh, equivalente a un incremento del 2,0 %. La mayor variación se registró en el tramo de autopista, donde el BSFC aumentó un 5,6 %. El segmento suburbano presentó el comportamiento opuesto, con una reducción del 2,6 %, al pasar de 226,34 a 220,55 g/kWh.

La tasa promedio de consumo de combustible registró un incremento del 5,0 % en el recorrido completo, pasando de 0,74 a 0,78 g/s. El análisis por tramos permitió identificar que esta variación no se distribuyó de manera uniforme. En el segmento suburbano, la tasa disminuyó un 6,3 %, de 1,22 a 1,15 g/s, mientras que en los tramos urbano y de autopista se produjeron incrementos del 8,9 % y 3,6 %, respectivamente. En términos generales, las variaciones del consumo promedio dependieron de las condiciones de operación del motor en cada segmento de la ruta.

4.8.2 Valores promedio de tasas de emisión

La Tabla 37 presenta los valores promedio correspondientes a las tasas de emisión para cada tramo de conducción y para la ruta completa.

Tabla 37. *Valores promedio de las tasas de emisión*

Tasas de Emisiones Promedio (g/s)								
	CO_2		CO		HC		NOx	
Tramo	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
Urbano	1.16	1.32	0.04	0.05	0.001	0.001	0.004	0.005
Suburbano	3.33	3.32	0.24	0.24	0.002	0.003	0.023	0.022
Autopista	3.52	3.91	0.80	0.89	0.008	0.010	0.021	0.021
Total	1.92	2.13	0.20	0.23	0.002	0.003	0.010	0.011

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno. H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

Con base en estos resultados, la Tabla 38 presenta la variación porcentual de las tasas promedio de emisión. Los incrementos se representan mediante el signo (+), mientras que las reducciones se indican con el signo (−).

Tabla 38. *Variación porcentual de las tasas de emisión*

VARIACIÓN PORCENTUAL (%)				
	Tasas de Emisiones Promedio (g/s)			
Tramo	**CO_2**	**CO**	**HC**	**NOx**
Urbano	+13.9	+33.6	+45.1	+13.8
Suburbano	-0.3	+0.7	+41.6	-5.2
Autopista	+11.1	+12.3	+22.0	+2.1
Total	+11.1	+16.0	+33.6	+5.8

Nota. Todos los valores de variación porcentual se analizaron con relación al ensayo de operación convencional.

Las tasas promedio de emisión aumentaron para la mayoría de las variables analizadas. En la ruta completa, el HC presentó el mayor incremento, con un 33.6 %, seguido del CO con un 16.0 %, mientras que el CO_2 y el NOx aumentaron un 11.1 % y un 5.8 %, respectivamente.

Al evaluar el comportamiento de las emisiones en cada tramo, se determinó que el recorrido suburbano fue el único que presentó reducciones en determinados contaminantes. En este tramo, el CO_2 disminuyó un 0,3 %, mientras que los NOx registraron una reducción del 5,2 %. Sin embargo, también se observaron incrementos del 0,7 % en CO y del 41,6 % en HC.

En el tramo urbano se registraron los mayores incrementos relativos de CO, HC y NOx, con variaciones del 33,6 %, 45,1 % y 13,8 %, respectivamente. Por su parte, en el tramo de

autopista se evidenció un incremento simultáneo de las cuatro emisiones analizadas, destacándose el aumento del CO_2, con un 11,1 %, y del CO, con un 12,3 %.

En términos generales, el comportamiento de las emisiones en los diferentes tramos presentó una tendencia similar a la obtenida para el recorrido completo. La principal diferencia se presentó en el segmento suburbano, donde se registraron reducciones de CO_2 y NOx.

4.8.3 Valores promedio de factores de emisión específicos

La Tabla 39 presenta los valores promedio correspondientes a los factores de emisión específicos.

Tabla 39. *Valores promedio de los factores de emisión*

	Factores de Emisión Promedio (g/kWh)							
	CO_2		**CO**		**HC**		**NOx**	
Tramo	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
Urbano	646.27	684.10	18.36	22.78	0.52	0.65	1.52	1.68
Suburbano	613.34	632.53	39.16	41.94	0.39	0.58	3.65	3.54
Autopista	571.82	633.08	119.11	132.62	1.22	1.54	3.03	3.13
Total	628.21	665.97	38.89	45.36	0.62	0.79	2.12	2.27

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno. H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

A partir de estos resultados, la Tabla 40 resume la variación porcentual registrada para cada contaminante. Los incrementos se representan mediante el signo (+), mientras que las reducciones se indican con el signo (−).

Tabla 40. *Variación porcentual de factores de emisión energéticos*

VARIACIÓN PORCENTUAL (%)				
	Factores de Emisión Promedio (g/kWh)			
Tramo	**CO_2**	**CO**	**HC**	**NOx**
Urbano	+5.9	+24.1	+25.0	+10.5
Suburbano	+3.1	+7.1	+48.7	-3.0
Autopista	+10.7	+11.3	+26.2	+3.3
Total	+6.0	+16.6	+27.4	+7.1

Nota. Todos los valores de variación porcentual se analizaron con relación al ensayo de operación convencional.

Los factores de emisión específicos aumentaron en la mayoría de las variables evaluadas. Para la ruta completa, el CO_2 registró un incremento del 6.0 %, el CO del 16.6 %, los HC del 27.4

% y los NOx del 7.1 %. Al analizar los distintos segmentos, el CO_2 aumentó en todos los tramos, alcanzando la mayor variación en autopista con un 10.7 %. El CO también presentó incrementos en toda la ruta, mientras que los HC registraron el mayor aumento en el tramo suburbano, con un 48.7 %. Los NOx fue la única variable que disminuyó, presentando una reducción del 3.0 % en el tramo suburbano.

4.8.4 Factores de emisión y consumo de combustible por distancia

Finalmente, la Tabla 41 presenta los factores de emisión expresados en función de la distancia recorrida, junto con el consumo de combustible en L/100 km, con el propósito de complementar la evaluación del desempeño global del vehículo.

Tabla 41. *Factores de emisión por distancia y consumo de combustible*

	Factores de emisión (g/km)								Consumo Combustible (L/100km)	
	CO_2		CO		HC		NOx			
Tramo	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
Urbano	248.11	251.26	8.25	3.91	0.19	0.25	0.84	0.87	11.53	11.20
Suburbano	184.55	185.75	13.34	13.67	0.13	0.18	1.29	1.23	9.35	8.86
Autopista	184.62	193.41	47.56	44.12	0.44	0.50	1.08	1.04	11.72	11.47
Total	206.20	210.48	21.22	22.78	0.26	0.32	1.06	1.04	10.90	10.54

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno. H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

A partir de los valores anteriores, la Tabla 42 resume la variación porcentual de los factores de emisión por distancia y del consumo de combustible, tomando como referencia la condición de operación convencional.

Tabla 42. *Variación porcentual de factores de emisión y consumo de combustible*

	VARIACIÓN PORCENTUAL (%)				
	Factores de emisión - Distancia (g/km)				Consumo Combustible (L/100km)
Tramo	**CO_2**	**CO**	**HC**	**NOx**	
Urbano	+1.3	-52.6	+30.9	+2.9	-2.9
Suburbano	+0.6	+2.5	+44.2	-4.2	-5.2
Autopista	+4.8	-7.2	+15.4	-3.6	-2.1
Total	+2.1	+7.4	+24.0	-2.1	-3.3

Nota. Todos los valores de variación porcentual se analizaron con relación al ensayo de operación convencional.

Para la ruta completa, el CO_2 aumentó de 206.20 a 210.48 g/km, equivalente a un incremento del 2.1 %. De igual forma, el CO pasó de 21.22 a 22.78 g/km, con un aumento del 7.4 %, mientras que los HC se incrementaron de 0.26 a 0.32 g/km, correspondiente al 24.0 %. El NOx fue la única variable que disminuyó en el recorrido completo, con una reducción del 2.1 %.

Al analizar los diferentes tramos de conducción, se observó que las emisiones de CO_2 presentaron incrementos en todos los segmentos evaluados, siendo la mayor variación la registrada en el tramo de autopista, con un aumento del 4,8 %. Para los HC, se evidenció un aumento en todos los segmentos de conducción, con la mayor variación en el tramo suburbano, donde alcanzó el 44,2 %. En el caso de los NOx, las reducciones se concentraron en los tramos suburbano y de autopista, con disminuciones del 4,2 % y 3,6 %, respectivamente. En el tramo urbano, en cambio, se presentó un ligero incremento del 2,9 %.

Respecto al consumo de combustible, expresado en L/100 km, la inyección de hidrógeno permitió obtener reducciones en todos los tramos analizados. La mayor disminución se presentó en el tramo suburbano, con un 5,2 %, seguido del tramo urbano con un 2,9 % y la autopista con un 2,1 %. Considerando el recorrido completo, se obtuvo una reducción del consumo del 3,3 %.

En conjunto, los resultados muestran que la incorporación de hidrógeno contribuyó a reducir el consumo de combustible por distancia recorrida. Sin embargo, este comportamiento no se presentó de manera uniforme en los factores de emisión, debido a que el CO_2, el CO y los HC registraron incrementos en determinados tramos, mientras que los NOx presentaron reducciones en el recorrido suburbano y de autopista. Por tanto, la incorporación de hidrógeno generó una mejora en el consumo de combustible, pero su efecto sobre las emisiones dependió de las condiciones de conducción presentes en cada tramo.

4.8.5 Comparativa de factores de emisión de CO_2

Como se indicó en el apartado 3.8.2.3.6 del procesamiento de datos, la tasa de emisión de CO_2 también puede estimarse mediante las relaciones derivadas de la composición química del combustible. Este procedimiento se basa en la relación estequiométrica de la combustión y permite obtener una estimación de las emisiones de CO_2 a partir del consumo de combustible. En el presente estudio, este método no fue utilizado para determinar los factores de emisión finales, debido a que estos fueron calculados a partir de las mediciones realizadas por el sistema iPEMS. Su aplicación se realizó únicamente para comparar ambos procedimientos y analizar si la

reducción del consumo de combustible implica necesariamente una reducción proporcional de las emisiones de CO_2.

En la Tabla 43 se presentan los factores de emisión de CO_2 obtenidos mediante las mediciones del iPEMS y mediante el método basado en la química de la combustión.

Tabla 43. *Comparativa de factores de emisión CO_2 por distancia*

	Factores de consumo (g/km)			
	CO_2 iPEMS		CO_2 Química de la combustión	
Tramo	**Conv.**	**H_2**	**Conv.**	**H_2**
Urbano	248.11	251.26	271.00	248.15
Suburbano	184.55	185.75	178.03	176.30
Autopista	184.62	193.41	196.88	193.75
Total	206.20	210.48	216.12	206.53

Nota. Conv.: Ensayo de operación convencional o sin inyección de hidrógeno. H_2: Ensayo con inyección de gas hidrógeno en el múltiple de admisión.

En función de estos resultados, la Tabla 44 presenta la variación porcentual de los factores de emisión de CO_2 obtenidos mediante ambos métodos, tomando como referencia la condición de operación convencional.

Tabla 44. *Variación porcentual de comparativa de factores de emisión CO_2*

VARIACIÓN PORCENTUAL (%)		
Tramo	**CO_2 iPEMS**	**CO_2 Química combustión**
Urbano	+1.3	-8.4
Suburbano	+0.6	-1.0
Autopista	+4.8	-1.6
Total	+2.1	- 4.4

Nota. Todos los valores de variación porcentual se analizaron con relación al ensayo de operación convencional.

Los resultados muestran diferencias en la tendencia obtenida mediante ambos procedimientos. El método basado en la química de la combustión presentó una reducción del factor de emisión de CO_2 en todos los tramos, en concordancia con la disminución del consumo de combustible. Por su parte, las mediciones del iPEMS registraron incrementos de CO_2 en todos los segmentos, alcanzando una variación global del 2.1 %. Esta diferencia se relaciona con el

principio de cálculo de cada método. Mientras el primer procedimiento estima las emisiones a partir del consumo de combustible y de una relación H/C determinada, el iPEMS registra la concentración de CO_2 presente en los gases de escape durante la operación real del vehículo.

El método basado en la química de la combustión establece una relación definida entre el carbono contenido en el combustible y el CO_2 generado. Por esta razón, una reducción del consumo de gasolina se refleja directamente como una menor cantidad estimada de CO_2. Sin embargo, esta relación no representa por completo el comportamiento registrado experimentalmente cuando se incorpora hidrógeno, debido a que este elemento aporta energía sin incorporar carbono al combustible y modifica las condiciones en las que se desarrolla la combustión. Además, los ensayos se realizaron bajo condiciones reales y transitorias de operación, con variaciones continuas del factor λ, la carga y el régimen de giro.

Por esta razón, los factores de emisión obtenidos mediante el iPEMS y mediante la relación química no presentaron la misma tendencia. La comparación permite diferenciar entre una estimación basada en el carbono contenido en el combustible y una medición de la concentración de CO_2 presente en los gases de escape. Las posibles causas de esta diferencia se analizan con mayor detalle en el siguiente apartado de la discusión de resultados.

4.9 Discusión de resultados

Para finalizar la interpretación de los resultados obtenidos durante el estudio, se realizó un análisis conjunto de las variables evaluadas con el propósito de explicar las variaciones observadas en el consumo de combustible y las emisiones. Es importante considerar que el sistema de generación de HHO empleado poseía una producción de caudal dependiente de las condiciones de operación del motor; por esta razón, el flujo de hidrógeno inyectado no permaneció constante durante todo el recorrido, y su influencia sobre la combustión, el consumo de combustible y las emisiones estuvo relacionada con el régimen de giro, la carga y la demanda de potencia requerida en cada instante de conducción.

En cuanto al rendimiento, el BTE presentó una leve disminución en el recorrido completo bajo la condición con hidrógeno, lo que indica una menor conversión de la energía disponible en trabajo mecánico útil. El tramo suburbano fue la única excepción, con un pequeño incremento de 0.4 %. Los valores más altos de BTE se registraron en los tramos suburbano y autopista, mientras que el urbano presentó el menor valor, diferencia atribuible a los mayores períodos de detención

y bajas velocidades propios de la conducción urbana. La mayor eficiencia del tramo suburbano respecto al de autopista estuvo relacionada con las variaciones de altitud de la vía, que generaron una demanda de potencia diferente a la requerida en la autopista, donde el incremento de altitud exigió mayor potencia.

Por otra parte, el BSFC siguió una relación inversa con el BTE. Donde, en el recorrido completo, estos dos parámetros variaron de forma sutil. El BSFC aumentó un 2.0 %, mientras que el BTE disminuyó un 2.5 %, lo que indica un mayor consumo específico de combustible para generar trabajo útil. Esta tendencia se repitió en los tramos urbano y de autopista. El tramo suburbano fue nuevamente la excepción, con una leve reducción del BSFC de 2.6 % acompañada del incremento de BTE ya mencionado, confirmando la relación inversa entre ambos indicadores bajo estas condiciones de operación.

El consumo de combustible expresado en L/100 km registró una leve reducción del 3,3 % en el recorrido completo tras la incorporación de hidrógeno. Este resultado coincidió con el desplazamiento del factor λ hacia valores superiores a 1 en determinados segmentos, condición bajo la cual la ECU redujo el tiempo de inyección de gasolina sin modificar de forma significativa las condiciones generales de funcionamiento del motor.

En cuanto a las emisiones, el CO_2 tuvo un leve aumento del 2,1 % en el recorrido completo. Este comportamiento coincidió con la disminución de la concentración de O_2 residual medida a la salida del escape, lo que indicó un mayor consumo de oxígeno durante determinados períodos de combustión, condición que pudo favorecer una mayor oxidación del carbono hacia CO_2. Sin embargo, la variación del CO_2 no debe interpretarse únicamente a partir del consumo de combustible, debido a que la incorporación de H_2 aporta energía sin incorporar carbono al sistema. Esta diferencia también permite explicar el comportamiento obtenido al comparar las mediciones del iPEMS con el método basado en la química de la combustión. El método químico establece una relación directa entre el combustible consumido y el CO_2 producido a partir de su contenido de carbono y de la relación H/C. Por ello, al disminuir el consumo de gasolina, el método estima una reducción de las emisiones de CO_2. En cambio, el iPEMS mide el CO_2 presente en los gases de escape, por lo que sus resultados dependen también de las condiciones instantáneas de combustión y de las reacciones que tienen lugar en el convertidor catalítico.

Además, la incorporación de hidrógeno modifica ligeramente la composición energética de la mezcla, debido a que una pequeña parte de la energía suministrada al motor proviene de un

compuesto sin carbono. Por esta razón, el consumo de gasolina expresado en L/100 km no mantiene necesariamente una relación proporcional con la cantidad de carbono que llega al escape en forma de CO_2. A esto se suman las condiciones transitorias de operación del ensayo, durante las cuales el factor λ, la carga y el régimen del motor variaron continuamente. En consecuencia, la reducción del consumo de gasolina no representó una reducción equivalente del CO_2 medido por el iPEMS.

En el caso del CO, el recorrido completo registró un incremento del 7.4 %, aunque este contaminante disminuyó un 52.6 % en el tramo urbano y un 7.2 % en autopista. Este comportamiento estuvo relacionado con el carácter transitorio de la conducción, donde las variaciones del factor λ modificaron continuamente las condiciones de oxidación. Durante los intervalos con mezcla pobre, la mayor disponibilidad de oxígeno favoreció la oxidación del carbono hacia CO_2; en cambio, los enriquecimientos momentáneos de la mezcla producidos a mayores demandas de potencia redujeron el oxígeno disponible y favorecieron la formación de CO. Adicionalmente, la mayor velocidad de propagación de la llama del hidrógeno pudo modificar el tiempo disponible para completar determinadas reacciones de oxidación durante la combustión.

Los HC presentaron un comportamiento similar, con un incremento del 24.0 % en el recorrido total. Las variaciones del factor λ y los cambios transitorios provocaron determinados episodios de mezcla rica, limitando la oxidación completa de los hidrocarburos tanto en la cámara de combustión como en el convertidor catalítico. Como consecuencia, aumentó la cantidad de HC que alcanzó el escape sin completar su transformación hacia CO_2.

Por su parte, los NOx fueron los únicos contaminantes que disminuyeron en el recorrido completo, registrando una reducción del 2.1 %, aunque en el tramo urbano aumentaron un 2.9 %. Este comportamiento se relacionó con la respuesta térmica del convertidor catalítico observada mediante termografía. Durante el ralentí, condición predominante en el tramo urbano, la temperatura superficial subió unos 20 °C aproximadamente, lo que favoreció la formación de NOx al aumentar la temperatura de los gases de escape. Sin embargo, bajo condiciones de mayor carga la temperatura del convertidor descendió aproximadamente 21.3 °C, disminuyendo las condiciones térmicas favorables para su formación. Estas variaciones más los cambios del factor lambda y de las condiciones transitorias de la operación afectaron directamente a las reacciones del catalizador y alteraron el comportamiento de las emisiones de NOx.

Los resultados guardaron relación con los reportados por Pazmiño & Peralvo (2022), quienes asociaron los incrementos de CO y HC al efecto de descarbonización generado por la implementación de hidrógeno en la cámara de combustión, debido a la remoción de depósitos de carbonilla acumulados durante la operación del motor. No obstante, las diferencias en la magnitud de las variaciones indican que la respuesta obtenida no dependió exclusivamente de ese fenómeno, sino también del estado del motor, las condiciones de operación y el comportamiento térmico del catalizador.

El comportamiento general observado confirmó la influencia de las condiciones reales de conducción sobre el consumo y las emisiones. En este tipo de evaluación intervienen simultáneamente diversos factores y condiciones, mismo que pueden relacionarse con: el diseño del vehículo, características del conductor, el flujo de tráfico, las características de la vía, las condiciones ambientales y la altitud. Por ello, las variaciones entre los tramos urbano, suburbano y autopista no respondieron a una única condición de funcionamiento, sino a la interacción de múltiples factores que modificaron continuamente el régimen, la carga, la demanda de potencia, el factor λ y la respuesta térmica del catalizador. Esta condición permitió evaluar el efecto de la incorporación de hidrógeno bajo escenarios representativos de conducción real, diferenciándose de los ensayos de laboratorio desarrollados bajo condiciones controladas.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El análisis bibliográfico sobre la implementación de hidrógeno en motores de encendido provocado comprendió el efecto de este gas como vector energético que puede producirse mediante electrólisis para aplicaciones de operación a bordo. La literatura señala que su uso favorece el proceso de combustión, acompañado de una reducción del consumo de combustible y de las emisiones contaminantes. Tomando en cuenta estos criterios, se seleccionó e implementó una celda húmeda de electrólisis capaz de generar hidrógeno con una concentración molar del 58.91 %, un caudal promedio estimado de 21.8 L/h y un PCI equivalente a 6011.93 kJ/m³.
- La campaña experimental se realizó en Riobamba, Chimborazo, en tráfico real, con una ruta RDE de 56.28 km en tres tramos: urbano, suburbano y autopista. Se utilizaron un datalogger ELM327 con protocolo OBD-II y el equipo iPEMS parSYNC FLEX-PNC para medir variables cinemáticas, de operación y las emisiones del vehículo. El uso conjunto de ambos equipos permitió registrar simultáneamente la información de las condiciones de operación convencional e inyección de hidrógeno, manteniendo perfiles cinemáticos similares y favoreciendo la comparación de resultados.
- Se desarrollaron los mapas de motor de consumo de combustible (FC), eficiencia térmica al freno (BTE) y consumo específico de combustible al freno (BSFC), los cuales indicaron una disminución del aprovechamiento energético del motor en determinadas condiciones de operación con la implementación de hidrógeno. El FC permaneció principalmente entre 2 y 6 L/h, concentrando los mayores consumos a regímenes elevados. Además, el BTE amplió las zonas con eficiencias mayores al 27 %, mientras que el BSFC redujo las regiones de mayor consumo específico de aproximadamente 1925 a 1650 g/kWh, incrementando las áreas comprendidas entre 275 y 825 g/kWh.
- Los mapas de motor de las emisiones de CO_2, CO, HC y NOx mostraron un aumento en las zonas de mayor emisión, principalmente entre 3000 y 4000 RPM durante la operación con hidrógeno. En las tasas de emisión, el CO_2 alcanzó valores cercanos a 8 g/s, el CO aumentó de aproximadamente 0.4 a 1 g/s y los HC de 0.015 a 0.03 g/s. De forma similar,

las emisiones específicas alcanzaron valores próximos a 9 g/kWh para HC y entre 280 y 350 g/kWh para CO. En el caso de los NOx, las tasas llegaron aproximadamente a 0.06 g/s, mientras que las emisiones específicas se concentraron alrededor de 5 g/kWh, presentando una distribución diferente respecto al resto de emisiones.

- El análisis del BTE, BSFC y consumo de combustible mostró diferencias moderadas entre los dos ensayos. Durante el recorrido total, el BTE se redujo en un 2.5 %, mientras que el BSFC incrementó 2.0 %. El único aumento del BTE se obtuvo al tramo suburbano con el 0.4 % y el BSFC se redujo en un 2.6 %. Por su parte, el consumo de combustible expresado en L/100 km disminuyó en todos los tramos, siendo el suburbano el de mejor resultado con una reducción del 5.2 %, equivalente a una disminución del 3.3 % para toda la ruta.
- Los factores de emisión por distancia mostraron comportamientos diferenciados para cada gas. En el recorrido completo, el CO_2 aumentó un 2,1 %, el CO un 7,4 % y los HC un 24,0 %, mientras que los NOx disminuyeron un 2,1 %, siendo los únicos en reducirse. Por tramos, el CO_2 registró su mayor incremento en autopista con un 4,8 %; los HC, en el suburbano con un 44,2 %; y los NOx, su mayor reducción también en el suburbano con un 4,2 %. Aunque el CO aumentó en el recorrido total, disminuyó un 52,6 % en el tramo urbano y creció un 2,5 % en el suburbano. En conjunto, los NOx fueron los únicos contaminantes que presentaron una reducción global.
- El análisis del factor lambda (λ) junto con la evaluación termográfica del convertidor catalítico permitieron explicar parte de las variaciones observadas en las emisiones durante la operación con hidrógeno. El convertidor catalítico aumentó 20 °C en ralentí y disminuyó 21.3 °C a 3000 RPM, mientras que el factor λ presentó una mayor proporción de mezclas pobres en determinados tramos. Estas condiciones favorecieron la reducción de la inyección de combustible y un mayor aprovechamiento del O_2 durante la combustión. Finalmente, las variaciones transitorias de operación y del factor λ influyeron en el CO_2, CO y HC, mientras que la menor temperatura del convertidor a mayor carga contribuyó a limitar la formación de NOx.

5.2 Recomendaciones

- La evaluación de sistemas HHO puede ampliarse mediante la comparación entre celdas de electrólisis húmedas y secas, así como mediante el empleo de distintos electrolitos, como hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH), frente al bicarbonato de sodio utilizado en este estudio. Esta comparación permitirá determinar la influencia del tipo de celda y del electrolito sobre la producción de gas, su composición química y sus efectos en el consumo de combustible, las emisiones y el desempeño energético del motor.
- La metodología desarrollada mediante el uso conjunto del datalogger ELM327 y el sistema PEMS puede aplicarse en rutas ubicadas a diferentes altitudes sobre el nivel del mar para evaluar la influencia de la presión atmosférica y de la disponibilidad de oxígeno sobre el comportamiento del motor. Como complemento, futuras investigaciones podrían incorporar enfoques basados en la Potencia Específica del Vehículo (VSP) para caracterizar los estados de operación y estimar el consumo de combustible y las emisiones bajo diferentes condiciones de altitud, aspecto que no formó parte del alcance de la presente investigación.
- La variación en el rendimiento energético y emisiones se puede estudiar a mayor detalle con tramas de datos OBD-II registradas segundo a segundo, junto con la medición continua de la temperatura del escape, mediante sensores en el convertidor catalítico. Las variables permitirían evaluar las correcciones a corto y largo plazo del combustible (STFT y LTFT) y relacionar el comportamiento térmico del catalizador con la eficiencia de las reacciones de oxidación y reducción.
- El incremento de CO y HC registrado durante varios segmentos de conducción puede estudiarse mediante ensayos de larga duración, acompañados de inspecciones periódicas con boroscopio y análisis tribológicos del aceite lubricante. La evaluación de las propiedades del lubricante como viscosidad, TBN, TAN, contenido de hollín y metales de desgaste ayudaría a comprobar si existen procesos de descarbonización. Además, esto permitiría evaluar el efecto a largo plazo del uso de hidrógeno en el estado mecánico del motor.
- La Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2204, que establece los límites y procedimientos aplicables para la medición de las emisiones de monóxido de carbono (CO)

e hidrocarburos (HC) en vehículos con MEP, puede emplearse bajo condiciones estacionarias, su aplicación permitiría evaluar las emisiones generadas durante la operación convencional y con incorporación de hidrógeno con la celda de base húmeda, con el propósito de determinar posibles variaciones en estos contaminantes y verificar el cumplimiento de los límites establecidos por la legislación nacional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3DATX. (2026a). *Accessories | 3DATX*. https://www.3datx.com/accessories/

3DATX. (2026b). *Flexible PEMS: Design The Best Solution For YOU*. https://www.3datx.com/parsync-flex-pnc/

AEADE. (2017). *Anuario - 2017*. https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2018/04/anuario%202017%20final%20web.pdf

Albán, E., & López, J. (2010). *Desarrollo y validación de un método para la determinación de factores de emisión vehicular mediante pruebas a bordo en la ciudad de Quito* [Escuela Politécnica Nacional]. https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2514/1/CD-3209.pdf

Aliandro Varella, R., Giechaskiel, B., Sousa, L., & Duarte, G. (2018). *Comparison of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) with Laboratory Grade Equipment*. https://doi.org/10.3390/app8091633

Arias Cuasapaz, D. E. (2025). *Análisis del consumo de combustible de un vehículo en condiciones de tráfico real a diferentes altitudes* [Universidad Técnica del Norte]. https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/16848

Ariema. (2024). *Producción de Hidrógeno* . https://www.ariema.com/produccion-de-h2

Arroyo, F. R., & Miguel, L. J. (2019). *Análisis de la variación de las emisiones de CO 2 y posibles escenarios al 2030 en Ecuador Analysis of the variation of CO 2 emissions and possible scenarios to 2030 in Ecuador*. https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/9eb453d3-a157-4890-9d22-d39f26e8eea7/content

Atlas Copco. (2025). *Producción de hidrógeno: ¿qué es el hidrógeno y cómo se produce? - Atlas Copco Ecuador*. https://www.atlascopco.com/es-ec/compressors/air-compressor-blog/what-is-hydrogen-and-how-is-it-produced

ATRIA. (2026). *Cromatografía de Gases*. https://atriainnovation.com/blog/cromatografia-de-gases-que-es/

Bagnato, C. (2013). *Capítulo 10 Técnicas biofísicas para el estudio de lípidos y membranas*.

Barros Merchán, N. P., & Melo Arteaga, A. M. (2024). *Diseño de un circuito de conducción de emisiones real (RDE) según los parámetros-características de normativas internacionales para la Ciudad de Riobamba*. https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/22126

Barselina, E., Carbajal, G., & Lino, F. (2022). Boletín Gases de Efecto Invernadero Año 2021 Servicio Meteorológico Nacional. *ResearchGate*. https://doi.org/366485925

Benavides, H., & León, G. (2007). Información Técnica Sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM*.

BetterFuel. (2025). *Datos sobre el Hidrógeno*. Better Fuel Technology. https://www.hho-1.com/datos-hidrogeno-hho/?lang=es&srsltid=AfmBOoqrm2fiOMnu_mxTsIRlaBW8bGdKODJuLfrinVVoH4ggPCCYmL3i

Bishop, J. D. K., Stettler, M. E. J., Molden, N., & Boies, A. M. (2016). Engine maps of fuel use and emissions from transient driving cycles. *Applied Energy*, *183*, 202–217. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.175

Cabrera, D., José, E., Masaquiza, M., & Patricio, J. (2013). *VEHÍCULO MAZDA BT-50 2.2 L, PARA REDUCIR EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES" Previa a la obtención del Título de: INGENIERO AUTOMOTRIZ*. https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/2608

Calleja, D. (2022a). *Motores* (Tercera Edición). Paraninfo.

Calleja, D. (2022b). *Motores* (Tercera Edición). Paraninfo.

Carreras Planells, R., Alvarez Florez, J. A., & Callejon Agramunt, I. (2015). *Motores alternativos de combustion interna*. Universitat Politecnica de Catalunya. https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/61423

Chevrolet. (2017a). *CHEVROLET AVEO 2017*.

Chevrolet. (2017b, June 1). *Chevrolet Aveo Family*. https://www.chevrolet.com.ec/content/dam/chevrolet/south-america/ecuador/espanol/index/cars/2019-aveo/mov/02-pdfs/aveo-family-ficha-tecnica.pdf

Cuzco Cacuango, L. D., & Espinosa Cárdenas, A. B. (2023). *Creación de mapas de emisiones de un motor gasolina de inyección* [Universidad Técnica del Norte]. http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13907

Dallmann, T. (2021, January 12). *Uso del sensor remoto para monitoreo y control de emisiones vehiculares - International Council on Clean Transportation*. https://theicct.org/publication/uso-del-sensor-remoto-para-monitoreo-y-control-de-emisiones-vehiculares/

de Antonio, A. R., & Munoz Dominguez, M. (2016). *Motores de combustion interna*. UNED - Universidad Nacional de Educacion a Distancia. https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/48846

Dekraker, P., Barba, D., Moskalik, A., & Butters, K. (2018, April 3). Constructing Engine Maps for Full Vehicle Simulation Modeling. *ResearchGate*. https://doi.org/10.4271/2018-01-1412

DieselNet. (2024a, May). *Emission Standards: Europe: Cars and Light Trucks*. https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php

DieselNet. (2024b, July). *Emission Standards: USA: Cars and Light-Duty Trucks—Tier 1*. https://dieselnet.com/standards/us/ld.php

DieselNet. (2024c, August). *United States*. DieselNet. https://dieselnet.com/standards/us/index.php

El-Kassaby, M. M., Eldrainy, Y. A., Khidr, M. E., & Khidr, K. I. (2016). Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions. *Alexandria Engineering Journal*, *55*(1), 243–251. https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2015.10.016

Emissions, A. (2026). *How PEMS works — Emissions Analytics*. https://www.emissionsanalytics.com/news/how-pems-works

Espinoza, L. (2020). *Cápsula | Descarbonización de la Energía e Hidrógeno - UCUENCA*. https://www.ucuenca.edu.ec/comunicacion/blogs/descarbonizacion-de-energia-e-hidrogeno/

European Environment Agency. (2016). *Explaining road transport emissions - A non-technical guide*. https://doi.org/10.2800/71804

Fanelli, D. (2020, May 17). *La historia del motor de combustión interna - PatiodeAutos.com*. https://patiodeautos.com/general/la-historia-del-motor-de-combustion-interna/

GALAXUS. (2026). *OBD2 ELM327*. https://www.galaxus.ch/en/s4/product/jti-obd2-elm327-on-board-diagnostics-46218685

García, C. P., Orjuela Abril, S., & León, J. P. (2022). Analysis of performance, emissions, and lubrication in a spark-ignition engine fueled with hydrogen gas mixtures. *Heliyon*, *8*(11), e11353. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E11353/ASSET/F72B48BD-D288-40BA-BB22-5D3D03E97882/MAIN.ASSETS/GR15.JPG

Genia Bioenergy. (2025). *El hidrógeno, un vector energético con múltiples ventajas - Genia Bioenergy*. Https://Geniabioenergy.Com/. https://geniabioenergy.com/hidrogeno-vector-energetico-con-multiples-ventajas/

Giechaskiel, B., Clairotte, M., Valverde-Morales, V., Bonnel, P., Kregar, Z., Franco, V., & Dilara, P. (2018). Framework for the assessment of PEMS (Portable Emissions Measurement Systems) uncertainty. *Environmental Research*, *166*, 251–260. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.012

González-Oropeza, R. (2005). Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del auto transporte. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432005000300147&lng=es&tlng=es

Gutiérrez Jodra, L. (2005). EL HIDRÓGENO, COMBUSTIBLE DEL FUTURO. *Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, *99*(1), 49–67.

Halderman, J. (2012). *Automotive Technology: Principles, Diagnosis, and Service*. Pearson/Prentice Hall. https://books.google.com.ec/books?id=5Z3luQEACAAJ

Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2nd Edition). McGraw-Hill Education. https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260116106

IBM. (2025). *Programa estadístico IBM SPSS Statistics*. https://www.ibm.com/mx-es/products/spss-statistics

Importaciones Camaleón. (2024). *Cable en Y de OBD2 macho a OBD2 hembra* . https://importacionescamaleonec.com/producto/cable-en-y-de-obd2-macho-a-obd2-hembra/

INEN. (2002). *Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de Diesel* (NTE INEN 2207). Art. NTE INEN 2207.

INEN. (2017). *Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por Fuentes Móviles Terrestres que emplean Gasolina* (NTE INEN 2204). Art. NTE INEN 2204.

INEN. (2024). *Inspección de Vehículos Automotores bajo Reglamentos Técnicos INEN*. Servicio Ecuatoriano de Normalización. https://www.normalizacion.gob.ec/inspeccion-de-vehiculos-automotores-bajo-reglamentos-tecnicos-inen/

JASP. (2018). *JASP A Fresh Way to Do Statistics*. JASP. https://jasp-stats.org/

Konstantinovsky, T. (2024, September 1). *Cross Correlation and Coherence in Time Series Analysis: How to Uncover Relationships between Signals* .

https://medium.com/pythoneers/cross-correlation-and-coherence-in-time-series-analysis-how-to-uncover-relationships-between-c83a08990b2d

Kühlwein, J., German, J., & Bandivadekar, A. (2014). Development of Test Cycle conversion factors among worldwide Light-Duty vehicle CO2 emission standards. *ICCT* . https://theicct.org/publication/development-of-test-cycle-conversion-factors-among-worldwide-light-duty-vehicle-co2-emission-standards/

Laboratorio de Análisis Instrumental EPN. (2026). *Escuela Politécnica Nacional | Laboratorio de Análisis Instrumental* . https://webhistorico.epn.edu.ec/laboratorio-de-analisis-instrumental/

Laverde, G. E., Jar, D. J., Anangonó, W. M., & Clavijo, J. C. (2015). SISTEMA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO PARA LA ALIMENTACIÓN VEHICULARDUAL GASOLINA - HHO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA. *Energía Mecánica, Innovación y Futuro*, *4*(1), 68–76. https://doi.org/10.24133/EMIF.V4.9I.3948

López, A., Torres, F., Pla, B., Romero, B., & Bravo, D. (2022). Metodología para inferir el mapa de desempeño y el consumo de combustible de un motor de combustión interna alternativo. *Revista Digital Novasinergia*, *5*, 43–60.

Mathworks. (2025). *Statistics and Machine Learning Toolbox - MATLAB*. https://la.mathworks.com/products/statistics.html

MEAN WELL. (2026). *MEAN WELL HLG-240H-CA Series* . https://www.meanwell.co.uk/led-drivers/constant-current-led-drivers/non-dim/hlg-240h-ca-series

Microsoft. (2025). *Tareas básicas en Excel*. Microsoft. https://support.microsoft.com/es-es/office/tareas-b%C3%A1sicas-en-excel-dc775dd1-fa52-430f-9c3c-d998d1735fca

Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Balance Energético Nacional*. https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/capitulo1.pdf

Muñoz, M., Morante, R., García, S., Díaz, J., Herrera, M., Becerra, J., Luna, G., Vásconez, S., Barrera, K., Moncayo, V., Melo, P., Caza, P., Mendieta, P., Pazmiño, M., Calderón, P., & Yépez, M. (2023). *Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible del Ecuador 2023 - 2030*. https://www.obraspublicas.gob.ec/politica-nacional-de-movilidad-urbana-sostenible/

OUKITEL. (2026). *Portable Power Station OUKITEL*. https://eu.oukitel.com/es/collections/portable-power-station?srsltid=AfmBOorOXq8NIQDl25g7tvpdpetVzoRDdWdnJN5PSMeQzaStSVi5hEMw

Paluch, M., & Noga, M. (2025). Influence of hydrogen addition on performance and ecological parameters of a spark-ignition internal combustion engine at part load typical for urban traffic. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, *19*(3), 262–270. https://doi.org/10.12913/22998624/199738

Payri González, F., & Desantes Fernández, J. M. (2011a). *Motores de combustión interna alternativos*. Editorial Universitat Politècnica de València. https://riunet.upv.es/handle/10251/70998

Payri González, F., & Desantes Fernández, J. M. (2011b). *Motores de combustión interna alternativos*. Editorial Universitat Politècnica de València. https://riunet.upv.es/handle/10251/70998

Pazmiño, K., & Peralvo, A. (2022). *Análisis del comportamiento del motor de combustión interna a gasolina en el proceso de descarbonización en la cámara de combustión utilizando un equipo generador de oxihidrógeno.* ESPE.

PerkinElmer. (2006). *Clarus 500 Gas Chromatograph*. www.perkinelmer.com

Petroecuador. (2026). *EP PETROECUADOR en línea*. https://eppetroecuadorenlinea.eppetroecuador.ec/eppec-extranet-ang/centroDeDistribucion

PST. (2025). *Producción industrial de H2: el papel de los electrolizadores en los métodos renovables*. https://www.processsensing.com/es-es/blog/uso-de-electrolizadores-produccion-industrial-de-h2.htm?ID=using-electrolyzers-industrial-h2-production

Python. (2025). *Python is powerful... and fast; plays well with others; runs everywhere; is friendly & easy to learn; is Open*. Python. https://www.python.org/about/

R Project. (2024). What is R? *The R Foundation*. https://www.r-project.org/about.html

Ramos, L. (2023). *Análisis de las emisiones contaminantes generadas por el transporte público urbano línea 116 de la ciudad de Guayaquil*. https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/RAMOS%20SANTANA%20LISBETH%20KATHERINE.pdf

Reif, K. (2015). *Gasoline Engine Management: Systems and Components* (K. Reif, Ed.; 2015th ed., Vol. 1). Springer Vieweg.

Rosero, F., Fonseca, N., Mera, Z., & López, J.-M. (2023). Assessing on-road emissions from urban buses in different traffic congestion scenarios by integrating real-world driving, traffic, and

emissions data. *Science of The Total Environment*, *863*, 161002. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161002

Rosero, F., Rosero, X., & Mera, Z. (2024). Developing Fuel Efficiency and CO2 Emission Maps of a Vehicle Engine Based on the On-Board Diagnostic (OBD) Approach. *Enfoque UTE*, *15*(1), 7–15. https://doi.org/10.29019/enfoqueute.1002

Sanz, S. (2011a). *Motores*. Editorial Editex. https://books.google.com.ec/books?id=_7HEAwAAQBAJ

Sanz, S. (2011b). *Motores*. Editorial Editex. https://books.google.com.ec/books?id=_7HEAwAAQBAJ

Sastresa, I., & Zabalza, E. (2011). *Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos Prensas Universitarias Energías renovables*.

Sastresa, L., & Zabalza, B. (2011). *Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos Prensas Universitarias Energías renovables*.

Seisakujo, H., Adachi, M., & Nakamura, H. (2014). *Engine Emissions Measurement Handbook*. SAE International. https://books.google.com.ec/books?id=HV3fuQEACAAJ

Sernauto. (2025). *Avances tecnológicos para reducir las emisiones - Componiendo el futuro*. https://www.sernauto.es/blog/avances-tecnologicos-para-reducir-las-emisiones/

Shourehdeli, S., Mirmohammadi, A., & Gholipour, H. (2025). Machine learning-driven universal models for gasoline engine performance maps: accuracy and generality evaluation. *Thermal Science and Engineering Progress*, *62*, 103593. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103593

Statgraphics. (2025). *STATGRAPHICS Centurion XVIII - Potente herramienta de análisis*. https://statgraphics.net/

Suárez Peñafiel, J. M. (2025). *Implementación de equipamiento PEMS y pruebas preliminares para la recolección de datos de emisiones en conducción real en ciudades de gran altitud*. https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/25907

Tamayo, E., Rosales, C., Guzmán, A., & Pazmiño, P. (2016). Effect of using hydrogen in the power and performance of an internal combustion engine. *Enfoque UTE*, *7*(4), 43–54. https://doi.org/10.29019/ENFOQUEUTE.V7N4.113

Testo. (2026). *Testo 480 - Medidor multifunción*. https://www.testo.com/es-MX/testo-480/p/0563-4800#tab-technicalData

TOPDON. (2017). *TC001 – TOPDON LA*. https://la.topdon.com/es/products/tc001

TOPDON. (2024). *Manual de usuario de la cámara térmica TOPDON TC001 para Android* . https://manuals.plus/es/topdon/tc001-thermal-camera-for-android-manual

UCLM. (2024, April 19). *Software libre: Descubre el análisis estadístico con R*. Universidad de Castilla-La Mancha. https://www.uclm.es/global/promotores/organos%20de%20gobierno/vicerrectorado%20de%20transformacion%20y%20estrategia%20digital/consejos-tic/cerosyunos109#:~:text=R%20es%20una%20herramienta%20poderosa,y%20algoritmos%20de%20aprendizaje%20autom%C3%A1tico.&text=R%20es%20una%20elecci%C3%B3n%20excelente,y%20la%20visualizaci%C3%B3n%20de%20datos.

United Nations. (2025). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development. https://sdgs.un.org/2030agenda

U.S. Department of Energy. (2023). Overview of Hydrogen Internal Combustion Engine (H2ICE) Technologies. *Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office (HFTO)*. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/february-h2iq-hour-overview-hydrogen-internal-combustion-engine-h2ice-technologies

Varela, J. (2016). *El hidrógeno, combustible del futuro - RACE*. https://www.race.es/revista-autoclub/motor/movilidad/el-hidrogeno-combustible-del-futuro/

Yang, Z., Rushton, C., & Tate, J. (2025). Detected or not? Remote sensing measurements from the latest Euro 6d vehicles across Europe. *Journal of Environmental Management*, *395*, 127767. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127767

Yolanda, M., Morales, R., & Guzmán, A. H. (2014). *CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON DOS TIPOS DE COMBUSTIBLE*. https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt417.pdf

Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, *36*(3), 307–326. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de cromatografía de gases

	INFORME DE RESULTADOS	Página:	1 de 1	
		FPT-7.8-34-01		

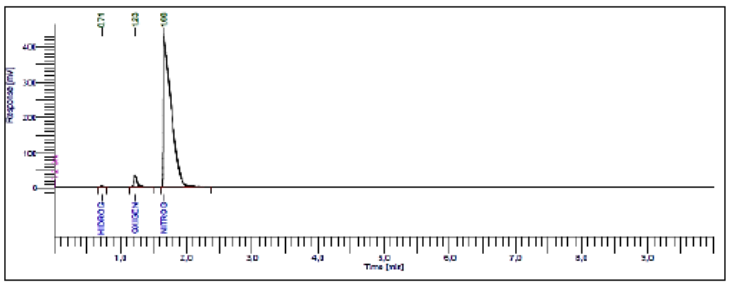
INFORME No. I-LAI-26-12-01

Orden de Trabajo No. DQ-OT0020-2026

INFORMACION CLIENTE					
Cliente / Empresa:	Alexander Aguirre			**Persona de contacto:**	Alexander Aguirre
Dirección / Telf.:	Ibarra / 988019093			**E-mail:**	davidaguireval@gmail.com
PARAMETROS DE LA MUESTRA					
Identificación:	M-LAI-26-12-01			**Fecha de muestreo:**	10/3/2026
Tipo de muestra:	Gas de hidrógeno (H2) generado por electerólisis			**Plan de muestreo:**	No especificado por el cliente
Tipo de contenedor:	Bolsa tedlar			**Fecha inicio del ensayo:**	12/3/2026
Fecha de Recepción:	11/3/2026			**Fecha entrega informe:**	16/3/2026
CONDICIONES DE TRABAJO					
Temperatura de ensayo y %HR ambiente:	18,3 °C	50,0 %		**Norma de referencia:**	ASTM D 1945: Cromatografía
Temperatura y Presión de muestra:	65,0 °F	0,7 psi		**Procedimiento interno:**	PE-7.2-01
	18,3 °C	4964,2 Pa			PE-7.2-02

RESULTADOS			
COMPOSICIÓN	**COMPONENTE**	**% Moles**	**Desv. Std**
	Hidrógeno	58,91	0,277
PROPIEDADES	**Densidad relativa**	0,53	
	Peso molecular promedio [g/mol]	14,57	
	Densidad de la muestra (g/L) a 60°F	0,65	
	Poder calorifico superior [kJ/m^3]	7115,98	
	Poder calorifico inferior [kJ/m^3]	6011,93	
	Factor de compresibilidad (z)	1,0618	

CROMATOGRAMA



MUESTRA



Columna 13 X 45/60

DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los items ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió. El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.
OBSERVACIONES	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo.

Anexo 2. Informe de resultados easyclimate: Prueba a 5 voltios

Phone
Fax
Mobile
Email
Internet

Measurement protocol

Customer

Protocol No.

Date 20/5/2026

Order number
Contact person

Measuring point

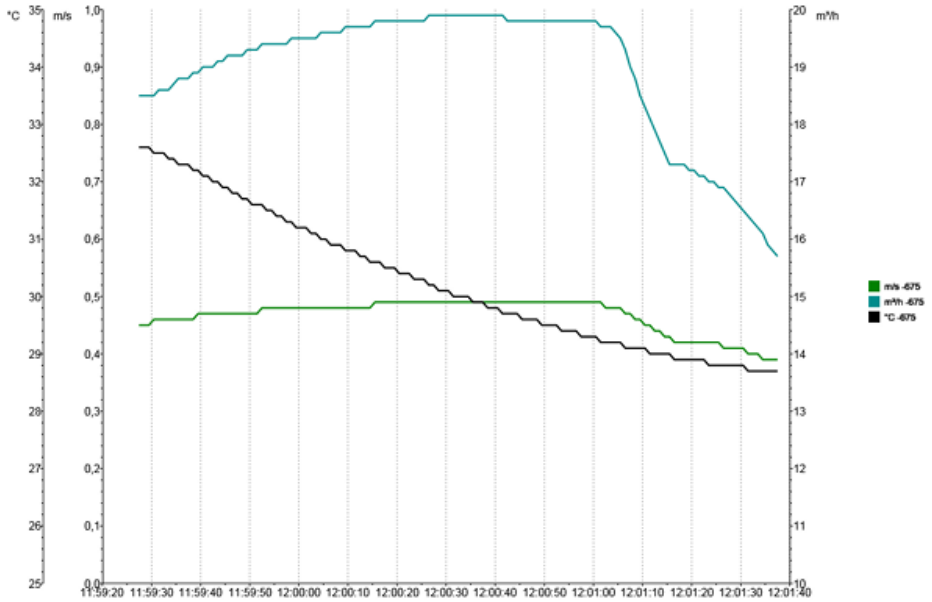
Used probes

Probe name	**Serial number**
-675	3028675

Measurement parameter

Name
Measurement date 19.05.26 11:59

Measuring type Continuo
Measuring rate 1 sec
Number of values 131



Anexo 3. Informe de resultados easyclimate: Prueba a 9 voltios

Phone
Fax
Mobile
Email
Internet

Measurement protocol

Customer

Protocol No.

Date 20/5/2026

Order number
Contact person

Measuring point

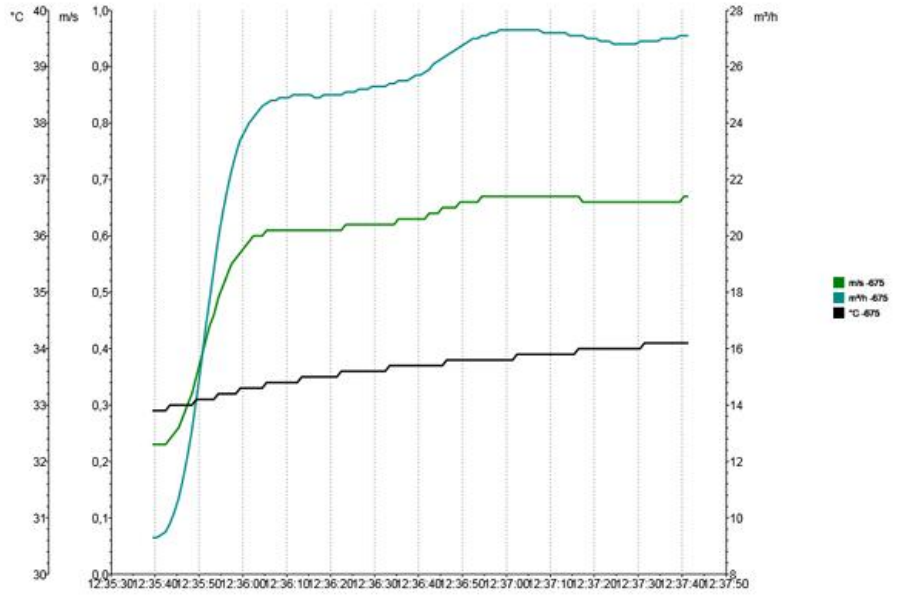
Used probes

Probe name	**Serial number**
-675	3028675

Measurement parameter

Name
Measurement date 19.05.26 12:34

Measuring type Continuo
Measuring rate 1 sec
Number of values 123



Anexo 4. Informe de resultados easyclimate: Prueba a 12 voltios

testo

Phone
Fax
Mobile
Email
Internet

Measurement protocol

Customer

Protocol No.

Date 20/5/2026

Order number
Contact person

Measuring point

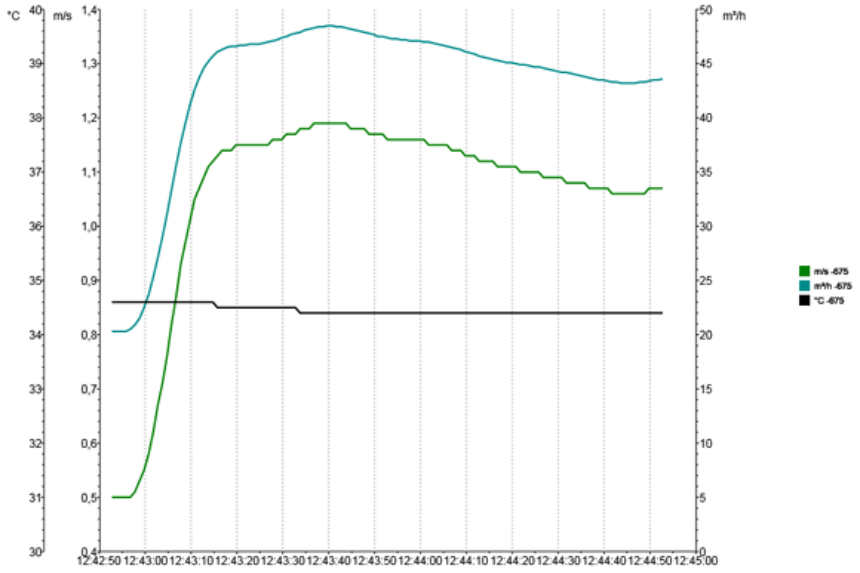
Used probes

Probe name	**Serial number**
-675	3028675

Measurement parameter

Name
Measurement date 19.05.26 12:38

Measuring type Continuo
Measuring rate 1 sec
Number of values 121



Anexo 5. Valores estadísticos de tasas instantáneas en tramo urbano

TRAMO URBANO						
TASAS DE EMISIONES Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE						
ENSAYO	**SIN HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
FC [g/s]	0.06700	0.14034	0.18383	0.39286	0.49434	2.49025
CO2 [g/s]	0.03433	0.43263	0.53044	1.15880	1.44224	7.40738
CO [g/s]	0.00060	0.00368	0.01343	0.03858	0.04119	1.57450
HC [g/s]	0.00000	0.00023	0.00048	0.00091	0.00111	0.02189
NOx [g/s]	0.00002	0.00016	0.00084	0.00398	0.00398	0.05039
ENSAYO	**CON HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
FC [g/s]	0.07353	0.13371	0.18601	0.42797	0.57326	2.54643
CO2 [g/s]	0.03027	0.43153	0.54473	1.31952	1.75301	7.76009
CO [g/s]	0.00095	0.00372	0.01670	0.05156	0.05338	2.21892
HC [g/s]	0.00007	0.00027	0.00061	0.00132	0.00157	0.02634
NOx [g/s]	0.00008	0.00022	0.00117	0.00453	0.00500	0.06130

Anexo 6. Valores estadísticos de tasas instantáneas en tramo suburbano

TRAMO SUBURBANO						
TASAS DE EMISIONES Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE						
ENSAYO	**SIN HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
FC [g/s]	0.07826	0.40177	1.41223	1.22270	1.84577	3.05868
CO2 [g/s]	0.02914	1.01166	3.93368	3.32904	5.04643	7.41971
CO [g/s]	0.00079	0.02889	0.07504	0.24189	0.19819	2.64578
HC [g/s]	0.00000	0.00040	0.00105	0.00231	0.00266	0.01684
NOx [g/s]	0.00011	0.00300	0.02238	0.02345	0.03773	0.09317
ENSAYO	**CON HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
FC [g/s]	0.07257	0.29866	1.24941	1.14589	1.78130	2.95959
CO2 [g/s]	0.02522	0.84402	3.60165	3.31838	5.24865	7.64001
CO [g/s]	0.00068	0.02530	0.07646	0.24359	0.24056	2.41897
HC [g/s]	0.00007	0.00062	0.00216	0.00327	0.00466	0.02689
NOx [g/s]	0.00013	0.00243	0.01967	0.02224	0.03763	0.07441

Anexo 7. Valores estadísticos de tasas instantáneas en tramo autopista

TRAMO AUTOPISTA						
TASAS DE EMISIONES Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE						
ENSAYO	**SIN HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
FC [g/s]	0.08092	0.83273	1.94885	1.63292	2.27139	3.18125
CO2 [g/s]	0.03803	2.07261	4.29360	3.52013	4.77982	6.71170
CO [g/s]	0.00120	0.18422	0.89960	0.79605	1.11875	2.73412
HC [g/s]	0.00008	0.00176	0.00965	0.00836	0.01223	0.02766
NOx [g/s]	0.00023	0.00690	0.02137	0.02060	0.02898	0.07315
ENSAYO	**CON HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
FC [g/s]	0.09598	1.29490	1.90647	1.69125	2.21813	3.03167
CO2 [g/s]	0.03680	3.57468	4.47748	3.91214	5.13925	6.45198
CO [g/s]	0.00100	0.21013	1.06253	0.89412	1.21975	2.58412
HC [g/s]	0.00014	0.00476	0.01136	0.01020	0.01493	0.08673
NOx [g/s]	0.00018	0.01515	0.02176	0.02104	0.02929	0.06876

Anexo 8. Valores estadísticos de tasas instantáneas en Ruta completa

RUTA COMPLETA						
TASAS DE EMISIONES Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE						
ENSAYO	**SIN HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
FC [g/s]	0.06700	0.14387	0.31544	0.73995	1.28128	3.18125
CO2 [g/s]	0.02914	0.44594	0.91207	1.91681	3.60086	7.41971
CO [g/s]	0.00060	0.00664	0.02937	0.20065	0.10937	2.73412
HC [g/s]	0.00000	0.00028	0.00068	0.00241	0.00204	0.02766
NOx [g/s]	0.00002	0.00029	0.00216	0.01000	0.01795	0.09317
ENSAYO	**CON HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
FC [g/s]	0.07257	0.13892	0.34823	0.77678	1.38679	3.03167
CO2 [g/s]	0.02522	0.44244	1.05548	2.12953	3.99460	7.76009
CO [g/s]	0.00068	0.00674	0.03428	0.23283	0.14119	2.58412
HC [g/s]	0.00007	0.00034	0.00100	0.00322	0.00353	0.08673
NOx [g/s]	0.00008	0.00042	0.00296	0.01058	0.01832	0.07441

Anexo 9. Valores estadísticos de indicadores específicos en tramo urbano

TRAMO URBANO						
RENDIMIENTO ESPECÍFICO AL FRENO						
ENSAYO	**SIN HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
BTE [%]	4.73	20.61	26.68	25.44	31.32	35.00
BSFC [g/kWh]	77.76	151.88	199.96	217.31	229.60	1643.63
CO2 [g/kWh]	33.85	434.27	613.60	646.27	701.85	5163.65
CO [g/kWh]	0.56	4.00	9.17	18.36	22.24	567.09
HC [g/kWh]	0.00	0.21	0.36	0.52	0.63	5.34
NOx [g/kWh]	0.03	0.21	0.61	1.52	1.99	24.30
ENSAYO	**CON HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
BTE [%]	3.30	18.32	25.43	23.85	30.43	35.00
BSFC [g/kWh]	3.30	16.53	22.95	21.80	27.85	32.00
CO2 [g/kWh]	31.60	427.41	609.80	684.10	705.68	7719.69
CO [g/kWh]	0.70	4.32	9.66	22.78	27.22	872.77
HC [g/kWh]	0.07	0.27	0.43	0.65	0.74	13.89
NOx [g/kWh]	0.07	0.28	0.88	1.68	2.15	24.19

Anexo 10. Valores estadísticos de indicadores específicos en tramo suburbano

TRAMO SUBURBANO						
RENDIMIENTO ESPECÍFICO AL FRENO						
ENSAYO	**SIN HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
BTE [%]	6.10	28.26	31.63	30.16	34.53	37.87
BSFC [g/kWh]	77.85	165.89	222.32	226.34	253.42	1275.44
CO2 [g/kWh]	21.57	447.67	614.32	613.34	690.29	3828.28
CO [g/kWh]	0.59	7.11	15.74	39.16	42.21	494.83
HC [g/kWh]	0.00	0.11	0.21	0.39	0.50	2.57
NOx [g/kWh]	0.11	1.22	3.47	3.65	5.51	14.47
ENSAYO	**CON HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
BTE [%]	4.01	26.76	32.60	30.27	35.16	37.91
BSFC [g/kWh]	77.77	150.61	214.93	220.55	244.26	1938.34
CO2 [g/kWh]	30.60	445.35	622.83	632.53	741.00	5025.73
CO [g/kWh]	0.68	7.33	15.32	41.94	51.49	788.92
HC [g/kWh]	0.06	0.23	0.38	0.58	0.77	8.98
NOx [g/kWh]	0.14	1.16	3.35	3.54	5.38	32.24

Anexo 11. Valores estadísticos de indicadores específicos en tramo autopista

TRAMO AUTOPISTA						
RENDIMIENTO ESPECÍFICO AL FRENO						
ENSAYO	**SIN HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
BTE [%]	10.69	25.46	30.72	28.70	32.11	44.93
BSFC [g/kWh]	77.76	214.95	248.58	255.80	295.68	727.26
CO2 [g/kWh]	31.23	514.25	554.74	571.82	645.16	2057.15
CO [g/kWh]	1.24	56.29	116.51	119.11	146.81	373.48
HC [g/kWh]	0.03	0.52	1.23	1.22	1.62	5.49
NOx [g/kWh]	0.17	2.03	3.02	3.03	3.78	19.18
ENSAYO	**CON HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
BTE [%]	6.78	21.23	29.95	28.09	32.76	44.93
BSFC [g/kWh]	78.50	220.51	244.73	270.11	331.19	1146.76
CO2 [g/kWh]	30.24	534.20	587.85	633.08	783.01	3633.86
CO [g/kWh]	0.87	50.72	135.60	132.62	161.90	727.29
HC [g/kWh]	0.10	0.93	1.48	1.54	2.00	13.95
NOx [g/kWh]	0.25	2.22	3.17	3.13	4.05	9.65

Anexo 12. Variación de indicadores específicos en ruta completa

RUTA COMPLETA						
RENDIMIENTO ESPECÍFICO AL FRENO						
ENSAYO	**SIN HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
BTE [%]	4.73	23.37	29.74	27.64	32.57	44.93
BSFC [g/kWh]	77.76	158.72	208.56	225.33	251.63	1643.63
CO2 [g/kWh]	21.57	448.35	596.99	628.21	694.16	5163.65
CO [g/kWh]	0.56	5.05	14.14	38.89	42.08	567.09
HC [g/kWh]	0.00	0.21	0.39	0.62	0.83	5.49
NOx [g/kWh]	0.03	0.29	1.27	2.12	3.25	24.30
ENSAYO	**CON HIDRÓGENO**					
Variable	**Mínimo**	**Q1**	**Mediana**	**Media**	**Q3**	**Máximo**
BTE [%]	3.30	21.08	28.57	26.94	32.81	44.94
BSFC [g/kWh]	77.76	152.86	198.41	229.79	248.32	2358.52
CO2 [g/kWh]	30.24	449.92	609.06	665.97	725.41	7719.69
CO [g/kWh]	0.68	5.30	14.63	45.36	49.42	872.77
HC [g/kWh]	0.06	0.28	0.49	0.79	1.05	13.95
NOx [g/kWh]	0.07	0.39	1.47	2.27	3.44	32.24