



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
AUTOMOTRIZ**

**“ANÁLISIS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN VEHÍCULOS: UNA  
COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS DEL SISTEMA OBD Y LAS  
MEDICIONES CON FLUJÓMETRO”**



**AUTORES:** Rosales Cuaical Kevin Adrián, Vilatuña Romo Juan Carlos

**DIRECTOR:** Ing. Fredy Alexander Rosero Obando PhD.

Ibarra-Ecuador

**2025**

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	DE	1004297626	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Y	Rosales Cuaical Kevin Adrián	
<b>DIRECCIÓN:</b>		San Roque	
<b>EMAIL:</b>		<a href="mailto:karosalesc@utn.edu.ec">karosalesc@utn.edu.ec</a>	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>		-	<b>TELF. MOVIL</b> 0996488142

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	DE	1003994900	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Y	Vilatuña Romo Juan Carlos	
<b>DIRECCIÓN:</b>		Ibarra - Priorato	
<b>EMAIL:</b>		<a href="mailto:jcvilatunar@utn.edu.ec">jcvilatunar@utn.edu.ec</a>	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>		-	<b>TELF. MOVIL</b> 0983673768

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	Análisis de consumo de combustible en vehículos: Una comparación entre los datos del sistema OBD y las mediciones con flujómetro.
<b>AUTOR (ES):</b>	Rosales Cuaical Kevin Adrián, Vilatuña Romo Juan Carlos
<b>FECHA: AAAAMMDD</b>	2025-06-18
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
<b>CARRERA/PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero Automotriz
<b>DIRECTOR:</b>	Ing. Fredy Rosero PhD.

## AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Nosotros, Kevin Adrián Rosales Cuaical y Juan Carlos Vilatuña Romo, con cédula de identidad Nro. 1004297626 y Nro. 1003994900, respectivamente en calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 18 días del mes de junio de 2025

### LOS AUTORES:



---

Kevin Adrián Rosales Cuaical  
Autor C.C.: 1004297626



---

Juan Carlos Vilatuña Romo.  
Autor C.C.: 1003994900

## 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 18 días del mes de junio de 2025

### LOS AUTORES:



---

Kevin Adrián Rosales Cuaical  
Autor C.C.: 1004297626



---

Juan Carlos Vilatuña Romo.  
Autor C.C.: 1003994900

## CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, a los 18 días del mes de junio de 2025

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

## APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Análisis de consumo de combustible en vehículos: Una comparación entre los datos del sistema OBD y las mediciones con flujómetros” elaborado por Rosales Cuaical Kevin Adrián y Vilatuña Romo Juan Carlos, previo a la obtención del título del Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



---

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



---

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

## DEDICATORIA

A mi padre, Luis Rosales y mi madre, Blanca Cuaical, por ser la raíz de cada uno de mis sueños, por su amor incondicional, su sacrificio silencioso y su constante apoyo durante cada paso de este camino. Gracias por confiar y creer en mí, incluso en los momentos más difíciles, por ser mi refugio y la mayor motivación para seguir adelante. Quiero que sepan que cada sacrificio que hicieron por mi hoy se convierte en este trabajo.

A mi hermano, Fernando Rosales, compañero de vida y cómplice de sueños. Por ser además de mi crítico más honesto, mi aliado confiable en esas noches largas de trabajo sin descanso. Tus palabras de aliento renovaron mi energía cuando más lo necesitaba e hicieron de este trabajo algo nuestro. Finalmente dedico este logro a todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron con mi crecimiento académico y personal. Sepan que este logro también les pertenece.

**Rosales Kevin**

Llegar al final de esta etapa universitaria no habría sido posible sin el amor, la paciencia y el apoyo inquebrantable de quienes caminaron a mi lado, alentándome en cada momento y siendo mi fortaleza cuando el camino se volvió difícil. A esas personas, que con su confianza en mí convirtieron mis sueños en realidad, les dedico con todo mi corazón los frutos de este esfuerzo.

A mis padres, Jorge y Blanca por ser mi cimiento, mi guía y mi mayor motivación. Gracias por estar siempre presentes, en los momentos de alegría y en los de dificultad, su amor incondicional y su confianza en mí han sido el faro que iluminó mi camino, recordándome que, con esfuerzo y dedicación, ningún sueño es imposible.

A mi hermano Luis, mi cuñada Cristina y mi adorada sobrina Leia, por ser mi inspiración y mi refugio, sus consejos, sus oraciones y su constante ánimo moldearon la persona que soy hoy. Y a ti, Leia, mi pequeña luz, tu sonrisa fue el motor que me impulsó a superarme cada día. Gracias por ser el regalo más valioso y por recordarme que el amor da fuerzas para seguir adelante.

A mi novia, Johanna por ser mi compañera, mi confidente y mi mayor aliada. Fuiste testigo de cada sacrificio, cada triunfo y cada momento de duda, pero nunca dejaste de creer en mí. Tu amor, tu motivación y tu fe inquebrantable en mis capacidades fueron el impulso que necesitaba para no rendirme. Gracias por caminar a mi lado y por ser parte fundamental de esta etapa.

**Vilatuña Juan**

## AGRADECIMIENTO

De manera muy especial, agradezco a Dios por la vida, por permitirme compartir cada momento junto a mis seres queridos, y por darme la fortaleza, las oportunidades y la perseverancia necesarias para alcanzar este logro.

A mis padres, Luis Rosales y Blanca Cuaical, quiero expresarles mi más sincero y profundo agradecimiento, por inculcar en mí los valores que, día tras día, he puesto en práctica desde mi infancia, y por ser un ejemplo constante de esfuerzo, dedicación, humildad y amor incondicional. Cada uno de mis logros es un reflejo del apoyo y la enseñanza que me han brindado a lo largo de mi vida.

A mi hermano Fernando, le expreso mi gratitud por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento en los momentos de incertidumbre y por ser un compañero de vida inigualable, con quien he compartido sueños, desafíos y conquistas.

De manera especial, agradezco a mi tutor de tesis, Fredy Rosero, por su dedicación, su paciencia y su invaluable guía. Gracias por su tiempo, por compartir sus conocimientos, y por orientarme en cada etapa de este proceso con profesionalismo y compromiso. Su acompañamiento fue fundamental para la culminación de este trabajo.

A Daniel Arias, le expreso mi gratitud por su colaboración y disposición a lo largo del desarrollo de este trabajo. Su apoyo constante, sus ideas y su entusiasmo fueron fundamentales para superar los desafíos que se presentaron en el camino. Gracias por compartir no solo tus conocimientos, sino también tu motivación y compañerismo.

A la familia Jaramillo Vinueza, y de manera muy especial a Gustavo y Carlos, les expreso mi más profundo agradecimiento por su invaluable apoyo a lo largo de este proceso. Gracias por brindarme no solo su colaboración, sino también su amistad, su confianza y sus palabras de aliento, que me motivaron a seguir adelante.

Por último, le expreso mi más sincero agradecimiento mi compañero de tesis Juan, por su compromiso, colaboración constante y valiosas aportaciones a lo largo de todo el desarrollo de este trabajo. Su apoyo y dedicación fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos y superar los desafíos que se presentaron en el camino.

**Rosales Kevin**

En primer lugar, agradezco a Dios, fuente de vida y sabiduría, por otorgarme la salud y la fortaleza necesarias para alcanzar este significativo logro académico.

A mis queridos padres, pilares fundamentales de mi vida y de mi formación integral, les expreso mi más profundo agradecimiento. Su amor incondicional, sus constantes palabras de aliento y su firme confianza en mis capacidades han sido el nutriente esencial que alimentó mi perseverancia durante esta etapa formativa. Me enorgullece profundamente poder compartir con ustedes los frutos de este esfuerzo, sabiendo que este logro también es el resultado de sus sacrificios y enseñanzas.

A mi tutor de tesis, Fredy Rosero, le manifiesto mi sincero reconocimiento por su valiosa guía académica a lo largo de este trabajo de investigación. Su profundo conocimiento, paciencia y disposición para resolver cada duda fueron determinantes para el éxito de este proyecto. Agradezco especialmente sus acertadas observaciones, críticas constructivas y orientación metodológica, que enriquecieron significativamente el contenido y la calidad de esta tesis de pregrado.

A mi compañero de tesis, Kevin Rosales, quien fue fundamental para el desarrollo de este trabajo. Gracias a su colaboración, dedicación y espíritu de equipo, logramos cumplir con nuestros objetivos y superar cada desafío que se presentó en el proceso.

Quiero agradecer a Daniel Arias por su ayuda desinteresada. Su crítica constructiva, atención a los detalles y apoyo constante fueron clave para evitar errores en el trabajo.

Finalmente, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte, que me ha proporcionado las herramientas académicas, los conocimientos especializados y los valores profesionales necesarios para culminar esta importante etapa de mi formación.

**Vilatuña Juan**

## RESUMEN EJECUTIVO

Este estudio tuvo como objetivo principal evaluar el consumo de combustible de un vehículo Great Wall Wingle 2.4L en condiciones reales de tráfico. Para ello, se recopilaron datos cinemáticos y de operación del motor en diferentes escenarios de conducción utilizando el dispositivo ELM327, el cual se comunica con el vehículo mediante el protocolo OBD-II (On-Board Diagnostics). Adicionalmente, se midió el consumo de combustible de manera física mediante dos flujómetros DFM 100ACAN, los cuales transmitieron datos a los registradores CANEdge2 y CANUp con una frecuencia de 1 Hz.

Se realizaron tres pruebas en un trayecto entre la ciudad de Ibarra y San Roque, con una duración promedio de 77 minutos por prueba. Durante los recorridos, se registraron variaciones en el desempeño del vehículo, lo que permitió un análisis detallado de su comportamiento. La sincronización de los datos fue fundamental para el estudio, y su procesamiento se llevó a cabo mediante el software estadístico R Studio y la plataforma abierta Asammdf, lo que facilitó un enfoque más preciso en las variables cinemáticas clave.

Los resultados se presentaron mediante mapas de motor que ilustraron aspectos fundamentales como la eficiencia, el consumo transitorio y la tasa de emisiones. Se identificó una eficiencia máxima promedio de aproximadamente 30% en carretera, especialmente bajo condiciones de alta carga y régimen, lo que reflejó un consumo instantáneo proporcional. Por otro lado, en entornos urbanos, se observó un incremento significativo promedio de aproximadamente 1524 gramos de CO<sub>2</sub> (g/kWh), asociado al tráfico y las frecuentes paradas.

Finalmente, los resultados mostraron una discrepancia mínima entre los tres dispositivos de registro. Los datos del ELM327 presentaron valores más altos en la mayoría de las variables analizadas, ya que estos corresponden a estimaciones proporcionadas por la ECU del vehículo. En contraste, los otros dispositivos ofrecieron mediciones más precisas al basarse en registros físicos.

**Palabras clave:** Consumo de combustible, protocolo OBD, mapas de motor, sincronización, condiciones de tráfico real, sensores de flujo de combustible.

## ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the fuel consumption of a 2.4L Great Wall Wingle vehicle under real-world traffic conditions. To this end, kinematic and engine operating data were collected in different driving scenarios using the ELM327 device, which communicates with the vehicle via the OBD-II (On-Board Diagnostics) protocol. Additionally, fuel consumption was physically measured using two DFM 100ACAN flow meters, which transmitted data to the CANEdge2 and CANUp recorders at a frequency of 1 Hz.

Three tests were conducted on a route between the cities of Ibarra and San Roque, with an average duration of 77 minutes per test. During the trips, variations in vehicle performance were recorded, allowing for a detailed analysis of its behavior. Data synchronization was essential for the study, and data processing was carried out using the statistical software R Studio and the open Asammdf platform, which facilitated a more precise focus on key kinematic variables. The results were presented using engine maps that illustrated key aspects such as efficiency, transient consumption, and emissions rates. An average maximum efficiency of approximately 30% was identified on the highway, especially under high load and rpm conditions, reflecting proportional instantaneous consumption. On the other hand, in urban environments, a significant average increase of approximately 1,524 grams of CO<sub>2</sub> (g/kWh) was observed, associated with traffic and frequent stops.

Finally, the results showed minimal discrepancy between the three recording devices. The ELM327 data presented higher values for most of the variables analyzed, as these correspond to estimates provided by the vehicle's ECU. In contrast, the other devices offered more accurate measurements based on physical recordings.

**Keywords:** Fuel consumption, OBD protocol, engine maps, timing, real traffic conditions, fuel flow sensors.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	12
ÍNDICE DE TABLAS .....	15
ÍNDICE DE FIGURAS.....	16
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN .....	20
1.1. Problema de Investigación.....	20
1.1.1. Antecedentes.....	20
1.1.1. Planteamiento del Problema .....	21
1.2. Justificación .....	23
1.3. Objetivos.....	24
1.3.1. Objetivo General.....	24
1.3.2. Objetivos Específicos.....	24
1.4. Alcance .....	24
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....	25
2.1. Operación del Motor de Combustión en el Vehículo .....	25
2.1.1. Vehículo.....	25
2.1.2. Motores de Combustión Interna: Fundamentos y Clasificación.....	25
2.1.3. Principio de Funcionamiento Motores Encendido Provocado.....	27
2.1.4. Características de los MEP .....	28
2.1.5. Sistema de Alimentación de Combustible .....	30
2.1.6. Curvas Características de los MCI.....	32
2.2. Formación de Emisiones Contaminantes: CO <sub>2</sub> y Consumo .....	34
2.2.1. Fundamentos del Proceso de Combustión en Motores .....	34
2.2.2. Mecanismos de Emisiones.....	35
2.2.3. Tipos de misiones: GEI vs Contaminantes .....	36
2.2.4. Tecnologías para reducir el Consumo de Combustible .....	37
2.2.5. Normativa de Control de Emisiones .....	38
2.3. Enfoques para la Estimación de Consumo de Combustible en Vehículos .....	40
2.3.1. Fundamentos de la estimación del consumo.....	40
2.3.2. Técnicas para la estimación del consumo: Modelado vs Mediciones .....	40
2.3.3. Estimación usando el OBD.....	42
2.3.4. Cálculo del consumo de combustible en el sistema OBD .....	43
2.3.5. Data logger: Descripción y funcionamiento .....	44

2.3.6.	Mediciones usando un Flujómetro.....	44
2.4.	Herramienta para el Análisis de Datos.....	47
2.4.1.	Fundamentos de procesamiento de datos.....	47
2.4.2.	Etapas del procesamiento de datos .....	48
2.4.3.	Software para procesamiento de datos.....	48
2.4.4.	R Studio .....	49
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS .....		51
3.1.	Determinación de las Variables de Estudio .....	51
3.1.1.	Variables Cinemáticas .....	51
3.1.2.	Modos de Operación.....	52
3.1.3.	Variables de Operación.....	52
3.1.4.	Parámetros Rendimiento: Motor y Vehículo .....	53
3.2.	Selección del Vehículo .....	53
3.3.	Selección de los Equipos y Sensores .....	54
3.3.1.	Registrador ELM327 .....	55
3.3.2.	Registrador CANedge2.....	56
3.3.3.	Unidad Telemática CANUp 27 Pro LTE G.....	58
3.3.4.	Módulo de Posicionamiento Inercial CANmod.gps .....	59
3.3.5.	Flujómetro de Combustible DFM 100ACAN.....	60
3.3.6.	Dinamómetro BPA-2VR.....	61
3.4.	Pruebas Piloto y Configuración de los Equipos.....	62
3.4.1.	Prueba de Comunicación OBD-II: ELM327 y Torque Pro .....	63
3.4.2.	Instalación de los Flujómetros DFM 100ACAN .....	66
3.4.3.	Configuración del CANedge2.....	69
3.4.4.	Configuración del Módulo CANMod.gps .....	71
3.4.5.	Configuración de la Unidad Telemática CANUp.....	72
3.4.6.	Prueba de conexión: Unidad Telemática CANUp y Servicio Telemático ORF 5 .....	74
3.4.7.	Disposición Final de los Equipos en el Vehículo .....	76
3.5.	Campana Experimental.....	77
3.5.1.	Características de la Ruta Seleccionada.....	77
3.6.	Determinación de Par y Potencia a través del Dinamómetro BPA-V2R.....	81
3.6.1.	Descripción del Ensayo.....	82
3.7.	Procesamiento de los Datos Experimentales .....	83
3.7.1.	Pre - procesamiento de los Datos Experimentales .....	83
3.7.2.	Procesamiento de los Datos Experimentales .....	92

3.7.3. Post – procesamiento de los Datos Experimentales.....	98
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	104
4.1. Cinemática y Modos de Operación del Vehículo .....	104
4.1.1. Cinemática del Vehículo.....	104
4.1.2. Modos de Operación.....	106
4.2. Parámetros de Operación del Motor: Par y Régimen .....	108
4.2.1. Parámetros de Operación del Motor: Urbano, Suburbano y Autopista .....	109
4.3. Mapas Motor.....	111
4.3.1. Consumo de Combustible y Tasa de Emisiones.....	111
4.3.2. Mapas en Términos de Energía al Freno .....	117
4.3.3. Tasa de emisiones de CO <sub>2</sub> por Unidad Energética .....	122
4.4. Factores de emisión y consumo por pruebas .....	124
4.5. Análisis de la Correlación entre los Equipos de Recolección de Información .....	126
4.6. Mapas Comparativos .....	128
4.7. Análisis del Factor de Consumo de Combustible y Emisiones de CO <sub>2</sub> .....	130
4.7.1. Factor de Consumo de Combustible.....	130
4.7.2. Emisiones de CO <sub>2</sub> .....	132
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	135
5.1. Conclusiones.....	135
5.2. Recomendaciones .....	136
ANEXOS .....	138
Anexo1: Resultado de la Prueba en el Dinamómetro .....	138
Anexo2: Configuración del CANedge2.....	139
Anexo 3: Configuración del CANmod.gps.....	143
REFERENCIAS.....	144

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor a gasolina.</i>	39
Tabla 2. <i>Variables Cinemáticas</i> .....	52
Tabla 3. <i>Modos de Operación</i> .....	52
Tabla 4. <i>Variables de Operación del Motor</i> .....	52
Tabla 5. <i>Parámetros de Operación a Nivel Motor y Vehículo</i> .....	53
Tabla 6. <i>Especificaciones técnicas del vehículo utilizado</i> .....	54
Tabla 7. <i>Variables de Interés Recopiladas mediante los diferentes Equipos</i> .....	55
Tabla 8. <i>Especificaciones técnicas del Datalogger CANedge2</i> .....	57
Tabla 9. <i>Descripción del Pin - Out del CANedge2</i> .....	58
Tabla 10. <i>Especificaciones técnicas del CANUp 27 Pro LTE G</i> .....	59
Tabla 11. <i>Especificaciones Técnicas del módulo CANmod.gps con sensor inercial 3D</i> .....	60
Tabla 12. <i>Descripción del Pin -Out del CANmod.gps</i> .....	60
Tabla 13. <i>Especificaciones técnicas del DFM 100ACAN</i> .....	61
Tabla 14. <i>Especificaciones Técnicas del Dinamómetro BPA-2VR</i> .....	62
Tabla 15. <i>Parámetros Seleccionados en la Aplicación Torque Pro</i> .....	65
Tabla 16. <i>Configuración de Time Valid Signal y Time Value Signal</i> .....	71
Tabla 17. <i>Características de la Ruta Completa</i> .....	78
Tabla 18. <i>Características del Subtramo Urbano</i> .....	79
Tabla 19. <i>Características del Subtramo Suburbano</i> .....	80
Tabla 20. <i>Características del subtramo Autopista</i> .....	81
Tabla 21. <i>Parámetros de corrección y depuración de datos para cada prueba experimental</i> ....	91
Tabla 22. <i>Características cinemáticas de la ruta</i> .....	105
Tabla 23. <i>Resumen del comportamiento del vehículo</i> .....	108
Tabla 24. <i>Factores de emisión promedio calculados</i> .....	126
Tabla 25. <i>Indicadores Estadísticos del gráfico de dispersión</i> .....	128
Tabla 26. <i>Resumen factores de consumo de combustible</i> .....	132
Tabla 27. <i>Resumen factores de emisión de CO<sub>2</sub></i> .....	134

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Curva de par</i> .....	33
Figura 2. <i>Curva de potencia</i> .....	33
Figura 3. <i>Curva de consumo específico</i> .....	34
Figura 4. <i>Frente de llama en la combustión de un MEP</i> .....	35
Figura 5. <i>Concentración de Emisiones Contaminantes en un MEP en función del Dosado Relativo</i> .....	36
Figura 6. <i>Esquema de funcionamiento de la cámara de medición del medidor del flujómetro</i> ...	45
Figura 7. <i>Medidor de flujo de cámara única</i> .....	45
Figura 8. <i>Medidor de flujo diferencial</i> .....	46
Figura 9. <i>Medidor de Flujo CAN</i> .....	46
Figura 10. <i>Diagrama de flujo de actividades del proyecto de investigación</i> .....	51
Figura 11. <i>Vehículo seleccionado</i> .....	54
Figura 12. <i>Datalogger ELM 327</i> .....	56
Figura 13. <i>Datalogger CANedge2</i> .....	56
Figura 14. <i>Pin - Out CANedge2</i> .....	57
Figura 15. <i>CANUp 27 Pro LTE G</i> .....	58
Figura 16. <i>Módulo CANmod.pgs con sensor inercial 3D</i> .....	59
Figura 17. <i>Pin - Out del CANmod.gps</i> .....	60
Figura 18. <i>Flujómetro de Combustible - DFM 100ACAN</i> .....	61
Figura 19. <i>Dinamómetro BPA-2VR</i> .....	62
Figura 20. <i>Conexión Puerto OBD-II y Registrador ELM327</i> .....	63
Figura 21. <i>Interfaz de la aplicación Torque Pro</i> .....	64
Figura 22. <i>Pruebas en Ruta</i> .....	65
Figura 23. <i>Esquema de instalación "De Cavitación"</i> .....	66
Figura 24. <i>Instalación física de los medidores de flujo</i> .....	67
Figura 25. <i>Esquema de la instalación eléctrica de los medidores de flujo</i> .....	68
Figura 26. <i>Configuración a modo diferencial</i> .....	69
Figura 27. <i>Herramienta CANedge cfg editor</i> .....	70
Figura 28. <i>Herramienta CANmod cfg editor</i> .....	72
Figura 29. <i>Configuración del CANUp</i> .....	73

Figura 30. <i>Conexión al servicio telemático ORF 5</i> .....	74
Figura 31. <i>Conexión física CANUp - Flujómetros de combustible</i> .....	74
Figura 32. <i>Verificación de conexión en línea de la unidad CANUp en la plataforma ORF Monitor 5</i> .....	75
Figura 33. <i>Visualización de datos transmitidos en la plataforma ORF Monitor 5.</i> .....	76
Figura 34. <i>Disposición final de los equipos</i> .....	76
Figura 35. <i>Ruta Completa</i> .....	78
Figura 36. <i>Tramo Urbano</i> .....	79
Figura 37. <i>Tramo Suburbano</i> .....	80
Figura 38. <i>Tramo Autopista</i> .....	81
Figura 39. <i>Prueba en el dinamómetro BPA-V2R con el vehículo</i> .....	82
Figura 40. <i>Etapas del procesamiento de datos</i> .....	83
Figura 41. <i>Diagrama de Flujo - Etapa Correspondiente al Pre - procesamiento de Datos</i> .....	84
Figura 42. <i>Interfaz de Asammdf con los DBCs cargados</i> .....	85
Figura 43. <i>Interfaz gráfica de RStudio</i> .....	86
Figura 44. <i>Fragmento del código para la limpieza y sincronización de los datos</i> .....	87
Figura 45. <i>Fragmento del código para la interpolación de los datos recopilados mediante el CANUp</i> .....	88
Figura 46. <i>Fragmento del código para corregir el error sistemático en el flujo de combustible</i> .....	90
Figura 47. <i>Variación instantánea de régimen del motor y consumo de combustible</i> .....	91
Figura 48. <i>Diagrama de Flujo - Etapa Correspondiente al Procesamiento de Datos</i> .....	92
Figura 49. <i>Fragmento del código para la obtención de las curvas de par y potencia</i> .....	95
Figura 50. <i>Curvas Par y Potencia del vehículo utilizado</i> .....	96
Figura 51. <i>Fragmento del código para la estimación de los parámetros de operación del motor</i> .....	97
Figura 52. <i>Diagrama de Flujo - Etapa Correspondiente al Post - procesamiento de Datos</i> .....	99
Figura 53. <i>Fragmento del código para la creación de los gráficos de los modos de operación</i> .....	100
Figura 54. <i>Fragmento del código para la creación de los gráficos de frecuencia de operación del motor</i> .....	101
Figura 55. <i>Fragmento del código para la creación de los mapas de motor</i> .....	102
Figura 56. <i>Fragmento del código para la creación de los gráficos de correlación</i> .....	103

Figura 57. <i>Cinemática de la ruta: a) Distancia, b) Velocidad máxima, c) Velocidad promedio,</i> .....	106
Figura 58. <i>Modos de operación: a) Prueba 1, b) Prueba 2, c) Prueba 3, d) Resumen total.....</i>	107
Figura 59. <i>Frecuencia de operación del motor: a) Comparación entre los puntos de operación en condiciones reales y la curva del motor a plena carga, b) Patrones típicos de operación del motor</i> .....	109
Figura 60. <i>Patrones de Operación del Motor: a) Tramo urbano, b) Tramo suburbano, c) Tramo Autopista</i> .....	111
Figura 61. <i>Mapas de motor consumo de combustible instantáneo: a) ELM327: OBD – II, b) CANedge2: Flujómetros, c) CANUp: Flujómetros</i> .....	113
Figura 62. <i>Frecuencia Relativa de consumo de combustible: a) ELM327: OBD – II, CANedge2: Flujómetros y CANUp: Flujómetros, b) Promedio</i> .....	114
Figura 63. <i>Mapas Motor de Tasa de Emisiones de CO<sub>2</sub>: a) ELM327: OBD – II, b) CANedge2: Flujómetros, c) CANUp: Flujómetros</i> .....	115
Figura 64. <i>Frecuencia relativa de emisiones de CO<sub>2</sub>: a) ELM327: OBD – II, CANedge2: Flujómetros y CANUp: Flujómetros, b) Promedio</i> .....	117
Figura 65. <i>Mapas de motor de eficiencia térmica al freno BTE: a) ELM327: OBD – II, b) CANedge2: Flujómetros, c) CANUp: Flujómetros, d) Promedio</i> .....	118
Figura 66. <i>Frecuencia relativa de eficiencia térmica al freno: a) ELM327: OBD – II, CANedge2. Flujómetros y CANUp: Flujómetros, b) Promedio</i> .....	119
Figura 67. <i>Mapas de motor de consumo específico al freno (BSFC): a) ELM327: OBD – II, b) CANedge2: Flujómetros, c) CANUp: Flujómetros</i> .....	120
Figura 68. <i>Frecuencia relativa de consumo específico al freno (BSFC): a) ELM327: OBD – II, CANedge2: Flujómetros y CANUp: Flujómetros, b) Prpomedio</i> .....	122
Figura 69. <i>Mapas de motor de tasa de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad energética: a) ELM327: OBD – II, b) CANedge2: Flujómetros, c) CANUp: Flujómetros</i> .....	123
Figura 70. <i>Frecuencia relativa de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad energética: a) ELM327: OBD – II, CANedge2: Flujómetros y CANUp: Flujómetros, b) Promedio</i> .....	124
Figura 71. <i>Correlación de consumo de combustible: a) ELM327 – CANedge2, b) CANUp – ELM327, c) CANedge2 – CANUp</i> .....	127
Figura 72. <i>Mapas de motor comparativos: a) ELM327 – CANedge2, b) ELM327 – CANUp, c) CANUp – CANedge2</i> .....	129

Figura 73. Registro de datos de mapas comparativos: a) ELM327 – CANedge2, b) ELM327 – CANUp, c) CANUp – CANedge2.....	130
Figura 74. Factor de consumo de Combustible g/km .....	132
Figura 75. Factor de emisión de CO <sub>2</sub> por distancia recorrida g/km .....	134

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Problema de Investigación

#### 1.1.1. Antecedentes

El consumo de energía fósil y las actividades de producción industrial son las principales causas del aumento de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera (Cao et al., 2023). La contaminación del aire es uno de los mayores riesgos ambientales para la salud humana en el mundo. La Agencia Internacional de Energía (IEA) informa que la contaminación por transporte motorizado representa el (75 %) frente a las movilidades aéreas (12 %), marinas (11 %), y férrea (2 %) (Carlos Santiafo Zeas Carillo, 2019).

La cantidad de emisiones de GEI no está necesariamente relacionada con el número de vehículos, si no con la distancia que estos recorren en un año determinado con fines funcionales, como el transporte de pasajeros y carga (Deenapanray & Khadun, 2021). El transporte terrestre al cumplir con el porcentaje más alto también hace uso excesivo de combustibles fósiles incrementando el porcentaje de GEI y con ello cambios notables como, alteración del clima, propagación de enfermedades y el calentamiento global ya que, al generarse ciertas cantidades de CO<sub>2</sub> aumenta el peligro para la salud humana y del planeta. Como ya se había mencionado las emisiones de GEI provenientes del transporte terrestre se debe a tres tipos de combustibles, gasolina, gasóleo y gas licuado de petróleo (GLP).

Todos estos combustibles aportan al deterioro del ecosistema así que, se ha impulsado la reducción de emisiones contaminantes a través de las distintas directivas europeas (normativas conocidas como “euros”: I, II, III, IV, V, VI y la VII). Dentro de este marco están inmersas diversas innovaciones tecnológicas, por ejemplo la introducción de catalizadores los cuales reducen la emisión de CO, hidrocarburos y NOx; además, se implementan estrategias para reducir el consumo de combustible como son: la demanda de potencia, mejoras en el motor, modificaciones en los trenes de potencia o uso de combustibles alternativos, mejoras en la caja de cambios, configuración del tren motriz, logística o selección de rutas y Ecodriving (nuevo estilo de conducción) el cual contribuye a reducir el consumo de combustible, las emisiones al medio ambiente y mejorar la seguridad en la conducción (Avalos, 2020).

Al hablar de modificaciones y nuevas tecnologías hay que recalcar un punto importante que es la trayectoria de los vehículos, estos contienen abundante información sobre sus modos de

conducción y los estados del tráfico, que puede utilizarse para cuantificar emisiones de los gases, consumo de combustible, partiendo de la premisa de que la cantidad de contaminación emitida por un vehículo depende principalmente de sus especificaciones técnicas y de los parámetros de movimiento (Kan et al., 2018). El OBD fue instalado por primera vez por los fabricantes en vehículos ligeros (LDV) con fines de diagnóstico en la década de 1980 en los EE. UU (Wang et al., 2022). Los sistemas de diagnóstico a bordo (OBD) de tercera generación, proporcionan un método alternativo para monitorear las emisiones de los vehículos al equiparlos con módulos de comunicación inalámbrica para transmitir de forma remota el estado operativo y de emisiones en tiempo real.

Uno de los métodos utilizados en la actualidad es, los ensayos de emisiones en condiciones reales, RDE los cuales consisten en la conducción del vehículo por carretera en diferentes condiciones tales como, diferentes temperaturas, altitudes, zona urbana, zona rural, autopistas. Se utiliza un sistema portátil de medición (PEMS) de las emisiones contaminantes, que proporcionan una monitorización completa en tiempo real de los principales contaminantes emitidos por el vehículo (Modet & Caro, 2021).

Dentro de métodos también se puede tomar en cuenta la vía OBDII, gravimétrico, balance de carbono, Flujómetro, pruebas en dinamómetro rigiéndose a las normativas EPA, entre otros (Iván & Palacios, 2021). Tanto el flujómetro como el OBDII son mediciones de volumen en donde el flujómetro, registra el flujo promedio de combustible cada segundo o más dependiendo la necesidad de precisión en la medida, el OBDII se encuentra conectado a la ECU del vehículo, obteniendo una señal de demanda de combustible de la ECU que puede usarse como una estimación de consumo de combustible (Rockwood Iglesias et al., 2020).

Básicamente, el uso de combustibles fósiles es el factor dominante de las emisiones de gases de efecto invernadero. Es indiscutible que las emisiones causadas por la combustión de fósiles son las que más contribuyen al calentamiento global (Y. Zhou et al., 2018). Por esta razón es importante conocer el consumo de combustible por medio de los métodos de cuantificación antes mencionados, que nos permiten conocer en tiempo real la cantidad de combustible y de emisiones que este puede emitir en un transcurso determinado

### **1.1.1. Planteamiento del Problema**

En la actualidad uno de los principales problemas que afecta al medio ambiente, así como también a la pérdida de los recursos naturales son las emisiones de gases de efecto invernadero, tales como

el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Los niveles de estas emisiones han ido aumentando a un ritmo muy acelerado provocando el denominado calentamiento global. Como resultado, la temperatura de la Tierra aumenta rápidamente 0,2 °C, por década, lo que provoca el derretimiento de los glaciares, el aumento del nivel del mar y veranos más intensos (M. Arroyo & Ramírez, 2020).

Entre las principales causas para este incremento de emisiones se puede mencionar al uso intensivo de energía fósil y a las actividades de producción industrial, en la sociedad actual el 85,4% de energía utilizada proviene de energía no renovable principalmente de recursos fósiles derivados del petróleo, siendo los motores de combustión una de las principales causas del aumento de concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Appa Renovables, 2022).

La contribución del transporte terrestre a las emisiones globales de gases de efecto invernadero es significativa, ya que representa aproximadamente el 14% de las emisiones globales de GEI, mientras que la aviación y el transporte marítimo representan el 2,2% de dichas emisiones (ICM, 2021). En Ecuador, se produjo un aumento del 9,9% en las emisiones de gases de efecto invernadero entre 2012 y 2022, lo que supuso un total de 41496 kton equivalentes de CO<sub>2</sub>. El principal contribuyente a estas emisiones en 2022 fue el diésel, con un 38%, seguido de la gasolina, con un 27,1% y el GLP, con un 9,4%. En conjunto, estas tres fuentes representaron el 74,5% de las emisiones durante el año (Ministerio de Energía y Minas, 2022).

En los vehículos a nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> depende de la cantidad de combustible consumido, esto permite que, si se conoce el consumo de combustible de un vehículo en términos de kilómetros por galón, se puede estimar el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> emitidos por este en términos de gramos de CO<sub>2</sub> por kilómetro. Por tales razones, múltiples estudios se han centrado en analizar o estimar el consumo de combustible y el porcentaje de emisiones, utilizando diversas metodologías que implican herramientas de medición como caudalímetros, OBD, herramientas PEMS, GPS, entre otros (Carlos Santiago Zeas Carillo, 2019).

Por ello, el Ministerio Energía Ecuatoriano está implementando medidas para disminuir el consumo de combustible y, en consecuencia, el porcentaje de emisiones. Una de estas estrategias ha sido la actualización de la flota de vehículos del país, debido a que los nuevos modelos presentan un mayor rendimiento en comparación a sus modelos predecesores (Ministerio de Energía y Minas, 2022).

## 1.2. Justificación

En el marco del plan de creación de oportunidades para el periodo 2021-2025, se establece el duodécimo objetivo, que se centra en el desarrollo de modelos sostenibles mediante la aplicación de medidas de adaptación y mitigación al cambio climático. De manera más específica, en la Política 12.2, apartado F2, se detallan los lineamientos territoriales que abordan la implementación de esquemas para la gestión integral de pasivos ambientales y emisiones atmosféricas contaminantes, abarcando tanto zonas urbanas como rurales (*Plan-de-Creación-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado*, 2021).

En concordancia con este objetivo, el presente estudio tiene como propósito comparar las tasas y factores de consumo de combustible de vehículos en condiciones de tráfico real. Investigaciones previas, como la referenciada en (M. Zhou et al., 2016), han señalado que la carretera, el conductor y el tráfico son los factores más influyentes en el consumo de combustible. Por ende, este trabajo de investigación busca validar dicha información mediante la medición del consumo de combustible en condiciones de tráfico real.

Para llevar a cabo este propósito, se emplearán dos métodos de medición distintos: la interfaz OBD y el flujómetro. Según la investigación de (Carlos Santiago Zeas Carillo, 2019), el método más comúnmente utilizado para medir el consumo de combustible se basa en los datos obtenidos a través del puerto OBD. Este método proporciona información detallada mediante sensores adicionales en el vehículo. Sin embargo, algunos estudios han empleado flujómetros de combustible, que son métodos directos que utilizan sensores de flujo conectados a la línea de alimentación del motor.

Los datos recopilados mediante ambos métodos se utilizarán para crear mapas de eficiencia y consumo del motor, permitiendo evaluar su rendimiento en condiciones reales. Estos mapas posibilitan una inspección detallada, analizando el consumo de combustible y las emisiones del motor segundo a segundo, como se evidenció en la investigación de (Rosero et al., 2020).

Estos mapas de motor contribuirán a identificar las condiciones de funcionamiento del motor, especialmente en lo que respecta a la relación entre el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes en situaciones de ralentí, media carga y plena carga. A fin de promover políticas que se centren en mitigar el cambio climático, abordando las emisiones atmosféricas contaminantes, en cumplimiento con el duodécimo objetivo del plan de creación de oportunidades para el periodo 2021-2025.

### **1.3.Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Analizar las tasas de consumo de combustible de un vehículo, comparando datos del sistema de diagnóstico a Bordo (OBD) respecto a mediciones con flujómetro.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Registrar el consumo de combustible de un vehículo durante su operación en condiciones de tráfico urbano.
- Comparar las tasas y factores de consumo de combustible registradas por el sistema OBD con las mediciones de un flujómetro para un vehículo en condiciones de tráfico real.
- Identificar las zonas de operación del motor donde existe mayor discrepancia entre los dos métodos de medición, usando el enfoque de mapas de motor.

### **1.4. Alcance**

El presente estudio se enfoca en analizar el consumo de combustible en vehículos livianos operando en condiciones reales de operación. En general, este estudio será desarrollado en cinco fases. En primer lugar, se llevará a cabo la selección de un vehículo de la categoría M1 (Vehículos motorizados con capacidad no mayor a ocho plazas) (Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2656, 2016), que sean representativos de la flota de vehículos de la provincia de Imbabura. En segundo lugar, se realizará una selección de los equipos para medir el consumo de combustible a bordo de los vehículos. De hecho, para esta medición se utilizarán todos tipos de equipos: (i) una interfaz OBD que estima el consumo de combustible, un flujómetro que mide físicamente el combustible usado en el vehículo. En tercer lugar, se realizará una campaña experimental con los vehículos y equipos de medición seleccionados. La campaña se llevará a cabo en una ruta predefinida de la ciudad de Ibarra que incluya zonas urbanas, periféricas y de autopista. En cuarto lugar, los datos obtenidos serán procesado en un software estadístico para crear mapas de motor de los vehículos evaluados. En la quinta etapa, se utilizará dichos mapas, los que permitirán realizar una comparación entre las tasas de consumo de combustible obtenidos mediante la interfaz OBD y las mediciones físicas realizadas con el flujómetro. La comparación se la realizará para diferentes condiciones de funcionamiento del motor, tales como ralentí, media carga y plena carga.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Operación del Motor de Combustión en el Vehículo**

##### **2.1.1. Vehículo**

El termino automóvil es de origen francés y significa, “coche que se mueve por sí mismo”. Su aplicación está dirigida concretamente para vehículos de desplazamiento terrestre, diseñados para el transporte de personas (Lizano, 2017). Hoy en día el automóvil es conocido como un vehículo motorizado con la capacidad de tener auto movimiento. Esta capacidad hace que no sea necesario el uso de fuerza humana o animal para movilizarse de un lugar a otro (Santos, 2018).

La clasificación de los vehículos se orienta principalmente en sus características técnicas y comerciales. De este modo bajo la denominación de automóvil se pueden considerar a las motocicletas, autos, camiones de carga, autobuses, entre otros (Soca, 2022). Los avances tecnológicos y científicos han sido claves para mejorar la movilidad. Gracias a estos avances se ha conseguido pasar de los medios de transporte tradicionales impulsados por animales a maquinas diseñadas para suplir la necesidad de movimiento. Generalmente estas máquinas son impulsadas por un motor de explosión o de combustión interna. Estos motores son llamados de esta manera ya que en su interior se produce la combustión del combustible (Muñoz, 2020).

##### **2.1.2. Motores de Combustión Interna: Fundamentos y Clasificación**

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA), son conocidos por ser motores térmicos volumétricos. Estos motores tienen esta denominación debido a que el fluido evoluciona en el motor generando el estado térmico característico propio de estos. Además, en estos motores la energía química que contiene el combustible se transforma en energía térmica mediante la combustión. Posteriormente, esta energía térmica es aprovechada como trabajo transformándose en energía mecánica gracias al mecanismo biela-manivela (Á. L. Martínez, 2020). Los MCIA se dividen en diferentes tipos, dependiendo de las características propias que cada uno posee.

###### **2.1.2.1. Clasificación de los MCIA.**

Los MCIA en función de sus principales características pueden ser clasificados de la siguiente manera (Rovira de Antonio & Muñoz Domínguez, 2015):

- **En relación con el proceso de combustión:**

Los MCIA se clasifican según el proceso de combustión en dos grupos principales: Motores de Encendido Provocado (MEP) y Motores de encendido por compresión (MEC). Los MEP

conocidos generalmente como motores de ciclo Otto se caracterizan por que la mezcla de combustible con aire se obtiene al finalizar la etapa de compresión. Además, la ignición o encendido de la mezcla sucede gracias al salto de una chispa (Agente externo). Otra característica de estos motores es la regulación de la carga. Esta regulación tiene lugar a partir del estrangulamiento del conducto de admisión por medio de una válvula de mariposa. De esta manera, en estos motores el control de la potencia se basa en la introducción de más o menos mezcla de aire – combustible.

Los MEC por el contrario se caracterizan por que el fluido que se comprime en este caso es aire. Debido a esto, la inyección del combustible sucede una vez finalizada la etapa de compresión. Las condiciones de presión y temperaturas alcanzadas con la compresión del aire aseguran la correcta auto inflamación de la mezcla. A diferencia de los motores MEP, en estos motores la regulación de la carga se basa en la cantidad de combustible que se inyecta. Por lo general estos tienen un Dosado bajo (Mezcla pobre). Pero este aumenta consecutivamente con la carga del motor.

- **En relación con el modo de realización del ciclo:**

Los MCIA también se clasifican según relación con el modo de realización del ciclo en dos principales grupos: Motor de cuatro tiempos y Motor de dos tiempos. Los motores de cuatro tiempos necesitan de cuatro carreras del pistón o a su vez dos revoluciones del cigüeñal para llevar a cabo un ciclo completo. Además, su correcto funcionamiento se basa principalmente en la sincronización entre la apertura y cierre de las válvulas con cada uno de los tiempos del pistón o con las revoluciones del cigüeñal.

Los motores de dos tiempos se caracterizan por tener únicamente dos carreras o una revolución del cigüeñal para realizar todos los procesos. La admisión y escape se realizan conjuntamente en un proceso denominado barrido. Además, estos motores generan mayor potencia específica a diferencia de los motores de cuatro tiempos.

- **En relación con el tipo de refrigeración:**

Los MCIA también se clasifican según el tipo de refrigeración en dos principales grupos: Motores refrigerados por aire y motores refrigerados por líquido. En los motores con refrigeración por aire, la refrigeración sucede gracias al aire presente en la atmósfera. Para conseguir esto, los componentes que requieren refrigeración tienen un diseño con varias aletas en su estructura. Estos diseños mejoran la transmisión de calor al ambiente. Este tipo de refrigeración es utilizado generalmente en motores pequeños.

Los motores refrigerados por líquido por el contrario presentan un fluido refrigerante, generalmente agua con aditivos anticongelantes. Este fluido cede el calor generado por el motor al ambiente. Además, en estos motores existen componentes auxiliares como la bomba de agua y el radiador y a diferencia de la refrigeración por aire este tipo de refrigeración es más eficiente por lo que se utiliza en motores de media y alta potencia.

- **En relación con la presión de admisión:**

Los MCIA también se clasifican según la presión de admisión en dos principales grupos: Motores de aspiración natural y Motores sobrealimentados. En los motores de aspiración natural el aire que ingresa al motor mantiene la presión atmosférica. O un valor relativamente inferior debido a diversas pérdidas de carga. Por el contrario, en los motores sobrealimentados la presión del aire que se introduce es superior a la atmosférica. Esto se debe a la sobrealimentación cuya finalidad es introducir más cantidad de aire en los cilindros. Para conseguir esto, estos motores utilizan un turbo compresor, accionado por una turbina en el escape.

- **En relación con el número y disposición de los cilindros:**

Los MCIA también se clasifican según número y disposición de los cilindros en diferentes grupos: Motores en línea, motores en V, motores en bóxer y en otras disposiciones. Los motores en línea disponen únicamente de una bancada de cilindros. Los motores en V por el contrario disponen de dos bancadas de cilindros. Esta disposición se da en forma de V y con un ángulo de desfase de 60, 90 o 120° entre cada una. Los motores en bóxer representan un caso particular de los motores en V ya que el ángulo de desfaz entre cada bancada es de 180°. Finalmente se tienen otras disposiciones que representan casos especiales. Por ejemplo, los motores en forma de W, con más de dos bancadas de cilindros. También están los motores en estrella cuyo uso se centra en la aviación debido a las grandes potencias que generan con relación a su unidad de peso (Rovira de Antonio & Muñoz Domínguez, 2015).

### **2.1.3. Principio de Funcionamiento Motores Encendido Provocado**

El principio de funcionamiento de los MEP se basa en la combustión del combustible, misma que se consigue mediante la presión y el calor generados por la alta compresión del aire o la asistencia de una chispa eléctrica (bujía) dentro de los cilindros. Una vez que la mezcla aire-combustible se introduce en el interior del cilindro, el frente de llama recorre la cámara de combustión iniciando desde la bujía y dividiendo constantemente la cámara de combustión en dos zonas claramente

definidas: una con gases frescos y otra con gases quemados (Rovira de Antonio & Muñoz Domínguez, 2015).

### **2.1.3.1. Ciclos de Operación**

El ciclo de operación de un MEP se refiere a la secuencia de operaciones que ocurren dentro del cilindro que se repiten de manera cíclica. En función del número de veces que el pistón recorre su trayectoria es posible calcular la duración de este ciclo (Payri González & Desantes Fernández, 2011). Las diferentes etapas de funcionamiento de los motores de cuatro tiempos se definen de la siguiente manera (A. Martínez et al., 2012):

- **Primer Tiempo – Admisión:** Esta fase se caracteriza por mantener abierta la válvula de admisión y cerrada la de escape. Además, la mezcla de aire y combustible es aspirada debido al movimiento descendente del pistón. En la primera carrera, el cigüeñal y el árbol de levas giran  $180^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente logrando de esta manera que la válvula de admisión este abierta y el movimiento sea descendente.
- **Segundo Tiempo – Compresión:** En esta fase se comprime la mezcla aire- combustible en el cilindro. Esto sucede debido a que una vez que el pistón llega al final de la carrera inferior, ambas válvulas se encuentran cerradas y el movimiento ascendente ocasiona que el gas contenido en la cámara se comprima. Aquí, el cigüeñal y el árbol de levas giran  $360^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente.
- **Tercer Tiempo – Explosión:** En esta fase el pistón llega al final de su carrera superior y el gas alcanza su presión máxima. En este momento ocurre la combustión de la mezcla gracias al salto de la chispa. El progreso de la combustión es rápido y tanto la temperatura como la presión se incrementan en el cilindro. Los gases empujan el pistón en una carrera descendente obteniéndose así el trabajo del motor.
- **Cuarto Tiempo – Escape:** En esta fase se realiza el escape de los gases quemados en el cilindro. El pistón comienza a su carrera ascendente y en su camino empuja los gases resultantes de la fase anterior. Durante este movimiento ascendente, la válvula de escape permanece abierta, de modo facilita la salida de los gases quemados producto de la combustión.

### **2.1.4. Características de los MEP**

El funcionamiento teórico de un MCIA logra identificarse en función de tres parámetros básicos: Geométricos, de funcionamiento e indicativos y efectivos.

### 2.1.4.1. Patrones Geométricos

Estos parámetros plantean las características geométricas del motor y de sus elementos siendo estos: Diámetro del cilindro, mismo que junto con la carrera del pistón sirven para caracterizar el tamaño del motor. Este diámetro es ligeramente superior al del pistón lo que permite un movimiento lineal libre entre estos dos componentes. Carrera del pistón que comprende la distancia desde el punto muerto superior PMS hasta el punto muerto inferior PMI. Relación carrera-diámetro que se utiliza para clasificar los motores en tres tipos (motores supercuadrados, cuadrados y alargados). Longitud de la manivela que corresponde a la distancia existente desde el eje del cigüeñal hasta el eje de apoyo de la biela. Longitud de la biela, distancia comprendida entre el bulón del pistón y la articulación de la manivela (M. A. Arroyo, 2019).

La Sección del pistón es el área del pistón que tiene contacto con la mezcla. Esta se calcula tomando en cuenta el diámetro del pistón con la Ecuación 1.

$$A_p = \frac{\pi * D^2}{4} \quad \text{Ec. (1)}$$

La cilindrada unitaria  $V_D$  a diferencia de la total, es el valor resultante del cálculo para un cilindro. Por el contrario, la cilindrada total  $V_T$  el valor resultante del cálculo para todos los cilindros del motor y se calculan según la Ecuación 2 y 3 Donde  $Z$  representa el número de cilindros del motor.

$$V_D = A_p * S \quad V_T = A_p * S * Z \quad \text{Ec. (2 y 3)}$$

El volumen de la cámara de combustión es el valor correspondiente al volumen mínimo que alcanza el cilindro cuando se encuentra en el punto muerto superior PMS y finalmente, la relación de compresión hace referencia al cociente entre el volumen máximo y mínimo del cilindro durante un ciclo del motor. Esta relación se calcula mediante la ecuación 4 de la siguiente manera:

$$r_c = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_D + V_C}{V_C} \quad \text{Ec. (4)}$$

### 2.1.4.2. Parámetros de Funcionamiento

Estos parámetros toman en cuenta diferentes características del funcionamiento del motor y estos son: Velocidad lineal media del pistón, la unidad de medida de esta es las revoluciones por minuto. Se calcula partiendo del régimen de giro del motor y de la carrera del pistón mediante la ecuación 5.

$$C_m = 2 * S * n \quad \text{Ec. (5)}$$

Otros parámetros de funcionamiento de los MCIA son: El grado de carga que se define como la relación entre la potencia que genera un motor y la potencia máxima que puede llegar a generar. La presión de admisión cuyo valor puede cambiar dependiendo de si se utiliza o no un sistema de sobrealimentación en el motor. El Dosado, parámetro enfocado en la caracterización de la mezcla de combustible y aire. El Dosado estequiométrico se define como el proceso de combustión en el que tanto el combustible como el oxígeno se reaccionan de tal manera que no dan lugar a la aparición de ningún reactivo. Por otra parte, el Dosado relativo se obtiene a partir del cociente entre el Dosado y el Dosado estequiométrico (Ecuación 6). Y dependiendo del valor resultante la mezcla poseerá diferentes características (M. A. Arroyo, 2019).

$$F_R = \frac{F}{F_e} \quad \text{Ec. (6)}$$

Dosado pobre:  $F_R < 1$

Dosado estequiométrico:  $F_R = 1$

Dosado rico:  $F_R > 1$

### 2.1.4.3. Parámetros Indicativos y Efectivos

Este es un parámetro en el que se identifica tanto las prestaciones como las emisiones del motor en un punto en concreto de funcionamiento de la siguiente manera: Parámetros indicados, estos no conllevan relación alguna con las pérdidas mecánicas que tienen lugar en el interior de los motores. Por el contrario, estos parámetros se enfocan en identificar lo que sucede en el interior de los cilindros. Los parámetros indicados se relacionan con la evolución de la presión en un ciclo de trabajo del motor. Los parámetros indicados más relevantes son: Trabajo indicado, presión media indicada, potencia indicada, rendimiento y par indicados (M. A. Arroyo, 2019).

Los parámetros efectivos guardan cierta relación con el eje del cigüeñal. En estos parámetros las pérdidas mecánicas ya sea por fricción, por accionamiento de elementos auxiliares o por pérdidas de bombeo se toman en cuenta a diferencia de los parámetros indicativos (M. A. Arroyo, 2019).

### 2.1.5. Sistema de Alimentación de Combustible

En los motores, la mezcla aire-combustible se origina ya sea a partir de un carburador o de un equipo de inyección. No hasta hace mucho, el carburador era el medio más utilizado para la realización de esta mezcla. Esto se debe a diferentes factores que lo diferencian de los sistemas de inyección. Los principales son: El costo, siendo más económicos a comparación con un sistema de inyección moderno. Reparación y mantenimiento, el carburador posee un diseño simple y

menos complejo a diferencia del sistema de inyección. Lo que vuelve relativamente más sencilla su reparación y mantenimiento. Adaptabilidad, poseen una gran facilidad de adaptación y modificación dependiendo de los requisitos de rendimiento (Álvarez & Álvarez, 2023).

A pesar de esto, actualmente la tendencia de preparar la mezcla a través de un sistema de inyección en el colector de admisión ha aumentado considerablemente. Este incremento se debe a las múltiples ventajas que este sistema tiene en consideración al sistema tradicional de carburador.

En general, los sistemas de inyección de combustible proporcionan una precisa dosificación de combustible en función ya sea de los estados de marcha y carga del motor. Esto provoca que los gases de escape contengan cantidades mínimas de elementos nocivos. La sustitución del carburador por un sistema de inyección de combustible ocasiona que el diseño de los conductos de admisión varíe su forma o estructura. Esta variación trae consigo un llenado de los cilindros más eficiente favoreciendo tanto al par motor como a la potencia (Romero & Rivera, 2005).

#### **2.1.5.1. Clasificación de los Sistemas de Inyección**

Los sistemas de inyección se clasifican en función de diferentes características de la siguiente manera: Según el lugar donde se inyecta, según el Numero de Inyectores y según el número de Inyecciones.

#### **2.1.5.2. Según el lugar donde se inyecta**

Los sistema de inyección según el lugar en donde se da la inyección de combustible se clasifican en dos principales grupos: Sistema de inyección directa y sistema de inyección indirecta. El sistema de inyección de combustible directa es el más novedoso y se caracteriza por que el combustible es suministrado directamente en la cámara mediante un inyector. En el sistema de inyección indirecta, por el contrario, el combustible se suministra en el colector, por encima de la válvula de admisión, misma que generalmente no se encuentra abierta (Cabrera & Cifuentes, 2009).

#### **2.1.5.3. Según el Numero de Inyectores**

Los sistema de inyección según el número de inyectores se clasifican en dos principales grupos: Sistema de inyección Monopunto y sistema de inyección multipunto. El sistema de inyección monopunto se caracteriza por tener únicamente un inyector. Este único inyector tiene la tarea de proporcionar el combustible en el colector, antes de la mariposa de los gases. El sistema de inyección multipunto por el contrario incorpora un inyector en cada cilindro del motor. Además,

este es el sistema que más se utiliza en vehículos de media y alta cilindrada (Cabrera & Cifuentes, 2009).

#### **2.1.5.4. Según el número de Inyecciones**

Los sistema de inyección según el número de inyecciones de combustible realizadas se clasifican en los siguientes grupos: Inyección continua, inyección intermitente.

En el sistema de inyección continua los inyectores suministran el combustible al colector de manera continua. En el sistema de inyección intermitente por el contrario el inyector funciona de manera intermitente. La ECU es la encargada de enviar las ordenes de apertura y cierre en el inyector. Este tipo de inyección se divide en tres tipos característicos: Inyección Secuencia, Inyección Semi – Secuencial e Inyección Simultánea (Cabrera & Cifuentes, 2009).

En el sistema de inyección secuencial, los inyectores funcionan de manera independiente de forma sincronizada. Estos inyectores suministran el combustible en el cilindro por medio de la válvula de admisión. En el sistema de inyección semi – secuencial, los inyectores trabajan en pares. Es decir que se abren y cierran de dos en dos. Finalmente, en el sistema de inyección simultánea todos los inyectores funcionan a la vez. Es decir que los inyectores se abren y cierran al mismo tiempo suministrando el combustible a los cilindros (Cabrera & Cifuentes, 2009).

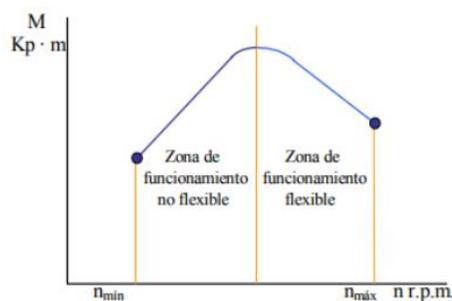
#### **2.1.6. Curvas Características de los MCI**

Estas curvas se obtienen en bancos de pruebas, en los que se somete al motor a aceleraciones constantes y velocidades variables. Además, estas curvas se utilizan para identificar diferentes aspectos en el motor, mediante la evaluación del desempeño del régimen de giro y del grado de carga. Las principales curvas características de un motor son: Par, potencia y consumo específico en función del régimen del motor.

##### **2.1.6.1. Par**

Desde el punto de vista termodinámico, el Par es la capacidad que tienen los MCI para realizar un trabajo. Este trabajo se lo obtiene a partir de una fuerza que hace posible el giro del cigüeñal. Posteriormente, este movimiento de giro se transmite a los demás componentes mecánicos del motor. Esta variable depende directamente de la potencia generada en la cámara de combustión y del régimen de giro del motor (D. M. Arias & Ladino, 2018). Por lo que se lo puede calcular a partir de la ecuación 7.

$$P = T * \omega \quad \text{Ec. (7)}$$

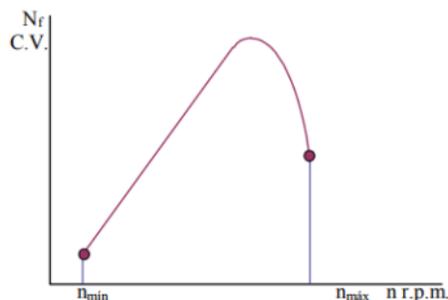


**Figura 1.** *Curva de par*

(D. M. Arias & Ladino, 2018)

### 2.1.6.2. Potencia

La potencia se entiende como la cantidad de energía que obtenida por unidad de tiempo. En la curva de la potencia se observa un crecimiento lineal entre en régimen de giro y la potencia al freno. Pero a medida que se acerca a la velocidad angular del cigüeñal, se activan los reguladores que disminuyen el paso de combustible por seguridad. Por tal motivo se observa en la figura 2 que la potencia tiende a disminuir a tal punto de considerarse un valor relativamente bajo en condiciones de un régimen alto (D. M. Arias & Ladino, 2018).

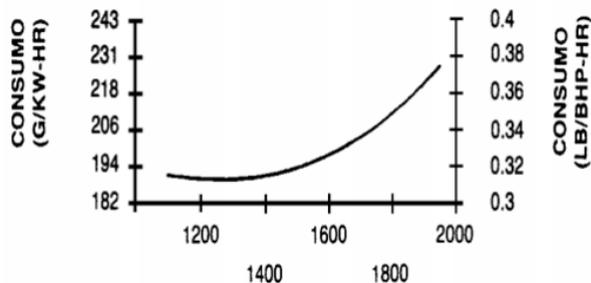


**Figura 2.** *Curva de potencia*

(D. M. Arias & Ladino, 2018)

### 2.1.6.3. Consumo Específico en Función del Régimen

Comprende el caudal de combustible en función a la energía proporcionada por el motor y sus unidades son  $\left[\frac{g}{KW \cdot h}\right]$ . Mediante el diagrama de consumo específico de combustible se puede representar la variación del consumo en relación con el giro del cigüeñal. Generalmente es de mucha utilidad para poder comparar la eficiencia entre diferentes motores y para poder definir que combustible genera mejores resultados en motores de diferentes tamaños (D. M. Arias & Ladino, 2018).



**Figura 3.** *Curva de consumo específico*

(D. M. Arias & Ladino, 2018)

## 2.2. Formación de Emisiones Contaminantes: CO<sub>2</sub> y Consumo

### 2.2.1. Fundamentos del Proceso de Combustión en Motores

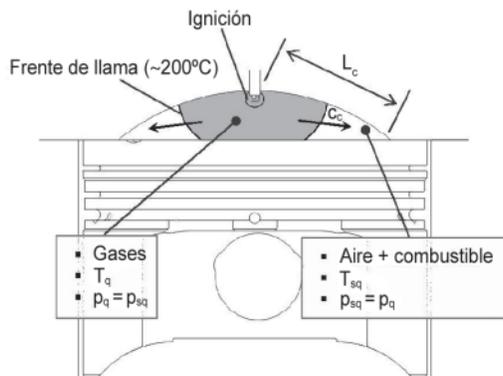
Una correcta combustión de la mezcla en los motores representa un factor decisivo para conseguir un máximo aprovechamiento de trabajo mecánico del motor. Los MCIAs utilizan diferentes técnicas que permiten variar la mezcla de aire y combustible. El objetivo principal del proceso de formación de la mezcla es proporcionar un mezclado eficiente. Para esto se toman en cuenta aspectos como: combustión completa, mínima formación de compuestos contaminantes y la reducción del desgaste en las piezas imprescindibles del motor (Figueroa Salgado & Araque Maldonado, 2005).

#### 2.2.1.1. Aspectos Generales de la Combustión

A modo de conseguir una correcta combustión en los MCIAs se definen los siguientes aspectos generales que esta debe poseer (Figueroa Salgado & Araque Maldonado, 2005):

- **Proceso físico-químico:** Hace referencia a un proceso en el que se consume principalmente una mezcla de combustible y aire generando elevadas temperaturas y presiones. El desarrollo de este proceso se rige bajo las siguientes características: velocidad de la reacción química, transferencia de calor y pérdidas de calor.
- **Fase gaseosa:** Este término hace referencia a la presencia del combustible en fase gaseosa. Esto permite tener una mezcla homogénea, mejorando el proceso de desarrollo de la combustión.
- **Reacciones de oxidación:** Son reacciones dependientes directamente de la presión, temperatura y concentración de la reacción de combustión.
- **Autoinflamación:** Es un fenómeno que surge a partir de un desprendimiento de calor con más velocidad que la velocidad de extracción.

- Propagación de llama: La reacción de combustión generalmente tiene lugar en una zona delgada llamada frente de llama. El frente de llama consta de dos zonas representativas: precalentamiento y reacción. La zona de precalentamiento sirve para preparar la mezcla e iniciar la combustión.



**Figura 4.** Frente de llama en la combustión de un MEP

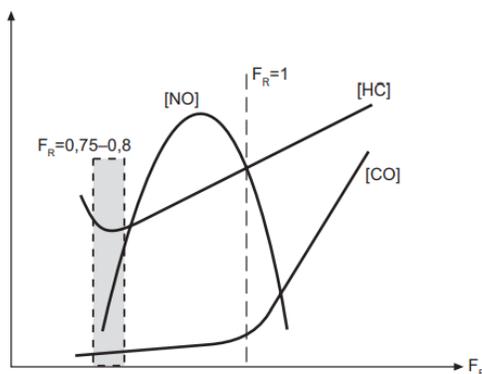
(Rovira de Antonio & Muñoz Domínguez, 2015)

### 2.2.2. Mecanismos de Emisiones

La mayoría de los vehículos que actualmente circulan por las carreteras son potenciados por un motor de combustión interna. Estos motores se impulsan utilizando diversos tipos de combustibles, generalmente fósiles. En el proceso de combustión se consigue que el combustible se quemé. La combustión lleva consigo la generación de varios gases contaminantes que son enviados a la atmósfera. Las emisiones de estos gases dependen de las características propias de cada vehículo como: el año, peso y sistemas de control de emisiones (Núñez, 2018). Durante la combustión perfecta las partículas de Carbono se unen a las del Oxígeno generando Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) y las partículas de Hidrógeno se une a las del Oxígeno dando lugar al vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Esta combustión sucede únicamente cuando por cada gramo de combustible se tiene 14.7 gramos de aire (mezcla estequiométrica) (E. I. Arias & Ludeña, 2018).

Entre las principales emisiones de los motores MEP se destacan por toxicidad y cantidad el Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ ), los Óxidos de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y los Hidrocarburos ( $\text{HC}$ ) (Ávila et al., 2005). El Monóxido de carbono se origina debido a una falta de oxígeno durante el proceso de combustión de un combustible que contenga Carbono. Este es un gas incoloro y muy peligroso para la salud de las personas debido a su toxicidad. Por otra parte, los Hidrocarburos se originan debido a una combustión incompleta de los combustibles fósiles. Estos son compuestos relacionados directamente con la formación de contaminantes atmosféricos. Po otra parte los

Óxidos de Nitrógeno son compuestos producto de una combustión a elevadas temperaturas y presiones. La emisión de estos se relaciona con las lluvias acidas y la contaminación del aire (Sanchez & Zúñiga, 2018).



**Figura 5.** *Concentración de Emisiones Contaminantes en un MEP en función del Dosado Relativo*

(Rovira de Antonio & Muñoz Domínguez, 2015).

### 2.2.3. Tipos de misiones: GEI vs Contaminantes

#### 2.2.3.1. Gases de Efecto Invernadero GEI

Estos gases son componentes de origen natural y antropógeno. Estos captan y emiten radiación desde la superficie terrestre en específicas longitudes de onda. Esta radiación, es el principal factor por el que se origina el efecto invernadero en nuestro planeta. La atmosfera terrestre contiene diferentes gases de efecto invernadero. Los principales son: Vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ) y el óxido nítrico ( $N_2O$ ) (H. O. Benavides & León, 2007).

- *Efecto Invernadero Natural:* Cerca de un tercio de la radiación solar que ingresa al planeta es reflejada nuevamente hacia el espacio. La Tierra y la atmósfera emiten radiación en forma de ondas infrarrojas de longitud larga. Algunas de estas ondas infrarrojas liberadas son retenidas por los gases de efecto invernadero presentes de manera natural y por las nubes (Madrazo, 2017).
- *Efecto Invernadero Antropogénico:* Tiene relación directa con las diferentes actividades realizadas por las personas como: la explotación de combustibles fósiles, deforestación y agricultura. La intensidad del efecto invernadero causado por actividades humanas varía según el grado de aumento en la concentración de cada gas (Madrazo, 2017).

El dióxido de carbono ( $CO_2$ ) es el GDI más abundante. Este gas es incoloro y se origina a partir de la combustión de combustibles fósiles. Además, las emisiones de  $CO_2$  por medio de fuentes

móviles como vehículos corresponden un total del 29% del total de emisiones de gases contaminantes en EE.UU. (E. J. Jiménez & Cárdenas, 2023).

### **2.2.3.2. Gases Contaminantes**

Los gases contaminantes son sustancias químicas que se liberan a la atmósfera por medio de vehículos propulsados por motores. Una vez que estos gases se liberan, son extremadamente nocivos tanto para la salud de las personas como para el medio ambiente. Los principales gases contaminantes son: Los compuestos orgánicos volátiles (COV), Óxidos de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y otros elementos nocivos (E. J. Jiménez & Cárdenas, 2023).

- *Monóxido de Carbono*: Es uno de los principales gases contaminantes que los vehículos emiten. Es un gas incoloro, inodoro, inflamable y altamente tóxico. Se origina a causa de una combustión incompleta debido a la falta de oxígeno en combustibles que contienen carbono (Sanchez & Zúñiga, 2018).
- *Hidrocarburos no Combustionados*: Generalmente son combustibles parcialmente quemados emitidos a la atmósfera a través del tubo de escape. De todos los hidrocarburos el más perjudicial para la salud de las personas es el Benceno, ya que es cancerígeno (Sanchez & Zúñiga, 2018).
- *Óxidos de Nitrógeno*: Los motores de combustión interna emiten óxidos de nitrógeno en proporciones variables de NO y  $\text{NO}_2$ . Estos se generan mediante dos procesos diferentes. En primer lugar, debido a elevadas temperaturas durante la combustión se originan óxidos nítricos. Posteriormente, este componente se oxida originándose dióxido de nitrógeno (Sanchez & Zúñiga, 2018).

### **2.2.4. Tecnologías para reducir el Consumo de Combustible**

Con el paso de los años se han puesto en práctica diferentes tipos de iniciativas y estrategias a modo de reducir el consumo de combustible y las emisiones en los vehículos. Esto debido a que la mayoría de los vehículos utilizan combustibles derivados del petróleo como alimentación, es decir energía no renovable. Varios países alrededor de todo el mundo cuentan con diferentes estrategias planteadas para amenorar el consumo de combustible en los vehículos. En Ecuador, el 42% de la demanda energética es utilizada únicamente por el sector del transporte. Siendo los combustibles más utilizados el Diesel en un 45% y la gasolina en un 41% (Tapia et al., 2017).

Las diferentes medidas que existen para reducir el consumo de combustible se clasifican en mejoras tecnológicas, de gestión y educación cultural. Las primeras se enfocan en realizar avances

tecnológicos e implementarlos a los vehículos. La segunda tiene relación con las empresas de transporte. Es decir, en mejorar la planificación de las rutas disminuyendo distancias de viaje. Y por último la tercera tiene que ver con el cambio del comportamiento de los conductores. Trayendo consigo un manejo del vehículo más eficiente hablando energéticamente (Ramírez, 2014).

Dentro de las mejoras tecnológicas que se han implementado en los vehículos a lo largo del tiempo se tiene las principales son: Reducción del tamaño del motor (DOWNSIZING cuyo propósito es el de tener un motor con menos pistones y de menor cilindrada, manteniendo al mismo tiempo una mayor potencia y un menor consumo de combustible. Gracias a esta tecnología, se optimiza la quema del combustible, se mejora el rendimiento y se reduce la emisión de contaminantes.

Otra alternativa tecnológica implementada en algunos vehículos es la desactivación de Cilindros. Este sistema opera cerrando determinados cilindros cuando el motor no los necesita. De este modo se logra un ahorro eficiente de combustible y una reducción de las emisiones contaminantes. Esta tecnología proporciona un rendimiento de combustible con un ahorro del 20% al desactivar algunos cilindros. La Inyección directa de Gasolina GD es otra alternativa tecnológica. En esta el combustible se pulveriza directamente dentro de la cámara de combustión. Este proceso permite que la mezcla se realice en el cilindro, evitando pérdidas o evaporaciones antes de llegar a la cámara. Como resultado, se logra una significativa reducción de las emisiones contaminantes y se mejora el rendimiento del combustible (Guerrero & Nieto, 2018).

El Sistema Start-Stop se activa de forma automática, apagando el motor durante el ralentí o cuando el embrague no está presionado, y lo reinicia al pisar el acelerador. Esto conduce a un mejor rendimiento del combustible al reducir significativamente su consumo y las emisiones contaminantes. La sincronización de Válvulas Variable VVT es una tecnología que posibilita aumentar tanto el torque como la potencia, logrando que el motor sea más eficiente. Este sistema ajusta el periodo de apertura y cierre de las válvulas del motor, en función de los requisitos y las distintas velocidades permitiendo que el motor sea entre un 10% y un 20% más eficiente (Guerrero & Nieto, 2018).

### **2.2.5. Normativa de Control de Emisiones**

A manera de disminuir y mitigar las emisiones causadas por la combustión de combustibles como gasolina y diésel, en los motores de los vehículos, se han planteado diferentes normas y regulaciones que deben de ser cumplidas por el parque automotor para garantizar su libre circulación por las vías. Para el planteamiento de estas regulaciones se toma en cuenta parámetros

como el modelo, año de fabricación y tipo de combustible empleado en cada vehículo. A si mismo a modo de verificación del cumplimiento de estas regulaciones, los vehículos del parque automotor están obligados a ser sometidos a una revisión periódica (Loza et al., 2022).

### 2.2.5.1. Normativa Nacional

Los límites de emisiones contaminantes en Ecuador se establecen bajo la norma NTE INEN 2204. En esta norma se establecen los límites de las emisiones contaminantes permitidas producidas por fuentes móviles terrestres. Además, esta norma es de aplicación única para las fuentes móviles de transporte terrestre de más de tres ruedas (Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2204, 2002). Cualquier fuente móvil que funcione con un motor de gasolina, mientras está en marcha mínima o ralenti y a una temperatura de operación normal, no debe liberar al aire cantidades de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) que superen los niveles indicados en la tabla 1:

**Tabla 1.** Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor a gasolina

Año modelo	% CO		Ppm HC	
	0 - 1500	1500 - 3000	0 - 1500	1500 - 3000
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1000	1200

(Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2204, 2002).

### 2.2.5.2. Normativa Europea

Las regulaciones para el control de emisiones en vehículos nuevos, incluyendo turismos y vehículos de comercio ligero de la Unión Europea se denominan normas EURO. Estas normas van desde la Euro 0 hasta la vigente y más actual que es la EURO 6 (Matínez, 2020). Por otra parte, a partir del año 1998 se inició el desarrollo de diferentes acuerdos a modo de regular las emisiones de CO<sub>2</sub>. Las entidades que se involucraron en la elaboración y desarrollo de estos acuerdos fueron la Comisión Europea y la industria del automóvil; representada por tres diferentes asociaciones (DieselNet, 2023).

Si bien al principio estos acuerdos eran de aplicación voluntaria, con el transcurso de los años pasaron a ser programas de carácter obligatorio. La principal causa de esta decisión fue el incumplimiento de estos acuerdos por parte de los fabricantes a partir del año 2004. Estos programas trajeron consigo diferentes estándares de emisiones de CO<sub>2</sub>. Estos estándares se hicieron más estrictos con el pasar de los años. Las regulaciones más recientes indican regulaciones de emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2025 y 2030 a modo de obtener una disminución del 15% y 50%

de emisiones de CO<sub>2</sub> respectivamente. Además, se espera cumplir con el objetivo de cero emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2035(DieselNet, 2023).

## **2.3. Enfoques para la Estimación de Consumo de Combustible en Vehículos**

### **2.3.1. Fundamentos de la estimación del consumo**

Los contaminantes atmosféricos y los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por los vehículos de motor suponen una amenaza para la salud de las personas del sector urbano, a medida que aumenta el número de vehículos en las ciudades ocasiona afecciones graves al medio ambiente (Forehead & Huynh, 2018). En la actualidad, diversos estudios se han llevado a cabo para estimar el consumo de combustible en respuesta al aumento en el costo del combustible (Noroña et al., 2023). En este sentido, existen dos enfoques principales para realizar estas estimaciones: los métodos directos y los métodos indirectos.

Los sensores de flujo son una parte fundamental de los métodos directos los cuales se instalan en la línea de alimentación del motor para medir de manera precisa la cantidad de combustible consumido. En cuanto a los métodos indirectos obtienen información a través de sensores temperatura, peso, volumen, nivel del tanque, o directamente desde el sistema de diagnóstico a bordo (OBD) en vehículos (Carlos Santiago Zeas Carillo, 2019).

### **2.3.2. Técnicas para la estimación del consumo: Modelado vs Mediciones**

#### **2.3.2.1. Modelado**

Los modelos de consumo de combustible son fundamentales, debido a que por medio de estos se permite cuantificar las emisiones de contaminantes liberados a la atmósfera y las tasas de consumo de combustible al considerar el estado del tráfico, que se obtiene por medio de estimaciones mediante detectores situados en la red o mediante modelos de flujo de tráfico (Pasquale et al., 2019).

Las condiciones de funcionamiento del vehículo y del estilo de conducción del conductor son factores determinantes en cuanto a emisiones de los vehículos y del estilo de conducción, siendo un impacto significativo en la generación de contaminantes: la duración y secuencia de las fases de aceleración, desaceleración y modo crucero. En cuanto a las emisiones de tráfico no solo se involucra la dinámica de los vehículos sino también el combustible utilizado, las características mecánicas del vehículo y factores ambientales como la temperatura y la humedad del aire. Como también, la topografía de la carretera, las pendientes y las intersecciones, puede aumentar el consumo considerable de combustible y la producción de sustancias contaminantes. Estos modelos

de estimación de emisiones y consumo pueden clasificarse en microscópicos, macroscópicos y mesoscópicos (Pasquale et al., 2019):

- *Modelos microscópicos*: son fundamentales en cuanto a cuantificación del consumo del combustible y emisiones de un tipo de contaminante mediante una descripción detallada de los procesos físicos y químicos que están involucrados en este fenómeno. Esto implica el requerimiento de obtener información detallada sobre el movimiento de los vehículos, y el entorno circundante.
- *Modelos macroscópicos*: estos evalúan el consumo de combustible y las emisiones contaminantes utilizando datos menos detallados que los modelos microscópicos, los cuales se basan en la velocidad y aceleración media del vehículo.
- *Modelos mesoscópicos*: tiene un enlace entre los modelos microscópicos y macroscópicos.

### 2.3.2.2. Mediciones

Tomando en consideración la crisis petrolera de los años 70, se desarrollaron normas y regulaciones para la medición del consumo de combustible, tal es el caso de la NTE INEN 2204 (Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina, 2002) y el reglamento N83 de la UNECE (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE), 2015). Estas normas proporcionan metodologías que establecen la clasificación de los vehículos según su eficiencia energética y niveles de contaminación (Nuninge, 2018). Estas regulaciones permiten definir varios métodos de medición tales como:

- *Método gravimétrico*: Este método se basa en la medición de la variación de masa del tanque de combustible, con el fin de analizar el volumen consumido a partir de la prueba. A medida que el combustible fluye por el sistema hasta llegar al motor (Burke et al., 2011).
- *Método volumétrico*: Consiste en la medición directa del flujo de combustible mediante este dispositivo registra el flujo promedio de combustible en intervalos regulares, como cada segundo, dependiendo de la necesidad de precisión en la medición (Burke et al., 2011).
- *Método del balance de carbono*: Este método es utilizado para medir tanto el consumo de combustible como las emisiones de los gases de escape del vehículo (Burke et al., 2011). Para llevar a cabo la medición, es necesario la utilización de un analizador de gases el cual permita interpretar un análisis de tres gases diferentes como: Hidrocarburos (HC), Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). La medición del consumo de

combustible no se realiza de forma directa, sino que se deduce a partir del análisis de la composición de los gases de escape del vehículo (Nuninge, 2018).

### **2.3.3. Estimación usando el OBD**

#### **2.3.3.1. Breve historia del sistema OBD**

El origen de los sistemas de control de emisiones se remonta a la década de 1960, cuando el problema de la contaminación del aire causada por los automóviles en Los Ángeles llevó al estado de California a implementar requisitos de control de emisiones en 1966 (García, 2015).

Inicialmente, cada fabricante tenía sus propios sistemas y señales, y las normas eran limitadas. Sin embargo, en 1988, la Sociedad de Ingenieros del Motor (SAE) estableció un conector estándar llamado OBD (On-Board Diagnostics) y un conjunto de señales de prueba de diagnóstico (García, 2015).

#### **2.3.3.2. Necesidad del sistema OBD**

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha sido objeto de acusaciones de obligar a los fabricantes de automóviles y camiones a cumplir con normas de emisiones excesivamente estrictas, así durante toda la vida útil del vehículo estas sigan vigente y cumplan con la regulación establecida de fábrica (García, 2015).

#### **2.3.3.3. Funcionamiento**

El Sistema de Diagnóstico a Bordo (OBD) está diseñado para la detección de posible fallas en sensores, actuadores y el cableado de los diferentes sistemas del vehículo (Iván David Villamar Aguirre, 2008). Cuando una falla se detecta en algún componente o sistema, se realiza un chequeo de lazo cerrado durante un período de tiempo para determinar si el problema es temporal o permanente. Además, la Unidad de Control Electrónico (ECU) otorga un código numérico único, en cada error que registra e identifica dónde ocurrió el problema. Estos códigos se almacenan en la memoria de la ECU para su posterior recuperación. (Iván David Villamar Aguirre, 2008).

#### **2.3.3.4. Operación del sistema OBD: Funcionamiento y componentes**

On Board Diagnostic (OBD) por sus siglas en inglés, Sistema de Diagnóstico a Bordo es el sistema de procesamiento de información que se encuentra incorporado en un vehículo, el cual rastrea y controla el rendimiento del automóvil. El OBD cumple con la función de recopilar información de la red de sensores dentro del vehículo, entre los principales se encuentran (Noregon, 2020):

- *ECU*: la parte central del sistema OBD es la ECU. La cual interpreta información de diversos sensores integrados en el vehículo. Luego estos datos son utilizados para controlar partes del vehículo.
- *Sensores*: el vehículo posee un sinnúmero de sensores los cuales desempeñan diferentes tareas para un correcto funcionamiento del vehículo, donde cada sensor se encarga de emitir códigos a la ECU, detallando la fuente y los factores de la señal. Luego, la ECU interpreta esta señal.
- *DTC*: cuando un sensor envía información a la ECU que está fuera del rango normal, la ECU registra la información como un Código de diagnóstico de fallas (DTC).
- *MIL*: Una vez que la ECU recopila un código DTC, envía una señal al panel de instrumentos del vehículo donde, si la luz se enciende y permanece encendida, el problema es de menor gravedad. Por otro parte si la luz parpadea continuamente, el problema es urgente.
- *DLC*: A través del conector de enlace de diagnóstico (DLC) se puede acceder a todos los datos y códigos DTC recopilados por la ECU. En la actualidad los vehículos se fabrican con un sistema OBDII estándar para que cualquier herramienta de escaneo con un cable tipo 2 pueda conectarse para realizar el diagnósticos y análisis de datos.

#### 2.3.4. Cálculo del consumo de combustible en el sistema OBD

El principio del proceso de combustión en un MEP involucra tres elementos principales como son: aire, chispa y combustible, con el fin de obtener la mezcla ideal. A través de cálculos que realiza el computador del vehículo muestra el consumo de este. Sin embargo, también es posible realizar este cálculo utilizando la siguiente fórmula matemática (K. F. Benavides & Molina, 2023):

$$\text{Consumo de combustible} = \frac{\text{flujo de combustible}}{\text{velocidad}} (l/100km) \quad \text{Ec. (8)}$$

- **Determinación del flujo másico del combustible**

Para el análisis del flujo másico del combustible es importante obtener el área de la aguja de inyección ( $A_0$ ) la cual se obtiene según los datos del fabricante, para motores de ciclo Otto se ha considerado que el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) es aproximadamente 0,75 (Morocho, 2014), y la densidad ( $\rho$ ) del combustible extra de 92 octanos es de  $720 - 775 \text{ kg/m}^3$  según la Norma NTE INEN 935 (INEN, 2012).

$$\dot{m}_{\text{combustible}} = C_d \cdot A_0 \sqrt{2\rho_{\text{combustible}}(P_{\text{atm}} - P_1)} (kg/s) \quad \text{Ec. (9)}$$

### 2.3.5. Data logger: Descripción y funcionamiento

Los Data logger son dispositivos electrónicos diseñados para examinar diversas variables físicas presentes en un entorno específico. Existe una gran variedad de estos dispositivos los cuales permiten medir diferentes tipos de datos, como humedad, temperatura, voltaje, choque, nivel de agua, presión, movimiento, dióxido de carbono, entre otros. Diversas industrias se benefician del uso de Data loggers. Un caso relevante es la industria automotriz, donde las emisiones de los vehículos son un tema imprescindible en relación con el calentamiento global. Para disminuir dichas emisiones y contribuir a detener el calentamiento global (Meredith, 2020).

Los Data loggers son dispositivos que ejercen un papel fundamental en esta área, a través de diversos sensores para recopilar información, permiten supervisar y registrar parámetros ambientales a lo largo del tiempo (Influx Technology, 2021).

- OBD logger

Can Data Logger es un dispositivo de doble canal. Este dispositivo, está diseñado para registrar las señales CAN en una tarjeta microSD. Además, este dispositivo cuenta con un procesador de alta calidad (200MHz) permitiendo que el consumo de energía sea mínimo y garantice un alto rendimiento. (Diagnostic Tester Diagprog4, 2015).

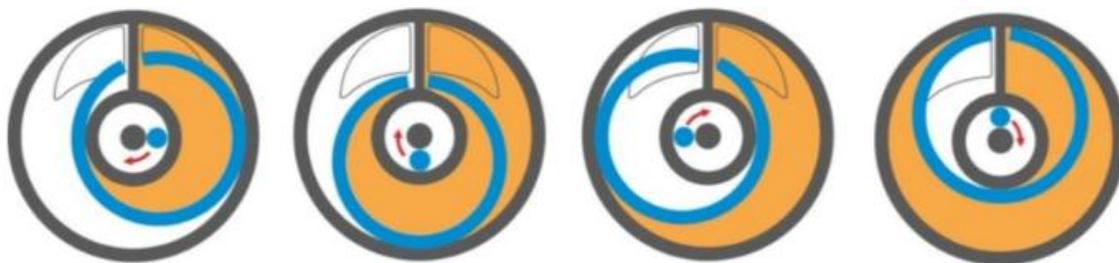
- GPS logger

Con el desarrollo de los sistemas de posicionamiento satelital GNSS (Global Navigation Satellite System) los dispositivos de almacenamiento de datos han ido mejorando considerablemente permitiendo capturar información en tiempo real como la longitud, latitud, altitud y la velocidad del vehículo permitiendo una mayor precisión en los resultados. El monitoreo en tiempo real se visualiza en una pantalla LCD. Otros dispositivos proporcionan una interfaz cableada o WIFI mediante la cual otra computadora puede acceder a la información (Smith, 2023).

### 2.3.6. Mediciones usando un Flujómetro

#### 2.3.6.1. Definición y Función

El medidor de flujo es un instrumento empleado para medir el flujo volumétrico del combustible, en otras palabras, permite medir la cantidad de combustible que circula por la línea de combustible en un período de tiempo determinado (Navixy, 2023). El flujómetro, mide la cantidad de combustible que pasa sobre la cámara de medición, mediante el siguiente proceso.



**Figura 6.** Esquema de funcionamiento de la cámara de medición del medidor del flujómetro  
(Navixy, 2023)

La presión del fluido a través de la conexión de entrada del flujómetro hacia la abertura de entrada de la cámara de medición, el anillo rueda a lo largo de la superficie interior de la cámara y simultáneamente se desliza a lo largo de la partición, Luego este lleva el fluido encerrado desde la cámara a través de su orificio de salida, donde en una revolución del anillo se transporta un volumen determinado de fluido, similar al volumen que se encuentra en la cámara. Al instante, la placa de circuito electrónico del medidor de flujo genera un impulso de salida que indica la cantidad de pulsos necesarios para que pase un litro de combustible a través del medidor (Navixy, 2023).

### 2.3.6.2. Tipos de flujómetro: Aplicaciones

Entre los principales tipos de medidores de flujo de combustible se encuentran: Medidor de flujo de cámara única, Medidor de flujo de dos cámaras, Medidor de flujo CAN (Navixy, 2023).

- *Medidor de flujo de cámara única:* Estos dispositivos miden la cantidad de combustible que fluye a través de la línea de suministro de combustible, en otras palabras, del depósito de combustible al motor.



**Figura 7.** Medidor de flujo de cámara única  
(Technoton, 2000)

- *Medidor de flujo de dos cámaras:* También conocido como medidor de flujo diferencial. Estos dispositivos permiten medir el consumo de combustible como la diferencia en el volumen que fluye a través de las líneas de combustible de suministro y retorno.



**Figura 8.** *Medidor de flujo diferencial*

(Technoton, 2000)

- *Medidor de flujo CAN:* Los fabricantes de vehículos poseen la capacidad de enviar información acerca del consumo de combustible por medio del bus CAN de un automóvil o equipo especializado. Estos datos se obtienen utilizando el tiempo de funcionamiento de los inyectores de combustible. A través del tiempo de operación de los inyectores por la cantidad de combustible se realizan ajustes en función de otros sensores presentes en el bus CAN.



**Figura 9.** *Medidor de Flujo CAN*

(Technoton, 2000)

### 2.3.6.3. Instalación

Este dispositivo puede ser instalado en la línea de suministro de combustible entre el filtro de combustible y la bomba de baja presión, así como en la sección de la línea de suministro de

combustible entre el filtro fino y la bomba de combustible de alta presión (Navixy, 2023). Para el proceso de instalación es necesario cumplir con algunas acciones determinadas como:

Observar el rendimiento del motor durante 5 a 10 minutos en ralentí y luego de 5 a 10 minutos bajo carga. El motor debe funcionar de manera constante. Ya que después de instalar un flujómetro, puede haber una disminución en el suministro de combustible, inspeccionar todas las líneas de combustible del vehículo para identificar cualquier daño o fuga, utilizar un manómetro para medir la presión en la línea de combustible, y conectar el caudalímetro a la fuente de alimentación a bordo mediante una computadora portátil (Navixy, 2023).

#### **2.3.6.4. Mantenimiento y Calibración**

Un flujómetro tiene la capacidad de cuantificar y totalizar el volumen del fluido el cual lo atraviesa, ya sea diésel, gasolina, aceites, u otros combustibles con diferentes viscosidades. Por ende, es importante contar con una medición lo más precisa posible, manteniéndose dentro de los estándares de precisión establecidos (Piusi, 2020).

Para conseguir esto, es importante realizar una calibración apropiada del medidor y realizar verificaciones y recalibraciones constantemente según sea necesario, para evitar factores corrosivos y de impurezas los cuales afectan a estos dispositivos. En consecuencia, la calibración de los medidores de flujo es imprescindible para lograr mediciones precisas y confiables permitiendo que las mediciones del medidor de flujo se alineen con los caudales reales (Nagmanflow, 2023).

### **2.4. Herramienta para el Análisis de Datos**

#### **2.4.1. Fundamentos de procesamiento de datos**

Un dato es una representación de algo concreto o abstracto, mediante el uso de símbolos lingüísticos o numéricos. Por otra parte, el procesamiento es una acción que se ejecuta sobre los datos logrando obtener una transformación en ellos. El procesamiento de datos implica organizar, manipular y transformar datos mediante el uso de un sistema. Esta transformación es la que convierte los datos en información (Echaiz, 2019).

Los datos representan un recurso significativo para las empresas, facilitando las funciones cotidianas, como también permiten una mejor organización, planificación, proyección y tareas afines. El procesamiento de un sistema de información implica la conversión o transformación de datos en resultados prácticos. Incluyendo cálculos, comparaciones e implementación de medidas

alternativas, así como el registro de datos para aplicaciones futuras. Siendo este ejecutable de manera manual o por medio de un computador (Cely, 2018).

#### **2.4.2. Etapas del procesamiento de datos**

La realización del procesamiento representa una fase operativa durante la cual se aplican los sistemas definidos por Echaiz, englobando las siguientes macro actividades (Echaiz, 2019):

- *Preparación:* La eficiencia del procesamiento depende directamente de una correcta preparación de las actividades tales como: capacitación, almacenamiento y control de instrumentos.
- *Captura y codificación:* Una vez formados los equipos de personal debidamente capacitado y provistos de equipo técnico y materiales, se llevan a cabo las tareas de captura y codificación bajo un estricto control de calidad.
- *Validación:* En proyectos orientados a generar estadísticas con un desglose geográfico, es importante analizar el punto de ubicación de los dispositivos de captación, rectificando posibles fallas.
- *Integración de la base de datos:* Una vez finalizada esta tarea de validación, se organiza la base de datos para su utilización, por medio del ingreso de información esencial que facilite la administración de los registros y la conexión. La estructuración final de la base de datos debe ser diseñada para permitir su utilización en diversas formas, adaptándose a distintos requisitos, y se deben implementar medidas de seguridad para preservar la confidencialidad de los datos.

#### **2.4.3. Software para procesamiento de datos**

Para llevar a cabo el procesamiento y análisis de datos de manera eficiente, es esencial utilizar diversas herramientas de software que faciliten la automatización de los procesos. Con el tiempo, se ha vuelto indispensable el desarrollo continuo de estas herramientas. Que convierten la información externa de la organización en conocimiento valioso para respaldar la toma de decisiones (Cárdenas, 2009). Se puede considerar entre los softwares más importantes para el procesamiento de datos: Excel Microsoft Power BI, Python, SQL, Programación (R), Tableau (Universidad de Cataluña, 2023).

- *Análisis de datos (Excel):* Una las mejores herramientas del paquete Office es Microsoft Excel. Puesto que este software permite realizar una variedad de funcionalidades y sobre todo facilita la organización y gestión de datos, posibilita la representación gráfica a través

de gráficos y tablas, e incluso permite la inclusión de código personalizado mediante macros para realizar análisis específicos de la información introducida.

- *Microsoft Power BI*: Es una de las herramientas analíticas más utilizadas de Microsoft. Esta herramienta se destaca por ofrecer una interacción entre otras herramientas de la misma corporación. Además de poder realizar visualizaciones interactivas de los datos.
- *Python*: Es un lenguaje de programación que se caracteriza por el sinnúmero de librerías que posee para el análisis de datos. Además de la gran facilidad que tiene con otras aplicaciones de extracción de datos.
- *SQL*: Es un lenguaje de programación caracterizado por su utilización para conseguir interacción con las bases de datos utilizadas. Es muy utilizada debido a que trabaja con modelaciones complejas de conexiones de datos.
- *Programación (R)*: En cuanto a análisis estadístico de datos uno de los mejores lenguajes de programación es R debido a que es un código abierto y tiene bastante acogida en las áreas de: Análisis de Datos, Machine Learning, Matemáticas Financieras, entre otros.
- *Tableau*: Es un software gratuito cuya característica principal es la de realizar una conexión entre diferentes fuentes de datos. Es de gran utilidad para la creación grafica de dashboards, mapas y visualizaciones en tiempo real.

#### 2.4.4. R Studio

R Studio es un software que viene integrado con múltiples funciones para la manipulación, cálculo y visualización grafica de datos. Este software fue desarrollado por Ross Ihaka y Robert Gentleman en el año de 1991. Al ser este software de última generación y un lenguaje de programación, R es versátil a la hora de realizar análisis de datos. Como lenguaje de programación,

R se clasifica como un lenguaje orientado a objetos del tipo interpretado. Lo que hace que sea flexible y potente a la vez (J. U. Jiménez, 2019).

Este software funciona como un espacio temporal de trabajo, es decir que el usuario puede ir incorporando datos y objetos en una hoja en blanco. Es esencial considerar que R hace uso de la memoria activa (RAM) del computador. En consecuencia, cualquier análisis simplemente reflejará la información obtenida en ese momento y no se almacenará como un archivo que pueda ser utilizado más adelante. En términos más directos, si los análisis no se guardan como objetos (como vectores, matrices, listas u otros tipos de objetos), será imperativo volver a ejecutar las instrucciones para obtener nuevamente el resultado deseado (Introducción a RSTUDIO, 2022).

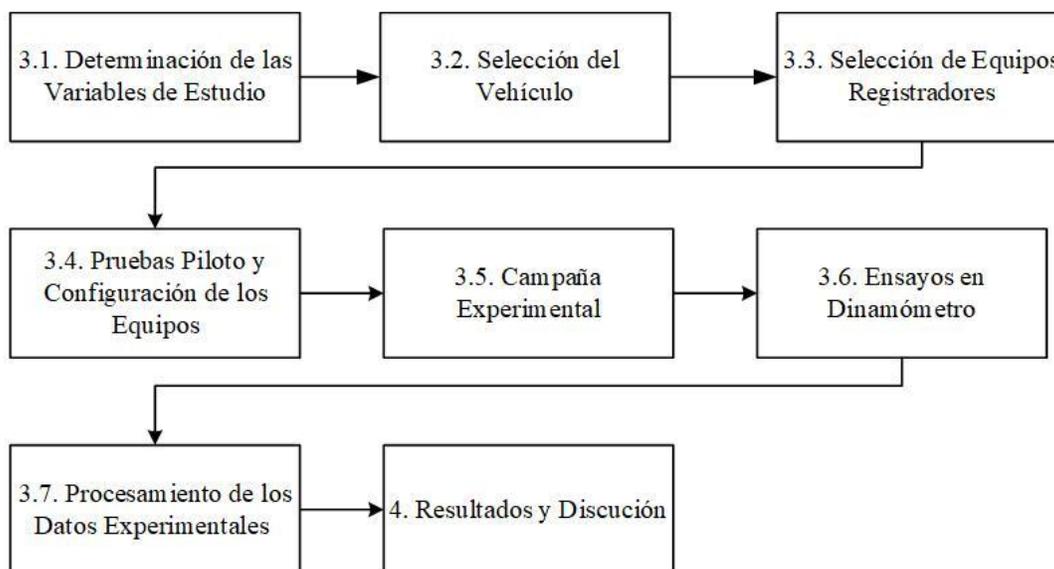
#### **2.4.4.1. Características de R Studio**

R Studio proporciona un sinnúmero de herramientas estadísticas que facilitan realizar los modelados lineales y no lineales, tests estadísticos, análisis de series temporales gráficas, entre otros. Dado que R es un lenguaje de programación, posibilita a los usuarios su expansión mediante la definición de funciones personalizadas. Aunque una considerable cantidad de funciones en R están codificadas en el propio lenguaje, existen otros lenguajes de programación (Fortran, C++, C) los cuales se asocian de manera dinámica. R puede ser empleado como una herramienta para realizar cálculos numéricos, exhibiendo una eficacia comparable a otras herramientas especializadas como GNU Octave y su equivalente comercial, MATLAB (J. U. Jiménez, 2019).

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describe el proceso metodológico implementado, detallando los equipos y softwares de apoyo utilizados, los cuales resultaron fundamentales para alcanzar los objetivos planteados. La figura 10 muestra las ocho fases propuestas a lo largo de este trabajo de investigación. Cada fase fue diseñada para asegurar la validez de los resultados, incorporando instrumentos calibrados, plataformas especializadas y procedimientos estandarizados.



**Figura 10.** *Diagrama de flujo de actividades del proyecto de investigación*

#### 3.1. Determinación de las Variables de Estudio

Con el objetivo de analizar el rendimiento de un vehículo en condiciones de tráfico real, se identificaron y clasificaron cuatro grupos de variables clave: cinemáticas, modos de operación, operación del motor y parámetros de rendimiento. A continuación, se describe cada uno de estos grupos.

##### 3.1.1. Variables Cinemáticas

La tabla 2 muestra el conjunto de variables cinemáticas del vehículo. Estas variables constituyen un conjunto de magnitudes físicas que describen el movimiento en términos de velocidad, tiempo y aceleración del vehículo, sin considerar las fuerzas que lo originan o se oponen a él. La frecuencia de muestreo seleccionada para la captura de estas variables fue de 1 Hz. Esta frecuencia resultó óptima para capturar adecuadamente las variaciones del tráfico en tramos urbanos y suburbanos.

**Tabla 2. Variables Cinemáticas**

Variable	Unidad	Tipo	
		Calculado	Medido
Tiempo	s		✓
Velocidad Instantánea	m/s		✓
Aceleración Instantánea	m/s <sup>2</sup>	✓	
Distancia Recorrida	m		✓

### 3.1.2. Modos de Operación

La Tabla 3 presenta los modos de operación del vehículo. Estos modos se establecieron considerando los parámetros de velocidad, aceleración y tiempo de operación, los cuales permitieron caracterizar el comportamiento dinámico del vehículo en diferentes condiciones de tráfico. De acuerdo con estudios previos (Isizán & Vallejo, 2023), se reconocen cuatro modos principales de operación vehicular: ralentí, aceleración, crucero y desaceleración. Cada modo presenta condiciones específicas de movimiento que reflejan distintos patrones de conducción.

**Tabla 3. Modos de Operación**

Modo de Operación	Condición	Tipo	
		Calculada	Estimada
Ralentí	Velocidad y aceleración nula; Rango más bajo de régimen del motor	✓	
Aceleración Positiva	Aceleración mayor a 0,1 m/s <sup>2</sup>	✓	
Desaceleración	Aceleración menor a 0 m/s <sup>2</sup>	✓	
Crucero	Velocidad mayor a 0 m/s; Aceleración relativa mínima en el rango (-0,1; 0,1) m/s <sup>2</sup>	✓	

(Isizán & Vallejo, 2023)

### 3.1.3. Variables de Operación

La Tabla 4 presenta las variables de operación del motor. Estas variables permitieron evaluar el rendimiento del vehículo en condiciones de tráfico real. Además, en estas se incluyen parámetros fundamentales como el Régimen del motor (RPM), la Carga, el Par y la Potencia efectivos los cuales se obtuvieron mediante medición directa o estimaciones basadas en datos de la ECU.

**Tabla 4. Variables de Operación del Motor**

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

### 3.1.4. Parámetros Rendimiento: Motor y Vehículo

La Tabla 5 muestra los diferentes parámetros de rendimiento determinados a partir de las variables de operación del motor registradas. Para analizar la variación de consumo de combustible se establecieron dos niveles de enfoque diferentes (Motor y Vehículo). En el nivel vehículo, los parámetros de rendimiento se expresaron en función de la distancia recorrida (km). Por otro lado, en el nivel de motor los parámetros de rendimiento se expresaron en base a la energía generada (kWh).

**Tabla 5.** *Parámetros de Operación a Nivel Motor y Vehículo*

Nivel	Variable	Unidad	Tipo	
			Calculada	Estimada
Motor	Consumo específico al freno (BSFC)	g/kWh	✓	
	Eficiencia térmica al freno (BTE)	%	✓	
	Tasa de consumo de combustible	g de combustible/s	✓	
	Factor de emisión de CO <sub>2</sub> en función de energía	g de CO <sub>2</sub> /kWh	✓	
Vehículo	Tasa de emisión de CO <sub>2</sub>	g de CO <sub>2</sub> /s	✓	
	Factor de emisión en función de distancia	g de CO <sub>2</sub> /km	✓	
	Factor de consumo en función de distancia	g de combustible/km	✓	

### 3.2. Selección del Vehículo

En últimos años en Ecuador, los vehículos de origen chino han sido los principales actores dentro del parque automotor. Factores como sus precios competitivos, la incorporación de tecnología y equipamiento moderno, así como una amplia variedad en sus modelos han contribuido a que alcancen un porcentaje de participación del 40,8% del total de las importaciones hasta el año 2023 (Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, 2023). En el contexto ecuatoriano, dentro del segmento de vehículos livianos, las categorías con mayor participación en cuanto a matriculación son: Motocicleta con 28,31%, Automóvil con 28,19%, SUV con 17,93% y camionetas con 16,92% (INEC, 2022).

Para este trabajo de investigación, se seleccionó como vehículo de estudio la camioneta de origen chino perteneciente a la marca asiática Great Wall Motors mostrada en la Figura 11. Este modelo está equipado con un motor de cilindrada 2400cm<sup>3</sup>, en configuración 4 en línea, alimentado a gasolina y con un sistema de inyección electrónica multipunto. Además, la camioneta cuenta con una caja de cambios manual de 5 velocidades y tracción trasera.



**Figura 11.** *Vehículo seleccionado*

La Tabla 6 contiene las características técnicas del vehículo utilizado, incluyendo especificaciones como la Potencia del motor, el peso, las dimensiones generales y la capacidad del tanque de combustible. Estas características resultaron fundamentales para configurar adecuadamente los equipos de medición utilizados. Cabe mencionar que este vehículo superó satisfactoriamente la Revisión Técnica Vehicular previo a la campaña experimental, lo que garantizó su óptimo estado operativo validando así los datos registrados durante las pruebas.

**Tabla 6.** *Especificaciones técnicas del vehículo utilizado*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de Combustible	Gasolina
Modelo	Great Wall Wingle 5
Año	2019
Peso Bruto del Vehículo	2,585 t
Peso	1,796 t
Largo/Ancho/Alto	5,060 m/1,800 m/1,730 m
Capacidad máxima de pasajeros	5
Configuración del eje	4x4
Caja de Cambios	Manual – 5 velocidades
Configuración Motor	4 en línea
Cilindrada	2378 cm <sup>3</sup>
Potencia	99,92 kW @ 5150 rpm
Par máximo del motor	200 Nm @ 2000-3000 rpm
Sistema de inyección de combustible	Inyección electrónica multipunto
Capacidad del Tanque de Combustible	70 L

(Great Wall, 2019)

### 3.3. Selección de los Equipos y Sensores

La selección de la instrumentación para este estudio se realizó cuidadosamente para garantizar mediciones confiables de las variables cinemáticas, parámetros de operación del motor y consumo de combustible. Además, para eliminar posibles errores asociados a métodos de estimación

indirecta se priorizó el uso de sensores especializados en la toma de mediciones directas de consumo de combustible. Los registradores de datos y sensores seleccionados debían cumplir con ciertos criterios, como registrar las variables con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, ser fácilmente configurables y operar a 12V.

Con base en estos requerimientos, se seleccionaron tres registradores de datos y dos sensores para las pruebas iniciales y la campaña experimental. Los registradores de datos utilizados fueron ELM327, CANedge2 y CANUp. En cuanto a los sensores, se utilizó la antena de posicionamiento GNSS con su modulo CANmod.gps y los sensores de flujo de combustible DFM 100ACAN. Una vez finalizada la campaña experimental se utilizó el dinamómetro BPA 2VR para determinar las variables de operación relacionadas con el par y la potencia máxima del vehículo.

La Tabla 7 presenta las variables registradas por cada equipo seleccionado, mientras que en las siguientes secciones se presentan los detalles de cada uno de ellos.

**Tabla 7.** Variables de Interés Recopiladas mediante los diferentes Equipos

Tipo de Variable	Equipo Utilizado	Método Utilizado	Variables
Variables de Operación del motor	ELM327	OB2 II - A través de la aplicación Torque Pro	Velocidad m/s Régimen del motor rpm
	Dinamómetro BPA V2R	Sistema de microcontrolador y Software	Carga del motor % Consumo instantáneo de combustible L/h
	CANedge2 + DFM 100ACAN	Red CAN	Avance de Encendido ° Par máximo Nm Potencia máxima kW
Variables Cinemáticas	ELM327	OB2 II - A través de la aplicación Torque Pro	Distancia recorrida m Velocidad instantánea GPS m/s
	CANedge2 + CANmod.gps	Red CAN	
Variables de Operación – Medición Física	CANedge2 + Flujómetros DFM 100ACAN	Red CAN	Flujo de suministro instantáneo de combustible L/h
	CANUp + Flujómetros DFM 100ACAN	Red CAN	Flujo de retorno instantáneo de combustible L/h Flujo diferencial instantáneo de combustible L/h

### 3.3.1. Registrador ELM327

La Figura 12 presenta el registrador de datos ELM327. Este dispositivo se utilizó para acceder a los datos de operación del motor tales como: el Régimen de giro (RPM), la Carga, el Flujo instantáneo de combustible y otros datos operativos clave. Para esto, se conectó este dispositivo

de manera alámbrica al módulo de control electrónico (ECU) a través de conector OBD-II del vehículo y de manera inalámbrica con la aplicación Torque Pro instalada en el dispositivo móvil utilizado. Este dispositivo es compatible con el 99,9% de los vehículos que se fabricaron a partir del año de 1996. Además, es compatible con todos los protocolos del CAN Bus OBD-II.



**Figura 12.** *Datalogger ELM 327*

(Datasheet ELM327, s/f)

### 3.3.2. Registrador CANedge2

El registrador CANedge2 se aprecia en la Figura 13. Este registrador permitió capturar los datos de los sensores de flujo de combustible provenientes de la red CAN en una tarjeta de memoria industrial. Los estándares que maneja este dispositivo son abiertos. Es decir que no hace falta una suscripción o la dependencia de un proveedor. Además, este registrador incorpora dos conectores D-sub9 con funciones diferenciadas: el primero se destinó a la alimentación del equipo, mientras que el segundo proporcionó una salida estabilizada de 5V para energizar el módulo CANmod.gps, asegurando un suministro eléctrico estable y confiable para todo el sistema de medición.



**Figura 13.** *Datalogger CANedge2*

(CSS Electronics, s/f-a)

La Tabla 8 presenta las especificaciones técnicas detalladas del equipo utilizado en el estudio. Entre sus características más destacadas se encuentran sus dos canales de conexión CAN independientes, los cuales permitieron la integración eficiente de dos redes CAN diferentes en un único dispositivo. Además, su operación con un estándar de comunicación de 1 Mbit/s fue más

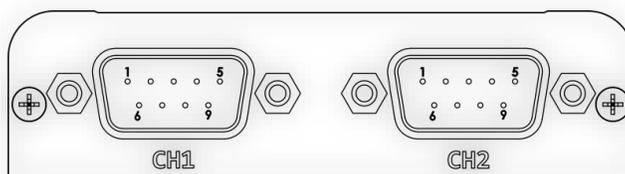
que suficiente para soportar la conexión con el módulo CANmod.gps (operando a 500 Kbit/s) y la comunicación con los sensores de flujo de combustible (funcionando a 250 Kbit/s), sin generar congestión ni pérdida de datos durante las pruebas

**Tabla 8.** Especificaciones técnicas del Datalogger CANedge2

Parámetro	Descripción
Canales	2 canales LIN y 2 canales CAN (incluye soporte CAN FD)
Estándar	ISO 11898 e ISO (1Mbit/s) y Bosch CAN FD (5Mbit/s)
Protocolos	Registra datos de protocolos basados en CAN
Tarjeta SD	Micro Sd industrial de 8 hasta 32 GB. Lectura de 80MB/s
Reloj	RTC, predeterminado UTC. Resolución de 50 $\mu$ s
Formato del archivo de registro	Formato binario estándar de la industria MF4
Suministro de energía	+7 V a +32 V CC a través del canal 1 DB9
Consumo de energía	Aproximadamente 1 W

(CSS Electronics, s/f-a)

Por otro lado, se identificó la disposición de los pines correspondientes a los dos canales disponibles en este equipo. Esto facilitó la integración de los sensores de flujo de combustible a la red CAN de este dispositivo. La disposición de cada pin al igual que la descripción de cada uno se encuentran en la figura 13 y tabla 9 respectivamente.



**Figura 14.** Pin - Out CANedge2

(CSS Electronics, s/f-a)

**Tabla 9.** Descripción del Pin - Out del CANedge2

Pin #	Canal 1 (CH1)	Canal 2 (CH2)
1	NC	Suministro de salida de 5V
2	CAN 1 L	CAN 2 L
3	GND	GND
4	LIN Data 1	LIN Data 2
5	NC	NC
6	GND (Opcional)	GND (Opcional)
7	CAN 1 H	CAN 2 H
8	NC	NC
9	Alimentación y LIN1 VBAT	LIN2 VBAT

(CSS Electronics, s/f-a)

### 3.3.3. Unidad Telemática CANUp 27 Pro LTE G

La Figura 15 muestra la unidad telemática CANUp 27 Pro LTE G. Este dispositivo se utilizó debido a que integra diversas funcionalidades esenciales como: adquisición de datos, geolocalización y comunicación inalámbrica. Estas funcionalidades permitieron realizar una supervisión en tiempo real de los parámetros operativos del vehículo, optimizando el monitoreo y análisis de su desempeño. Además, la conexión directa que tiene con el flujómetro DFM 100ACAN permitió obtener mediciones de combustible directas transmitiendo periódicamente estos datos al servidor telemático ORF5 mediante conexión LTE.

**Figura 15.** CANUp 27 Pro LTE G

(Technoton, s/f-a)

La Tabla 10, muestra las especificaciones técnicas de este dispositivo. Entre las más relevantes se encuentra su capacidad de transmisión de datos mediante redes 2G/3G/4G, lo que aseguró una conectividad incluso en zonas con cobertura limitada. Además, su interfaz CAN J1939/S6 permite una integración perfecta con sistemas vehiculares modernos.

**Tabla 10.** Especificaciones técnicas del CANUp 27 Pro LTE G

Parámetro	Valor
Canales de transmisión de datos	2G/3G/4G
Interfaz inalámbrica	S7
Interface digital ajustable	CAN j1939/S6
Entradas físicas de señal	Analógica/Frecuencia/Discreta
Interfaz de servicio	K-Line (ISO 14230)
Rango de tensión de alimentación externa	9 – 45 V
Capacidad de la batería Li-Ion Incorporada	700 mAh
Capacidad de memoria de informes	40000

(Technoton, s/f-a)

### 3.3.4. Módulo de Posicionamiento Inercial CANmod.gps

El módulo de posicionamiento inercial CANmod.gps se puede apreciar en la Figura 16. Este es un módulo independiente con la capacidad de producir tanto posición GNSS como datos inerciales 3D. Esto es posible gracias a que posee un módulo GNSS/IMU NEO-M8U. Gracias a esto fue posible generar información de sensores como posición, velocidad, aceleración, entre otros. Además, se integró de manera sencilla con la red CAN proporcionada por el registrador CANedge2, gracias a las velocidades de bits.

**Figura 16.** Módulo CANmod.gps con sensor inercial 3D

(CSS Electronics, s/f-b)

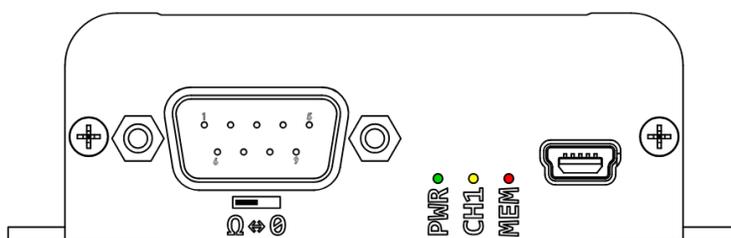
Este dispositivo se lo utilizó como un módulo adicional del CANedge2. Mediante esta configuración, los datos recopilados por este módulo se registraron como datos provenientes de otra red CAN. Además, el registrador CANedge2 facilitó la conexión y alimentación del módulo CANmod.gps mediante la salida de alimentación de 5V desde su segundo puerto. La Tabla 11 presenta las especificaciones técnicas de este módulo.

**Tabla 11.** Especificaciones Técnicas del módulo CANmod.gps con sensor inercial 3D

Parámetro	Descripción
Sistema global de navegación por satélite GNSS	GPS para EE.UU. / Galileo para Europa / BeiDou para China/ GLONASS para Rusia
Exactitud	Posición: 2,5 m Inclinación: 1 grado Velocidad: 0,05 m/s
Canales Estándar	1 canal CAN ISO 11898: compatible con CAN (hasta 1 Mbit/s)
Suministro de energía	+5 V a +26 V CC a través del conector DB9
Consumo de energía	Aproximadamente 1 W

(CSS Electronics, s/f-b)

La conexión realizada entre el registrador CANedge2 y el módulo CANmod.gps fue directa y se realizó por medio del cable de transmisión proveído por el fabricante. Sin embargo, la disposición de los pines de conexión de este módulo y su descripción se presentan en la Figura 17 y Tabla 12 respectivamente.

**Figura 17.** Pin - Out del CANmod.gps

(CSS Electronics, s/f-b)

**Tabla 12.** Descripción del Pin -Out del CANmod.gps

Pin #	Conector DB9
1	Alimentación 5 V
2	CAN 1L
3	GND
4	NC
5	NC
6	GND (Opcional)
7	CAN 1H
8	NC
9	Alimentación 5-24 V

(CSS Electronics, s/f-b)

### 3.3.5. Flujómetro de Combustible DFM 100ACAN

La Figura 18 presenta el flujómetro DFM 100ACAN fabricado por Technoton. Este dispositivo se implementó como una solución tecnológica para la medición precisa del consumo de combustible. Este dispositivo de alta precisión se instaló en paralelo en las líneas de suministro y retorno del

sistema de combustible, permitiendo obtener mediciones diferenciales exactas del consumo real del motor en todas las condiciones de operación. Su precisión se debe a su capacidad para medir distintos tipos de combustibles y aceites, incluyendo diésel, combustible para calderas, carburante para motor, biocombustibles y otros combustibles líquidos o aceites minerales con una viscosidad cinemática de 1,5 a 6,0 mm<sup>2</sup>/s (cSt).



**Figura 18.** *Flujómetro de Combustible - DFM 100ACAN*

(Technoton, s/f-b).

En esta investigación, se utilizó este dispositivo como parte de un sistema de monitoreo telemático por medio de la unidad telemática CANUp 27 Pro LTE G y de forma autónoma, conectándolo a la red CAN del registrador CANedge2. La Tabla 13 muestra las principales especificaciones técnicas de este sensor tomadas en consideración para la campaña experimental.

**Tabla 13.** *Especificaciones técnicas del DFM 100ACAN*

Parámetro	Descripción
Fabricante	Technoton
Modelo	DFM 100ACAN
Flujo mínimo de combustible	0,5 l/h
Flujo máximo de combustible	100 l/h
Presión máxima	25 bar
Protocolos	SAE j1939 / NMEA 2000
Velocidad de intercambio de datos	100 / 125 / 250 / 500 / 1000 kbit/s
Viscosidad cinemática del líquido medido	1,5 – 6,0 mm <sup>2</sup> /s
Rosca de unión	M14x1,5 / M16x1,5
Caída de presión durante el consumo máximo	0,2
Rango de la tensión de alimentación	10 – 45 V
Rango de la temperatura de trabajo del medio ambiente	-40 - +85 °C

(Technoton, s/f-b)

### 3.3.6. Dinamómetro BPA-2VR

El dinamómetro BPA 2VR se presenta en la Figura 19. Este equipo de alta precisión permitió medir directamente la Potencia y el Par motor máximos generados por el vehículo, con mediciones

realizadas a nivel de las ruedas. Estas mediciones fueron convertidas a valores equivalentes en el cigüeñal mediante el software propio de este equipo.



**Figura 19.** *Dinamómetro BPA-2VR*

La Tabla 14 detalla las especificaciones técnicas de este equipo en donde destaca su diseño compacto pero resistente que alberga rodillos de 240 mm de diámetro y 660 mm de ancho, capaces de soportar pruebas a velocidades de hasta 180 km/h. Estas características permitieron realizar mediciones precisas de Par y Potencia en condiciones controladas.

**Tabla 14.** *Especificaciones Técnicas del Dinamómetro BPA-2VR*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Tensión de alimentación	220 – 400 AC
Frecuencia	50 – 60 Hz
Corriente nominal	16 A
Masa	1200 kg
Dimensiones	3070*870*310h mm
Ancho del rodillo	660 mm
Diámetro del rodillo	240 mm
Velocidad máxima	180 km/h

(Vamag, 2025)

### **3.4. Pruebas Piloto y Configuración de los Equipos**

Las pruebas piloto se realizaron con el objetivo de verificar la conexión y el funcionamiento de los equipos y sensores utilizados. Además, se llevaron a cabo recorridos de prueba para evaluar la precisión de los datos recopilados por cada dispositivo. Los resultados obtenidos en esta fase permitieron realizar ajustes clave en la configuración de los registradores y sensores, incluyendo la optimización de las frecuencias de muestreo y la calibración entre sensores. Estas mejoras fueron fundamentales para establecer una base sólida de cara a la fase experimental. A continuación, se detallan las pruebas realizadas y las configuraciones aplicadas a cada equipo y sensor utilizado.

### 3.4.1. Prueba de Comunicación OBD-II: ELM327 y Torque Pro

Para garantizar la correcta adquisición de datos, se llevó a cabo una prueba de comunicación utilizando el registrador ELM327 junto con la aplicación Torque Pro. Este proceso integral se estructuró en cuatro fases claves: conexión física al puerto OBD – II del vehículo, establecimiento de comunicación inalámbrica vía Bluetooth, configuración en Torque Pro y pruebas en ruta bajo condiciones reales. Cada una de estas fases permitió validar la precisión y confiabilidad del registrador antes de su implementación definitiva en la campaña experimental. A continuación, se detalla el procedimiento llevado a cabo en cada una de las fases correspondientes a la prueba de comunicación OBD-II.

#### 3.4.1.1. Conexión Física con el Puerto OBD – II del Vehículo

En primer lugar, se llevó a cabo una inspección detallada de la conexión física entre el registrador ELM327 y el puerto OBD-II del vehículo. Aquí se verificó que el conector encajara correctamente, evitando posibles falsos contactos que pudieran afectar la comunicación. A continuación, se colocó el vehículo en modo ON para comprobar el suministro de energía al registrador. La correcta alimentación del dispositivo se confirmó mediante la activación del LED indicador, asegurando así un funcionamiento estable durante todas las pruebas. En la Figura 20, se muestra la conexión entre el registrador ELM327 y el puerto OBD-II del vehículo.

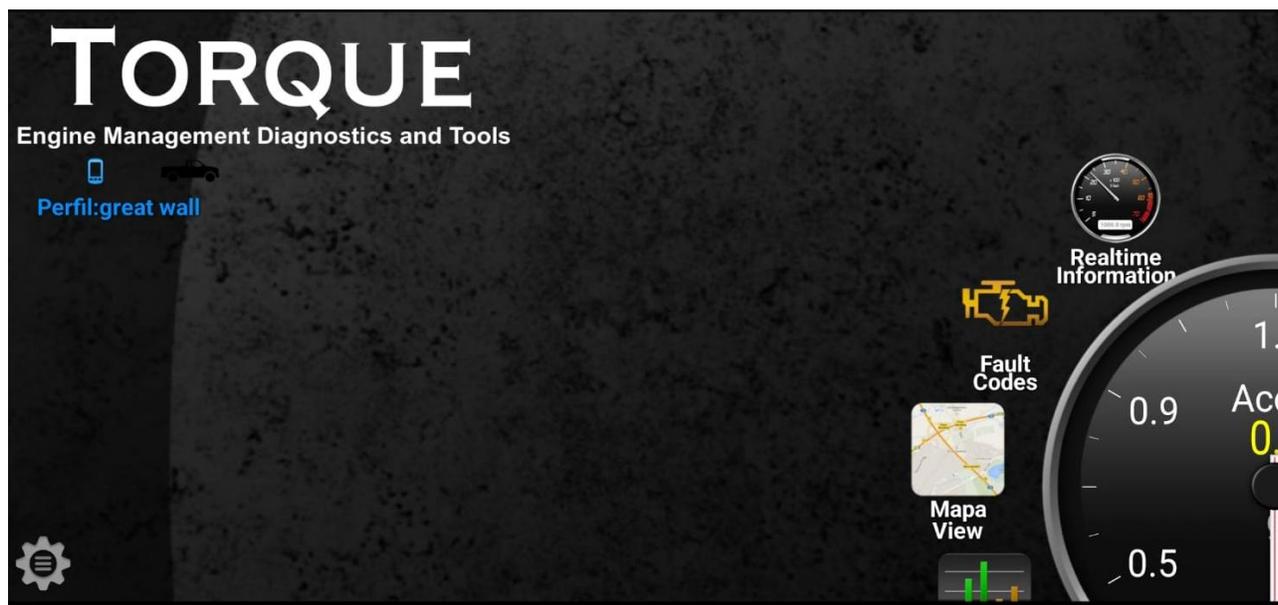


**Figura 20.** *Conexión Puerto OBD-II y Registrador ELM327*

#### 3.4.1.2. Establecimiento de Comunicación Inalámbrica Vía Bluetooth

Una vez verificada la conexión física, se procedió a establecer el enlace Bluetooth entre el registrador ELM327 y un dispositivo móvil con la aplicación Torque Pro. Esta aplicación fue

seleccionada por su capacidad para interpretar, registrar y visualizar en tiempo real los parámetros obtenidos a través del protocolo OBD-II. Durante esta fase, se comprobó la detección del registrador ELM327 por parte del dispositivo. Además, se validó que los parámetros clave como las revoluciones por minuto (RPM) se mostraran de manera precisa y en tiempo real en la interfaz de esta aplicación, misma que se aprecia en la Figura 21.



**Figura 21.** Interfaz de la aplicación Torque Pro

### 3.4.1.3. Configuración en la Aplicación Torque Pro

La aplicación Torque Pro se configuró cuidadosamente para garantizar una adquisición óptima de datos. Para esto, se estableció una frecuencia de muestreo de 1 Hz, lo que permitió capturar con suficiente resolución las variaciones de los parámetros del motor bajo condiciones reales de tráfico. Adicionalmente, como se muestra en la Tabla 15, se seleccionaron exclusivamente los PIDs (Parameter IDs) correspondientes a los parámetros más relevantes para el análisis del desempeño vehicular. Entre estos destacan el régimen de giro del motor (RPM), la carga del motor, la velocidad del vehículo y el flujo instantáneo de combustible, variables clave para evaluar la eficiencia operativa en diferentes escenarios de conducción.

**Tabla 15.** *Parámetros Seleccionados en la Aplicación Torque Pro*

Parámetro	Unidad	PID
Timin Advance	°	0e
Engine Load	%	04
Torque	Nm	ff1225
Throttle Position (Manifold)	%	11
Intake Manifold Pressure	psi	0b
Fuel flow rate/minute	cc/min	ff125a
Engine RPM	min <sup>-1</sup>	0c
Intake Air Temperature	°C	0f
Engine Coolant Temperature	°C	05
Speed (OBD)	km/h	0d

#### 3.4.1.4. Prueba en Ruta Bajo Condiciones Reales

Finalmente, como se muestra en la Figura 22, se llevó a cabo un recorrido de prueba con el objetivo de evaluar la estabilidad de la conexión entre el registrador ELM327 y la aplicación Torque Pro. Durante este recorrido, se sometió al sistema a diferentes condiciones de conducción, incluyendo ciclos repetidos de aceleración y frenado, variaciones en la velocidad y cambios en la carga del motor. Esto permitió comprobar la continuidad en la transmisión de datos en tiempo real, asegurando que no se produjeran interrupciones ni pérdidas de información durante la adquisición de los parámetros vehiculares.

Cabe mencionar que no fue necesario decodificar manualmente los datos registrados por medio de este dispositivo, ya que Torque Pro realiza este proceso de manera automática. Esto facilitó la obtención de cada registro en formato CSV, optimizando el almacenamiento y análisis de la información. Los resultados obtenidos en esta prueba confirmaron la fiabilidad del enlace Bluetooth, garantizando que el sistema pudiera operar de manera estable y precisa en la fase experimental.

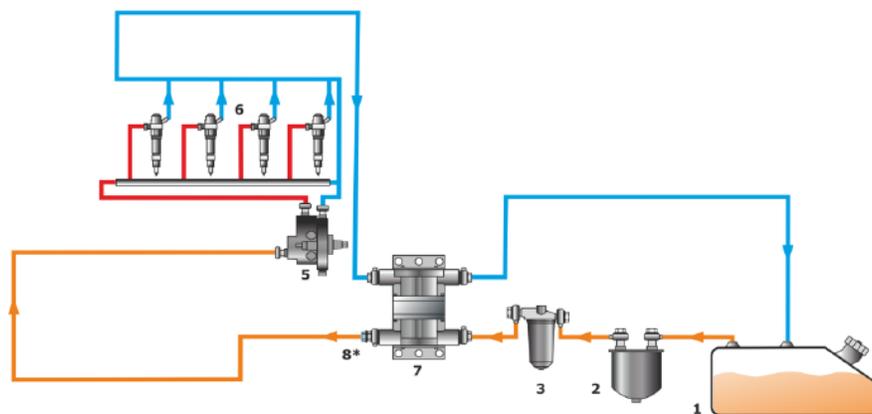
**Figura 22.** *Pruebas en Ruta*

### 3.4.2. Instalación de los Flujómetros DFM 100ACAN

En este apartado se describe el proceso de instalación y configuración de los flujómetros DFM 100ACAN, dispositivos fundamentales para la medición precisa del flujo de combustible en el vehículo. La implementación de estos sensores se llevó a cabo en tres fases principales: instalación mecánica, conexión eléctrica y configuración en modo diferencial. Cada una de estas etapas fue cuidadosamente ejecutada para garantizar que las mediciones obtenidas fueran precisas, confiables y representativas del consumo real del motor en diversas condiciones operativas. A continuación, se presentan los procedimientos y las consideraciones técnicas asociadas a cada fase de este proceso.

#### 3.4.2.1. Instalación Mecánica

La instalación de los sensores de flujo se llevó a cabo siguiendo las directrices establecidas en el manual del fabricante Technoton (Technoton, s/f-b). Considerando las características específicas del vehículo seleccionado, se optó por implementar el esquema de “Cavitación”, tal como se muestra en la Figura 23. Pero, a diferencia de la configuración estándar, que utiliza un medidor de flujo diferencial, se implementó una solución con dos sensores independientes de una cámara: uno instalado en la línea de suministro de combustible y otro en la línea de retorno. Esta disposición permitió obtener mediciones precisas del consumo real del motor mediante el cálculo diferencial entre ambos flujos, sin comprometer la integridad del sistema de alimentación de combustible.



**Figura 23.** Esquema de instalación "De Cavitación"

(Technoton, s/f-b)

El primer sensor (Suministro) se ubicó después de la bomba de baja presión y antes del riel de inyección, mientras que el segundo sensor (Retorno) se instaló inmediatamente después del riel de combustible. Esta disposición permitió calcular el consumo neto de combustible mediante la

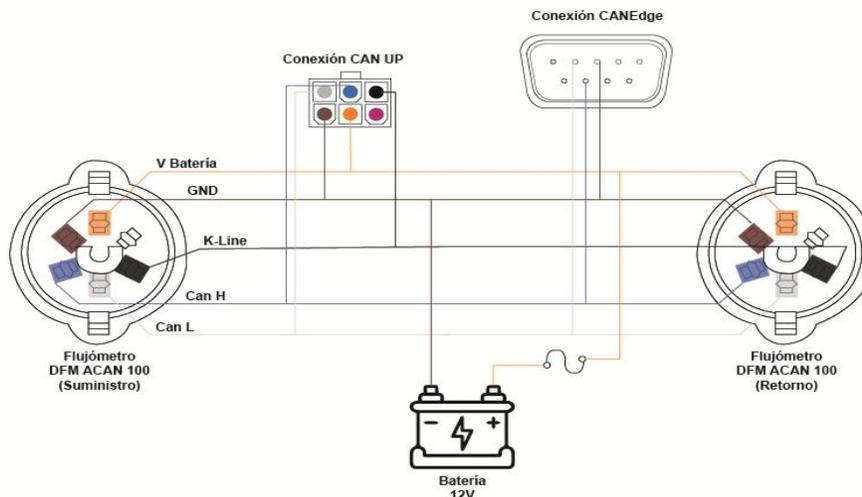
diferencia entre el flujo de suministro y retorno. Adicionalmente, para cumplir con los requisitos del fabricante en cuanto a la orientación de la instalación, se diseñó e implementó una placa de fijación horizontal. Esta placa permitió montar ambos sensores de forma segura en el vano motor, garantizando la posición horizontal recomendada sin alterar la configuración original del vehículo. La Figura 24 muestra la instalación de los sensores de flujo en el vano motor. Cabe destacar que los sensores fueron asegurados a la placa mediante pernos. Esto proporcionó una sujeción mecánica firme y estable, asegurando un funcionamiento adecuado durante todas las pruebas experimentales.



**Figura 24.** *Instalación física de los medidores de flujo*

### **3.4.2.2. Conexión Eléctrica**

La implementación eléctrica de los dos sensores de flujo requirió una adaptación específica respecto al esquema convencional proporcionado por el fabricante. Como se muestra en la Figura 25, se estableció una conexión en paralelo entre ambos sensores, compartiendo tanto las líneas de comunicación CAN-H y CAN-L, como la fuente de alimentación. Esta configuración permitió, por una parte, integrar eficientemente ambos dispositivos en una única red CAN, y por otra, suministrar energía desde la batería de 12 V del vehículo a ambos sensores de forma simultánea. De esta manera se aseguró un funcionamiento estable y continuo durante todas las pruebas experimentales.



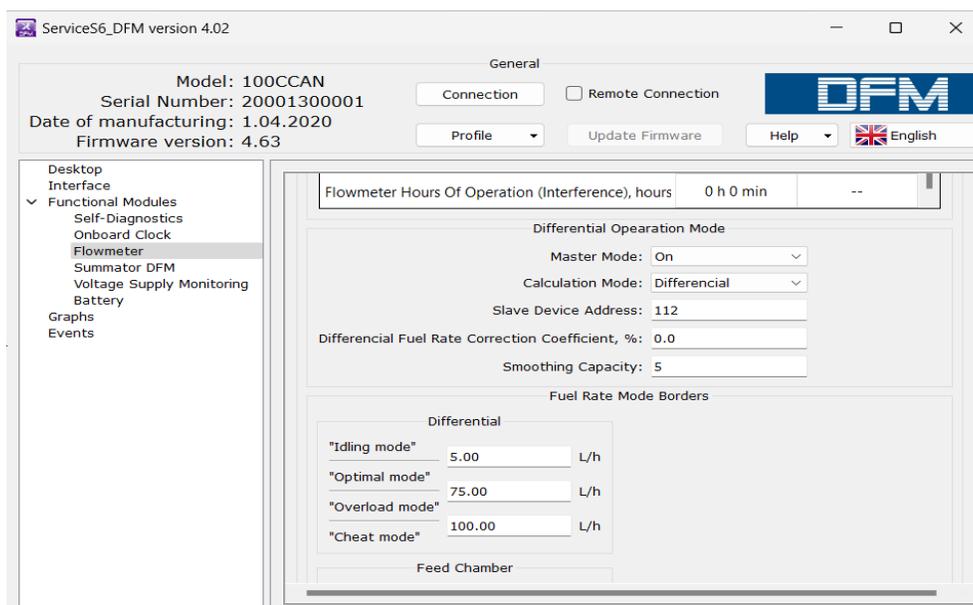
**Figura 25.** Esquema de la instalación eléctrica de los medidores de flujo

Además, se conectó el terminal S6, utilizado para el funcionamiento telemático de los sensores con el servidor ORF5, a la conexión en paralelo previamente establecida entre los sensores de flujo. Esta integración permitió que la unidad CANUp transmitiera de forma periódica los datos de consumo de combustible al servidor telemático ORF5, facilitando así el monitoreo remoto y en tiempo real del desempeño del vehículo. La conexión K-Line se mantuvo sin modificaciones, ya que es esencial para llevar a cabo la configuración informática de los sensores de flujo.

### 3.4.2.3. Configuración de los DFM CAN para su Funcionamiento en Modo Diferencial

La configuración final de los sensores se realizó mediante el software Service S6 DFM, suministrado por el fabricante. Para ello, se utilizó el conector S6 para enlazar los sensores de flujo con una computadora portátil a través de la red digital K-Line. Esto permitió establecer una comunicación estable entre los dispositivos y la computadora. Una vez completado el enlace, se procedió a designar las direcciones S6 y a configurar el modo de funcionamiento de cada sensor. Las direcciones S6 de los sensores de flujo se modificaron desde la pestaña *Interface* del software, como se muestra en la Figura 26. Se asignaron las direcciones 111 y 112 a los sensores instalados en la línea de suministro y en la línea de retorno, respectivamente. Por otro lado, el ajuste de los sensores se realizó en la pestaña *Flowmeter*, dentro de la sección Modo de Operación Diferencial. En esta sección, se habilitó el modo *Master* mediante la lista desplegable y se seleccionó el modo de cálculo *Diferencial*, permitiendo determinar el consumo de combustible a partir de la diferencia entre los valores registrados en las líneas de suministro y retorno. En este modo, el medidor de flujo instalado en la línea de suministro (dirección 111) se configuró como sensor de flujo Master,

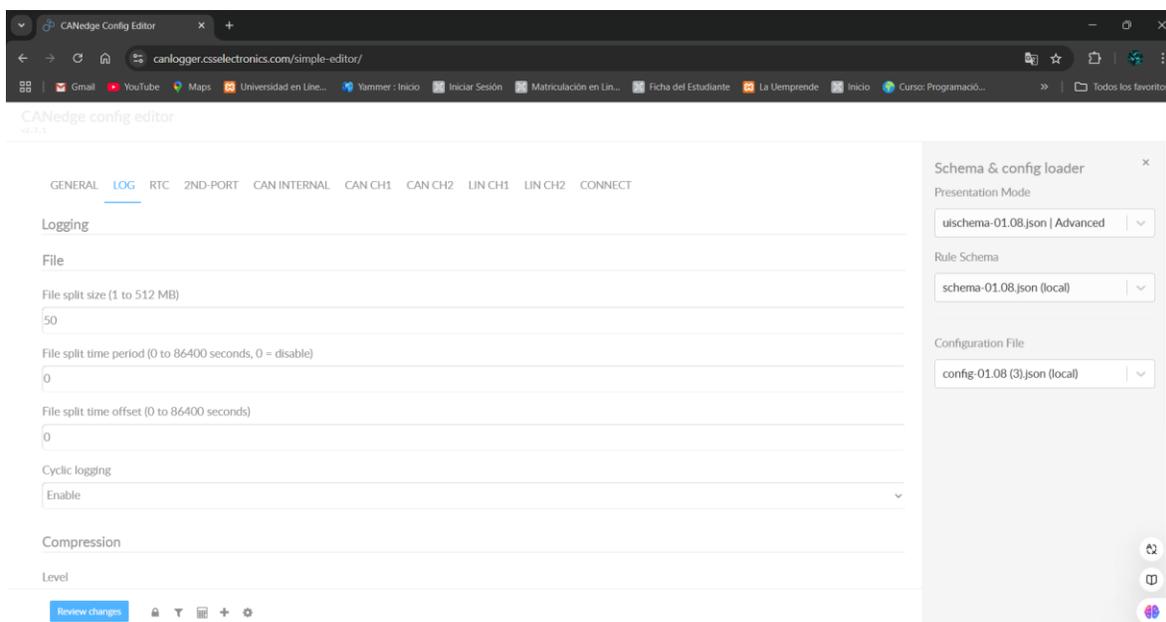
mientras que el medidor instalado en la línea de retorno (dirección 112) se estableció como sensor de flujo Slave.



**Figura 26.** Configuración a modo diferencial

### 3.4.3. Configuración del CANedge2

La configuración del dispositivo CANedge2 se realizó conforme a lo especificado en el manual de instrucciones y mediante la interfaz gráfica de configuración (CANedge Config Editor), ambos proporcionados por CSS Electronics, tal y como se muestra en la Figura 27. Para ello, se utilizó un archivo JSON base también suministrado por el fabricante, sobre el cual se realizaron los ajustes necesarios para que el dispositivo pudiera leer datos de dos canales de red CAN de forma simultánea: uno destinado al CANmod.gps y a la alimentación a través del conector OBD, y otro asignado a los sensores de flujo de combustible.



**Figura 27.** Herramienta CANedge config editor

Para llevar a cabo la configuración de este dispositivo, se realizaron ajustes específicos en distintas secciones del software. Todo esto se hizo siguiendo una secuencia lógica que permitiera asegurar una correcta parametrización conforme a las recomendaciones del fabricante.

En primer lugar, se configuró el tamaño de división de los archivos en la pestaña *LOG*, estableciendo un valor de 50 MB. Esta configuración permitió que, una vez alcanzado dicho tamaño, el dispositivo generara automáticamente un nuevo archivo de registro. De esta manera, se garantizó la continuidad del proceso de adquisición de datos sin interrupciones y se preservó la integridad de la información almacenada.

Posteriormente, en la pestaña *RTC (Real-Time Clock)*, se realizaron ajustes relevantes para la sincronización temporal del dispositivo. El método de sincronización seleccionado fue a través del *CAN-Bus*, mientras que la zona horaria se configuró en *UTC-5*, correspondiente a la región de Ecuador. El ajuste fino de tiempo en segundos se mantuvo en su valor predeterminado de 0, dado que no fue necesario realizar correcciones adicionales. Dentro de esta misma pestaña, en la sección *Message*, se cambió el canal de comunicación predeterminado de *CAN 2* a *CAN 1*, debido a que el canal *CAN 2* ya estaba siendo utilizado para la recepción de datos desde los sensores de flujo. Por otra parte, los campos *Time Valid Signal* y *Time Value Signal* fueron configurados con los valores recomendados en el manual del fabricante, detallados en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Configuración de *Time Valid Signal* y *Time Value Signal*

Time valid Signal		Time Value Signal	
Parámetro	Configuración	Parámetro	Configuración
Signal byteorder	Intel	Signal byteorder	Intel
Signal bit position	1	Signal bit position	8
Signal bit length	1	Signal bit length	40
Signal scaling	1	Signal scaling	0,001
Signal offset	0	Signal offset	1577840400

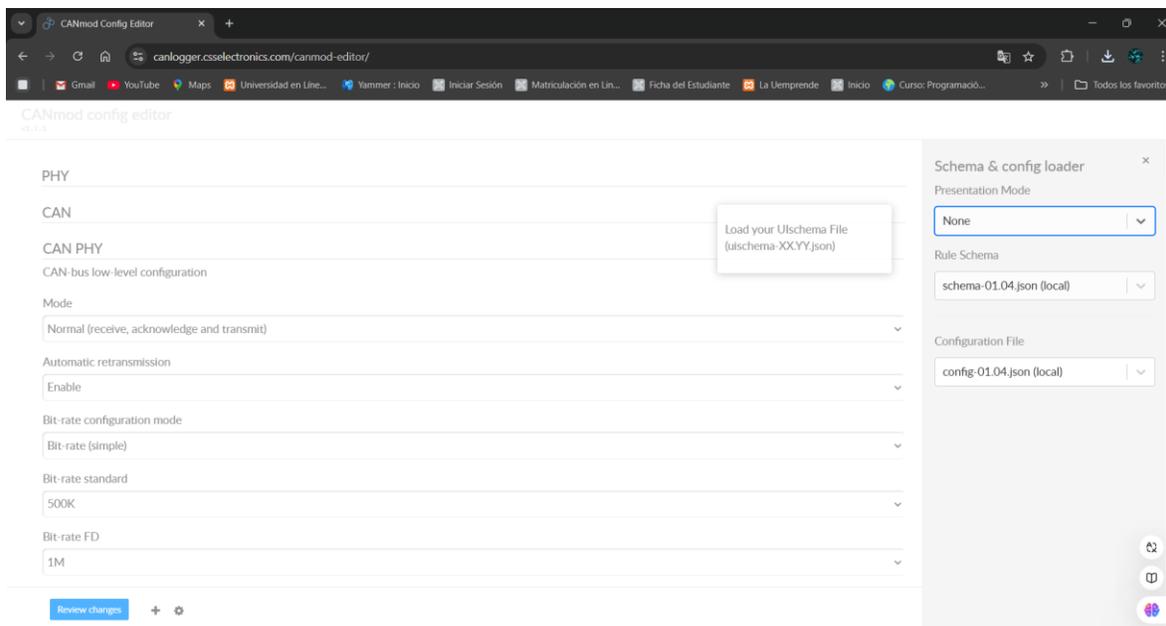
(CSS Electronics, s/f-b)

Las pestañas *2ND-PORT* y *CAN INTERNAL* no requirieron modificación alguna, por lo que se conservaron sus configuraciones predeterminadas, ya que no participaron en los procesos involucrados en esta etapa del trabajo. En cuanto a la pestaña *CAN CHI*, se habilitaron las funciones de *recepción (RX)* y *transmisión (TX)*, configurando el modo de transmisión como *Normal*. Además, se estableció la tasa de bits en 500 kbit/s, utilizando la opción *Bit-Rate (Simple)*, valor adecuado para la comunicación con el módulo CANmod.gps.

Finalmente, en la pestaña *CAN CH2* se aplicó una configuración similar a la de *CAN CHI*, con la diferencia de que la tasa de bits fue ajustada a 250 kbit/s, en concordancia con la velocidad de comunicación requerida por los sensores de flujo de combustible DFM 100ACAN. En las pestañas *LIN CHI*, *LIN CH2* y *CONNECT*, no se realizaron modificaciones, ya que estas funciones no fueron necesarias para los objetivos de la implementación realizada en este estudio. Por lo tanto, se mantuvieron con su configuración por defecto.

#### 3.4.4. Configuración del Módulo CANMod.gps

Para garantizar un funcionamiento adecuado del módulo CANmod.gps y su integración con el sistema de adquisición de datos, fue necesario realizar una serie de ajustes utilizando la interfaz gráfica de configuración *CANmod Config Editor*, proporcionada por CSS Electronics. Esta herramienta, presente en la Figura 28, permitió adaptar los parámetros operativos del módulo a la configuración previamente establecida en el registrador CANedge2.



**Figura 28.** Herramienta *CANmod config editor*

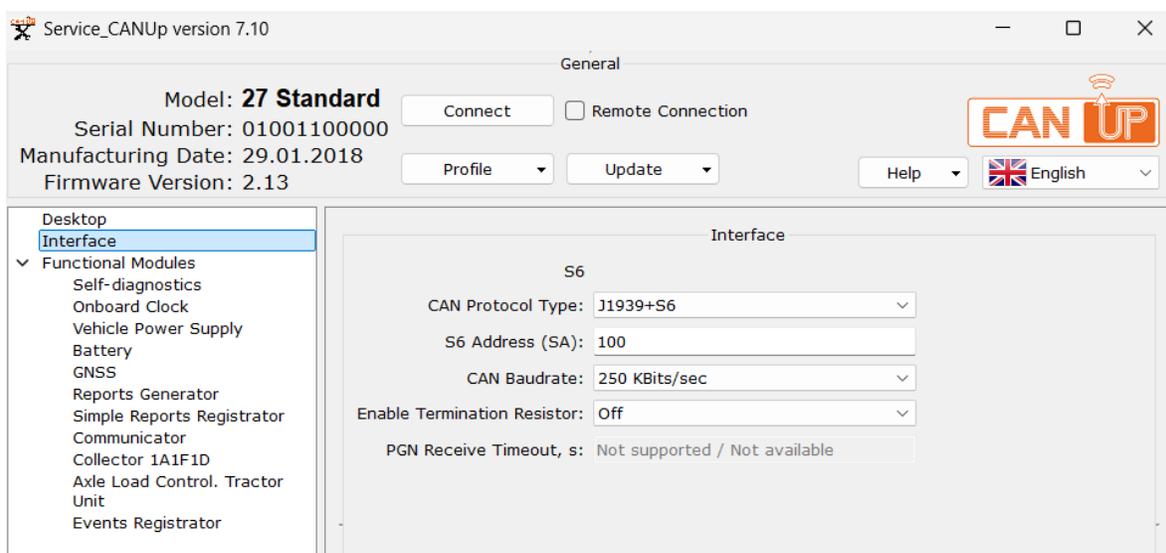
En primer lugar, se ajustó la tasa de bits a 500 kbit/s, en correspondencia con el valor previamente configurado en el canal *CAN 1* del *CANedge2*, al cual se conectó este dispositivo. Esta configuración garantizó la compatibilidad en la velocidad de transmisión dentro de la red CAN, evitando pérdidas o conflictos de datos. Posteriormente, en la sección *Sensor Configuration*, se seleccionó el sistema de navegación satelital *GPS + GLONASS*, debido a que ambos sistemas ofrecen una cobertura amplia y una alta precisión en la geolocalización. Esta decisión respondió a la necesidad de contar con información confiable del vehículo en condiciones reales de operación.

### 3.4.5. Configuración de la Unidad Telemática CANUp

Para asegurar una integración eficiente de la unidad telemática *CANUp* con los sensores de flujo de combustible y el sistema de adquisición de datos, se llevó a cabo una configuración específica mediante la conexión *K-Line*. Este procedimiento se realizó utilizando el software *Service CANUp*, provisto por el fabricante *Technoton*, en conjunto con el adaptador de servicio *S6*. Durante esta etapa, se definieron parámetros clave como el protocolo de comunicación, la dirección del dispositivo, la tasa de intercambio de datos y la vinculación con el servicio telemático, lo que permitió establecer una comunicación estable, precisa y completamente sincronizada con el resto de los componentes del sistema. A continuación, se detallan los parámetros configurados en esta etapa.

### 3.4.5.1. Protocolo de Comunicación, Dirección y Tasa de Intercambio de Datos

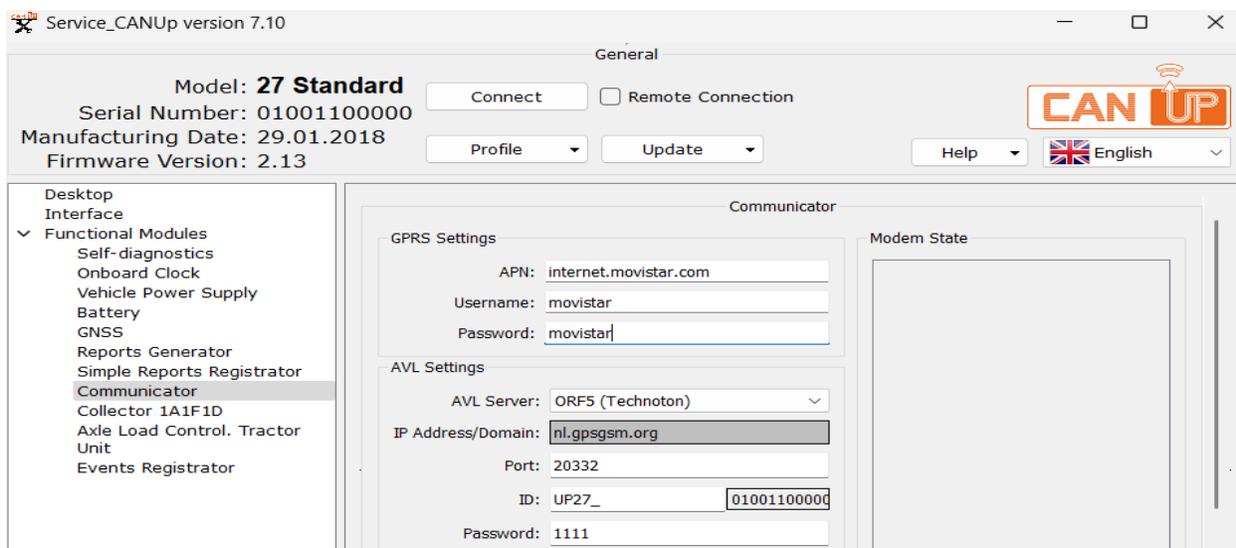
Una vez establecida la conexión entre la unidad telemática CANUp y el software mediante una computadora, se accedió a la pestaña Interface, donde se configuraron los parámetros clave de operación. En primer lugar, en el apartado *CAN Protocol Type*, se seleccionó el protocolo J1939+S6 desde la lista desplegable, por ser compatible con los sensores de flujo empleados en el sistema. Seguidamente, se asignó al dispositivo la dirección 100, un identificador esencial para su correcta comunicación dentro de la red CAN. Finalmente, se configuró la tasa de intercambio de datos a 250 kbit/s, valor que coincide con la velocidad de comunicación de los sensores DFM 100ACAN, lo cual aseguró una transmisión estable y sin pérdidas de información. Los ajustes realizados durante esta etapa se ilustran en la Figura 29.



**Figura 29.** Configuración del CANUp

### 3.4.5.2. Conexión al servicio telemático ORF

Una vez finalizada la configuración de los parámetros clave de operación de la unidad telemática CANUp, se procedió a establecer la conexión entre esta unidad y el servicio telemático ORF 5. Este proceso se llevó a cabo utilizando el mismo software especializado proporcionado por el fabricante. Para ello, se accedió a la pestaña *Communicator*, donde se configuró el módem GPRS para conectarse a la red de internet mediante la introducción de los datos del APN del operador celular, como se muestra en la Figura 30. En este caso, se utilizó una tarjeta SIM de la operadora Movistar, por lo que se estableció el APN como *internet.movistar.com*. Del mismo modo, en los campos de usuario y contraseña, se ingresó el valor "movistar", completando los parámetros necesarios para garantizar una conexión estable y continua con el servidor ORF 5.



**Figura 30.** Conexión al servicio telemático ORF 5

### 3.4.6. Prueba de conexión: Unidad Telemática CANUp y Servicio Telemático ORF 5

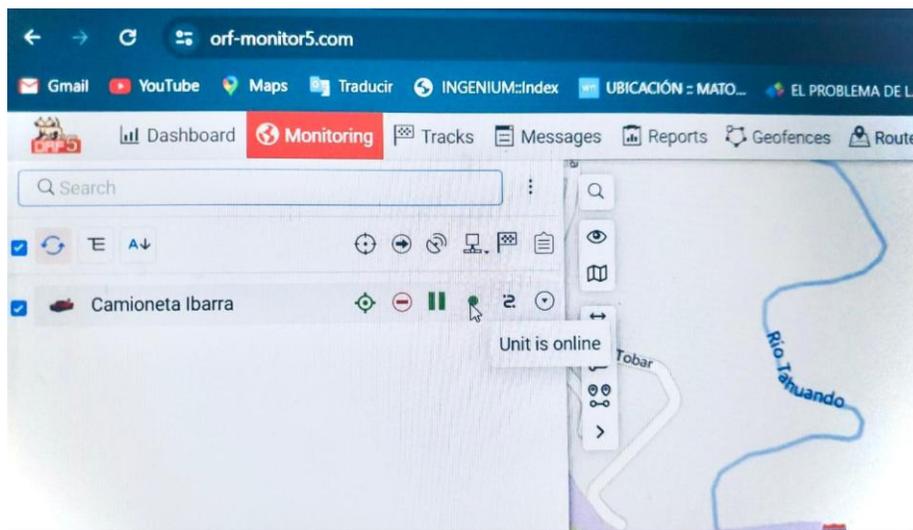
La verificación de conexión entre la unidad CANUp y el servicio telemático ORF 5, inició comprobando la conexión física entre la unidad y los medidores de flujo de combustible DFM 100ACAN a través del terminal S6, como se muestra en la Figura 31. Una vez confirmado el correcto estado de la conexión, se realizó una inspección visual del estado de los indicadores LED del dispositivo con el fin de asegurar su funcionamiento adecuado: el LED verde (*PWR*) indicó que el equipo estaba alimentado correctamente; el LED rojo (*SRV*) confirmó la transmisión de datos; el LED amarillo (*GNSS*) validó la recepción de señal satelital; y el LED azul (*LINK*) mostró que el módem GPRS mantenía una conexión activa a Internet.



**Figura 31.** Conexión física CANUp - Flujómetros de combustible

Posteriormente, se llevó a cabo un recorrido de prueba para validar la transmisión efectiva de datos hacia la plataforma remota. Durante esta fase, se accedió a la plataforma *ORF Monitor 5 Telematics Service*, desarrollada por el fabricante Technoton, donde se verificó que la unidad estuviera en línea y transmitiendo datos en tiempo real. Esta validación, ilustrada en la Figura 32,

confirmó el correcto funcionamiento del canal de comunicación entre la unidad telemática instalada en el vehículo y el servidor remoto del sistema ORF 5.



**Figura 32.** Verificación de conexión en línea de la unidad CANUp en la plataforma ORF Monitor 5

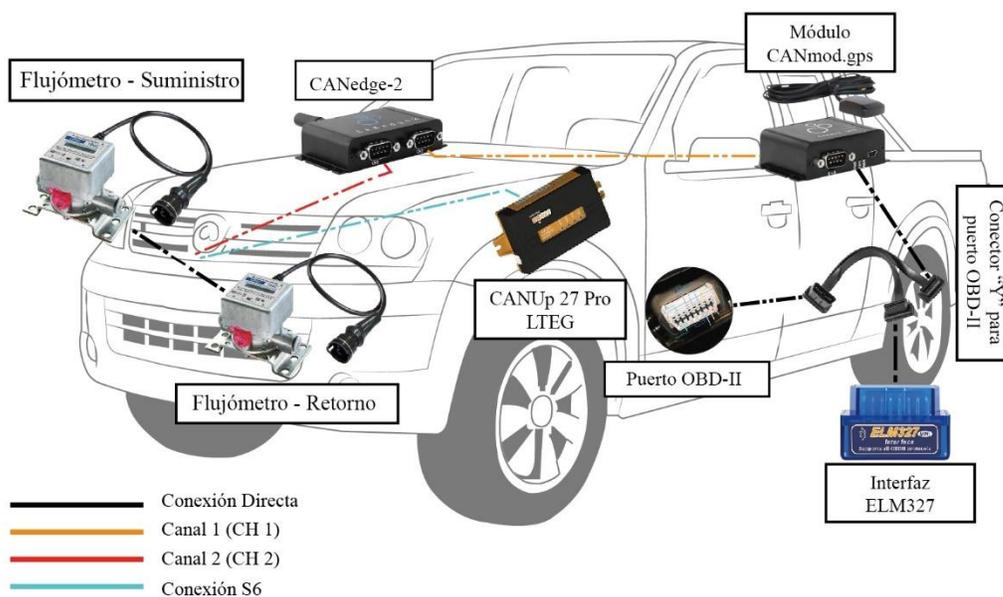
Una vez verificado el estado en línea del dispositivo CANUp a través de la plataforma ORF Monitor 5, se procedió a confirmar que la transmisión de datos hacia el servicio telemático ORF 5 se realizara correctamente. Como se observa en la Figura 33, los datos relacionados con el consumo instantáneo de combustible, coordenadas GNSS y flujo de suministro y retorno fueron registrados y enviados en tiempo real. No obstante, tras revisar los datos recopilados, se identificó que la frecuencia de muestreo predeterminada del sistema no coincidía con la requerida para el análisis técnico detallado. Esta discrepancia representaba un inconveniente para evaluar con precisión la dinámica del consumo de combustible, especialmente durante variaciones rápidas en la operación del vehículo. Para resolver esta limitación, se implementó una fase adicional descrita en la sección 3.7.1.1, en la cual se aplicó un proceso de interpolación de los datos experimentales. Esta etapa permitió corregir la desincronización temporal y generar un conjunto de datos más uniforme y continuo, adecuado para los objetivos analíticos del estudio.

Agrupación	Coordenadas	Sensor	Distancia por GNSS	Consumo Instantáneo de Combustible	Horas de Operación del Motor	Temperatura del combustible del motor	Voltaje	tiempo de movimiento por gnss	Suministro	Retorno	Consumo total	Tiempo	Velocidad
01 Ago 2024 16:28:19	0.282712, -78.211830	---	---	0.08	---	---	---	---	22.45	30.05	---	01 Ago 2024 16:28:19	---
01 Ago 2024 16:28:33	0.282712, -78.211830	---	---	0.38	---	---	---	---	18.49	30.05	---	01 Ago 2024 16:28:33	---
01 Ago 2024 16:28:43	0.282712, -78.211830	---	---	0.74	---	---	---	---	22.45	30.25	---	01 Ago 2024 16:28:43	---
01 Ago 2024 16:29:00	0.282778, -78.211892	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	01 Ago 2024 16:29:00	---
01 Ago 2024 16:29:03	0.282777, -78.211892	---	---	0.98	---	---	---	---	18.49	30.05	---	01 Ago 2024 16:29:03	---
01 Ago 2024 16:29:13	0.282773, -78.211892	---	---	0.92	---	---	---	---	18.49	30.25	---	01 Ago 2024 16:29:13	---
01 Ago 2024 16:29:23	0.282773, -78.211892	---	---	0.94	---	---	---	---	22.45	30.05	---	01 Ago 2024 16:29:23	---
01 Ago 2024 16:29:43	0.282765, -78.211792	---	---	0.96	---	---	---	---	14.53	30.05	---	01 Ago 2024 16:29:43	---
01 Ago 2024 16:29:53	0.282765, -78.211792	---	---	0.96	---	---	---	---	18.49	30.45	---	01 Ago 2024 16:29:53	---
01 Ago 2024 16:30:03	0.282765, -78.211792	---	---	0.94	---	---	---	---	18.49	30.25	---	01 Ago 2024 16:30:03	---
01 Ago 2024 16:30:13	0.282765, -78.211792	---	---	0.95	---	---	---	---	14.53	30.25	---	01 Ago 2024 16:30:13	---
01 Ago 2024 16:30:33	0.282765, -78.211792	---	---	0.94	---	---	---	---	22.19	30.25	---	01 Ago 2024 16:30:33	---
01 Ago 2024 16:30:43	0.282765, -78.211792	---	---	0.90	---	---	---	---	14.53	30.05	---	01 Ago 2024 16:30:43	---
01 Ago 2024 16:30:53	0.282765, -78.211792	---	---	0.92	---	---	---	---	22.45	29.86	---	01 Ago 2024 16:30:53	---
01 Ago 2024 16:31:03	0.282765, -78.211792	---	---	0.95	---	---	---	---	22.45	30.25	---	01 Ago 2024 16:31:03	---
Total	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	01 Ago 2024 16:27:36	0.00

**Figura 33.** Visualización de datos transmitidos en la plataforma ORF Monitor 5.

### 3.4.7. Disposición Final de los Equipos en el Vehículo

La Figura 34 presenta el esquema definitivo de la configuración implementada en el estudio, resultado de un exhaustivo proceso de pruebas y optimización del sistema. La disposición final integra de manera estratégica diversos componentes tecnológicos para garantizar una captura precisa y completa de datos durante la fase experimental. Este esquema refleja la interconexión funcional entre los sensores de flujo de combustible DFM 100ACAN, la unidad telemática CANUp, el registrador CANedge2, el módulo GNSS CANmod.gps y el registrador ELM327, todos configurados para operar en sincronía bajo protocolos de comunicación compatibles.



**Figura 34.** Disposición final de los equipos

### **3.5.Campaña Experimental**

En esta sección se presenta un análisis detallado de la campaña experimental realizada. En primer lugar, se exponen las características generales de la ruta seleccionada. Posteriormente, se proporciona información específica sobre la ruta y cada uno de sus tramos, destacando sus particularidades.

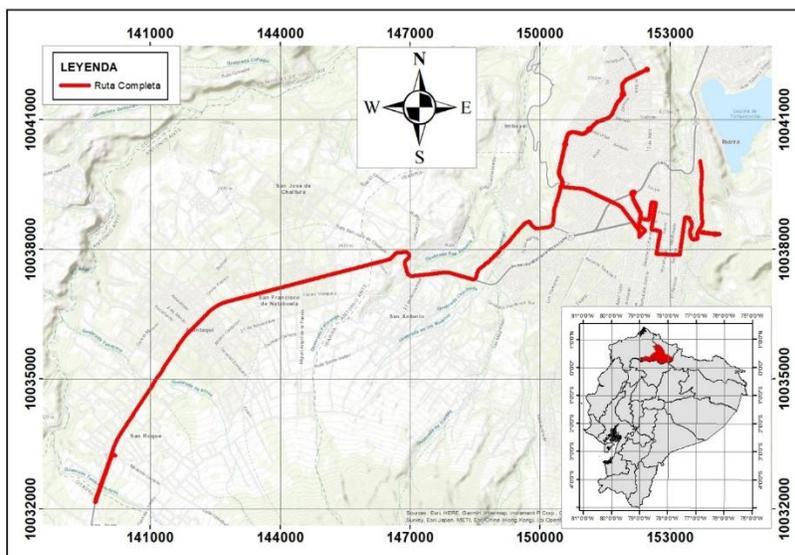
#### **3.5.1. Características de la Ruta Seleccionada**

Con el objetivo de evaluar el desempeño vehicular bajo condiciones reales de tráfico, se llevó a cabo este estudio en la provincia de Imbabura, Ecuador. Para garantizar la representatividad de los datos, se diseñó una ruta dividida en tres tramos claramente diferenciados: urbano, suburbano y autopista. Donde se realizaron tres ensayos en días y horarios distintos, incluyendo horas pico, con una duración promedio de 78 minutos por prueba. Esta metodología permitió capturar variaciones significativas en el comportamiento del vehículo en función de las condiciones de tráfico.

Cada ensayo generó datos precisos sobre las variables cinemáticas del vehículo. Estos resultados no solo validaron la selección de la ruta como representativa de condiciones reales de conducción, sino que también proporcionaron una base sólida para analizar el impacto de diferentes entornos de conducción en el consumo de combustible y las emisiones.

##### **3.5.1.1. Ruta Completa**

La ruta integral diseñada para el estudio se presenta en la Figura 35. Esta ruta cubrió un recorrido total de 35 km entre las ciudades de Ibarra y Atuntaqui, iniciando en la Avenida 17 de julio y finalizando en el peaje de San Roque. Este trayecto fue meticulosamente planificado para incluir tres tipos distintos de condiciones de conducción, asegurando una evaluación comprensiva del desempeño vehicular. Las pruebas mostraron una duración promedio de 78 minutos por recorrido completo, con variaciones altimétricas significativas que oscilaron entre 2177 y 2548 msnm.



**Figura 35.** Ruta Completa

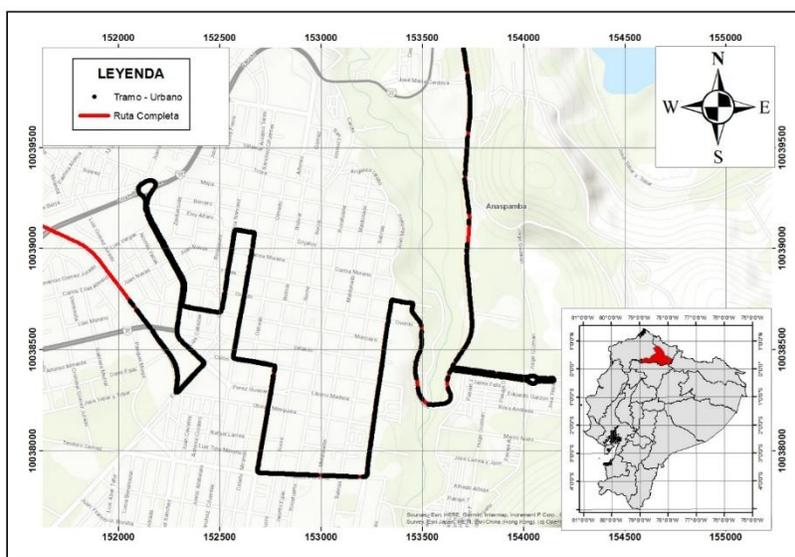
La Tabla 17 muestra los datos recopilados durante los ensayos realizados. Estos valores revelaron una velocidad máxima de 85,41 km/h y una velocidad promedio general de 28,31 km/h, reflejando las diversas condiciones de tráfico encontradas a lo largo de los diferentes segmentos.

**Tabla 17.** Características de la Ruta Completa

Ensayo	Duración (min)	Velocidad	Velocidad	Altura	Altura
		Máxima (km/h)	Promedio (km/h)	Máxima (msnm)	Mínima (msnm)
1	60	85,41	32,72	2538,95	2290,82
2	84	83,12	25,64	2534,42	2192,04
3	81	80,05	26,57	2548,3	2177,57

### 3.5.1.2. Subtramo Urbano

El subtramo urbano se muestra en la Figura 36. Este segmento contó con una extensión de 9 km y se concentró en el corazón de la ciudad de Ibarra, iniciando en la Avenida 17 de Julio y continuando por las principales vías como la Avenida Teodoro Gómez de la Torre hasta finalizar en la Avenida Fray Vacas Galindo. Este subtramo presentó las condiciones de tráfico más desafiantes, caracterizadas por una alta densidad vehicular, numerosas intersecciones con semáforos y constante flujo peatonal.



**Figura 36.** *Tramo Urbano*

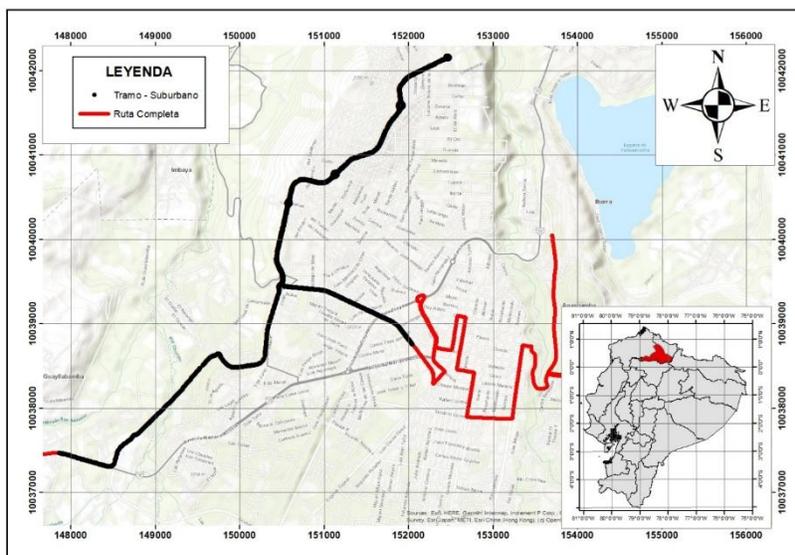
La Tabla 18 muestra los datos recopilados durante los ensayos realizados. Estos valores revelaron una velocidad promedio notablemente baja de 13 km/h, evidenciando los efectos de la congestión urbana. El perfil altimétrico mostró variaciones entre 2177 y 2269 msnm, mientras que el tiempo promedio de recorrido alcanzó los 40 minutos, representando la porción más lenta de toda la ruta.

**Tabla 18.** *Características del Subtramo Urbano*

Ensayo	Duración (min)	Velocidad	Velocidad	Altura	Altura
		Máxima (km/h)	Promedio (km/h)	Máxima (msnm)	Mínima (msnm)
1	26	48,99	16,056	2269,11	2219,37
2	48	52,07	11,447	2256,77	2219,37
3	47	51,24	11,799	2262,68	2177,57

### 3.5.1.3. Subtramo Suburbano

El subtramo suburbano se presenta en la Figura 37. Este segmento contó con una distancia de 11 km y conectó el área urbana con las zonas periféricas partiendo desde la Avenida Fray Vacas Galindo hasta el Corredor Periférico Sur. Este segmento atravesó principalmente zonas residenciales y áreas industriales emergentes, presentando un flujo vehicular más fluido que el centro urbano, pero con presencia significativa de transporte pesado.



**Figura 37. Tramo Suburbano**

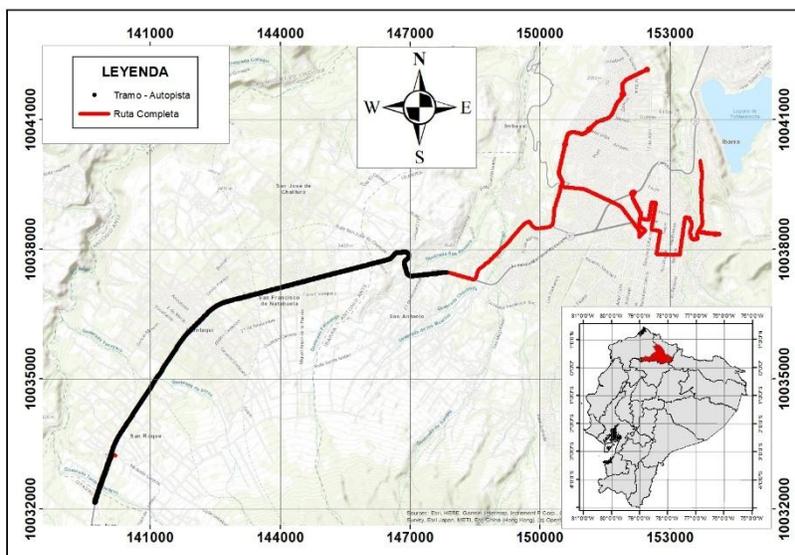
Las Tabla 19 muestra los datos recopilados durante los ensayos realizados. Estos valores revelaron una velocidad promedio considerablemente mayor de 39 km/h en comparación con el tramo urbano. La altitud varió entre 2192 y 2340 msnm, mientras que el tiempo de recorrido se redujo a aproximadamente 20 minutos, demostrando una notable mejora en la eficiencia de movimiento respecto al área urbana.

**Tabla 19. Características del Subtramo Suburbano**

Ensayo	Duración (min)	Velocidad	Velocidad	Altura	Altura
		Máxima (km/h)	Promedio (km/h)	Máxima (msnm)	Mínima (msnm)
1	20	71,60	38,67	2337,78	2195,2
2	21	68,86	37,10	2332,3	2192,04
3	18	70,95	42,29	2340,6	2199,64

#### 3.5.1.4. Subtramo Autopista

El subtramo autopista se presenta en la Figura 38. Este segmento fue el más extenso con una distancia de 14 km y cubrió desde el Corredor Periférico Sur hasta Peaje San Roque por la Carretera Panamericana E35. Esta porción presentó las mejores condiciones de conducción, con tráfico rápido y continuo, mínimas interrupciones y presencia regular de transporte de carga



**Figura 38. Tramo Autopista**

La Tabla 20 muestra los datos recopilados durante los ensayos realizados. Estos valores revelaron un desempeño vehicular significativamente mejor, con una velocidad promedio de 55 km/h y un tiempo de recorrido promedio de apenas 13 minutos. El perfil altimétrico en este tramo varió entre 2280 y 2548 msnm, completando la transición desde las zonas bajas urbanas hasta las elevaciones más altas de la ruta.

**Tabla 20. Características del subtramo Autopista**

Ensayo	Duración (min)	Velocidad	Velocidad	Altura	Altura
		Máxima (km/h)	Promedio (km/h)	Máxima (msnm)	Mínima (msnm)
1	12	85,41	56,59	2538,95	229955
2	13	83,12	55,09	2534,42	2290,24
3	14	80,05	55,62	2548,3	2280,61

### 3.6. Determinación de Par y Potencia a través del Dinamómetro BPA-V2R

Antes de continuar con el procesamiento de los datos experimentales, se llevó a cabo un ensayo complementario utilizando el dinamómetro BPA-V2R de la universidad y vehículo empleado durante la campaña experimental, tal y como se muestra en la Figura 39. El objetivo de este ensayo fue obtener las curvas características de Par y Potencia del vehículo, datos esenciales para el análisis del desempeño vehicular. Aunque el procedimiento detallado de este ensayo se presenta

en un estudio previo (Arboleda & Hernández, 2023), a continuación, se presenta una breve descripción de los aspectos más relevantes de este proceso.



**Figura 39.** Prueba en el dinamómetro BPA-V2R con el vehículo

### 3.6.1. Descripción del Ensayo

Para obtener las curvas representativas de Par y Potencia, se llevaron a cabo dos ensayos, siendo los resultados del segundo ensayo los que se utilizaron para calcular las curvas máximas de Par y Potencia. Cabe destacar que el procedimiento seguido en ambos ensayos fue similar, y se describe a continuación:

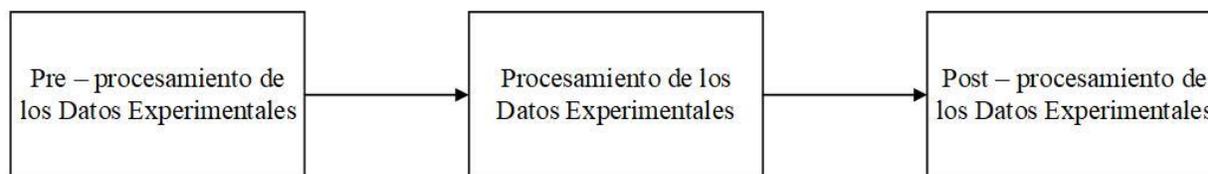
- Ubicar el vehículo de tal manera que las ruedas motrices; en este caso las traseras, queden por sobre los rodillos del dinamómetro.
- Colocar las bandas de seguridad recomendadas para asegurar el vehículo en caso de que los rodillos del dinamómetro no funcionen adecuadamente.
- Colocar un taco debajo del freno de servicio del vehículo para que este quede levantado y asegurarse de que el freno de estacionamiento no se encuentre accionado.
- Encender el vehículo y calibrar el régimen de giro del motor con las revoluciones de los rodillos del dinamómetro. Cabe señalar que se utilizó una transmisión directa desde el motor hacia las ruedas, por lo que solo se alcanzó el cuarto cambio de velocidad.
- Poner en marcha el vehículo y realizar los cambios de marcha lo más rápido posible, siguiendo las indicaciones del software del dinamómetro.
- Una vez alcanzada la transmisión directa (cuarto cambio), acelerar el vehículo hasta alcanzar aproximadamente las revoluciones máximas deseadas para cada ensayo.

- Dejar de acelerar y permitir que los neumáticos lleguen al reposo una vez que se alcancen las revoluciones máximas deseadas en cada ensayo.
- Descargar los resultados de cada ensayo para su posterior análisis.

De este modo, se obtuvieron las curvas de Par y Potencia en la salida del cigüeñal del vehículo. Sin embargo, dado que las pruebas con el dinamómetro se realizaron a una altitud considerablemente mayor al nivel del mar, aproximadamente a 2225 msnm, estas fueron ajustadas durante la fase de procesamiento de datos, siguiendo las recomendaciones presentes en la norma (*International Standard ISO 1585, 1992*). Este ajuste fue necesario debido a que los resultados observados al finalizar cada ensayo no reflejaban el rendimiento máximo real del vehículo.

### 3.7. Procesamiento de los Datos Experimentales

La Figura 40 presenta las tres etapas fundamentales consideradas para el procesamiento de los datos. Estas etapas se derivan en diferentes subprocesos que permiten obtener los resultados deseados mediante una secuencia cronológica y ordenada. La etapa inicial, conocida como pre - procesamiento de datos, consiste en la preparación de la información, e incluye subprocesos como la descarga y limpieza de los datos obtenidos de los registradores. En la segunda etapa, denominada procesamiento de datos, se utilizó un enfoque cuantitativo para analizar la información recolectada. Finalmente, en la tercera etapa, denominada post - procesamiento de datos, se realizó el análisis final, que incluyó la creación de gráficos estadísticos, mapas del motor y diferentes herramientas esenciales para representar de manera más precisa los resultados obtenidos en la etapa anterior.



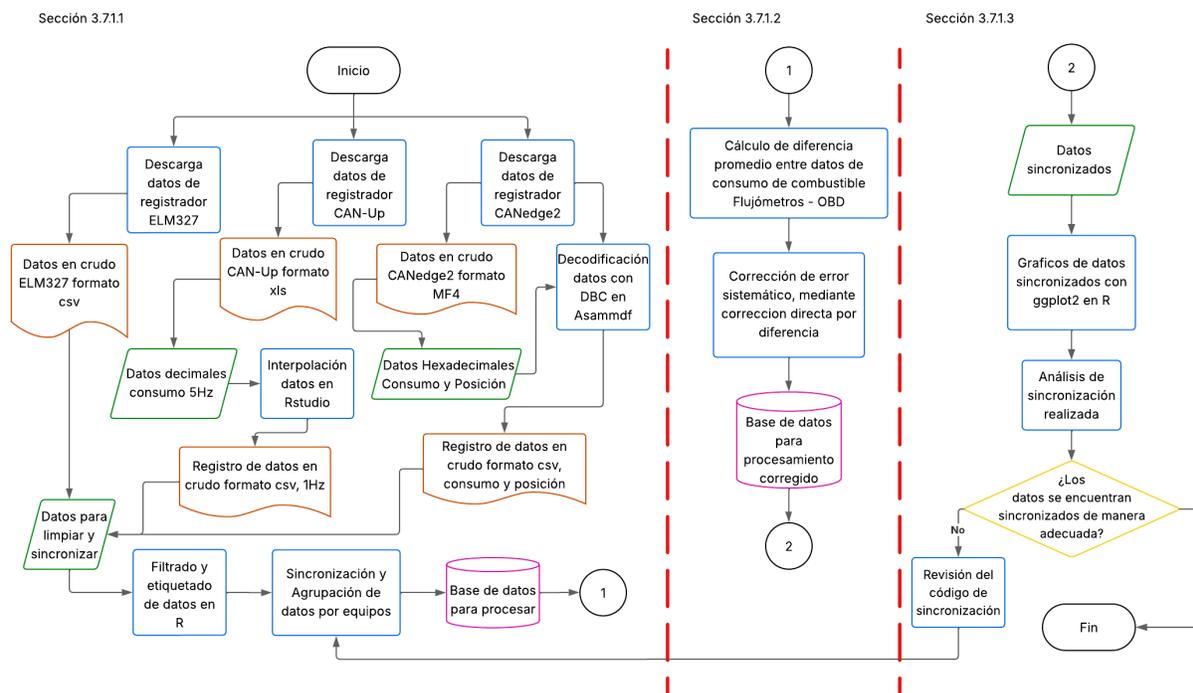
**Figura 40.** *Etapas del procesamiento de datos*

Cabe mencionar que las tres etapas consideradas en esta sección se derivan de un estudio preliminar (D. E. Arias, 2025). Sin embargo, a continuación, se presenta a detalle el proceso realizado.

#### 3.7.1. Pre - procesamiento de los Datos Experimentales

Esta etapa permitió preparar de manera adecuada los datos obtenidos durante la fase experimental, dejándolos listos para su posterior análisis. Como se detalla en la Figura 41, esta etapa incluyó varios subprocesos fundamentales divididos por tres secciones. En la *sección 3.7.1.1*, se abordaron

tareas esenciales como la decodificación, limpieza, sincronización e interpolación de los datos. En la *sección 3.7.1.2*, se realizó la corrección del error sistemático identificado en las mediciones del flujo de combustible. Finalmente, en la *sección 3.7.1.3*, se validó la sincronización temporal entre las distintas variables registradas. Para llevar a cabo estas tareas, se utilizaron herramientas especializadas como RStudio y Asammdf.



**Figura 41.** Diagrama de Flujo - Etapa Correspondiente al Pre - procesamiento de Datos

Gracias a estas acciones, los datos fueron transformados a un formato limpio, coherente y estructurado, lo que permitió un análisis técnico preciso y la generación de resultados confiables sobre el comportamiento del consumo de combustible bajo condiciones reales de operación. A continuación, se describe detalladamente cada una de las etapas mencionadas.

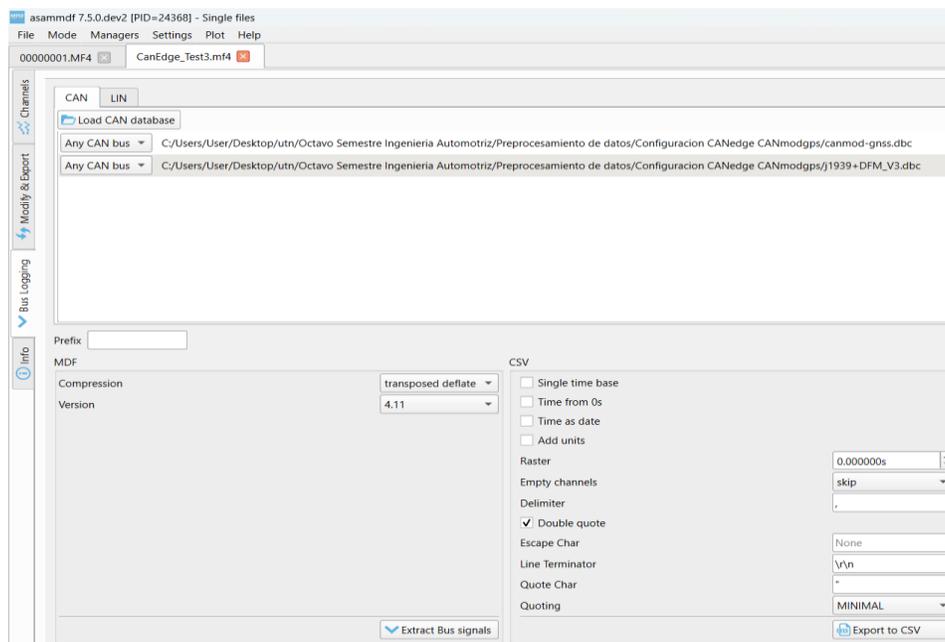
### 3.7.1.1. Decodificación, Limpieza, Sincronización e Interpolación de los Datos

#### Experimentales

En esta sección, primero se procedió con la descarga de los archivos generados por cada uno de los registradores utilizados durante la campaña experimental. Como se mencionó anteriormente, los archivos que contienen los parámetros de operación del motor, registrados mediante el dispositivo ELM327, no requirieron decodificación, ya que la aplicación Torque Pro realizó este proceso de forma automática, permitiendo la exportación directa en formato CSV. De manera

similar, el servidor telemático ORF 5 proporcionó los informes generados a partir de la información registrada por los sensores de flujo de combustible en formato .XLS, por lo que tampoco fue necesario aplicar un proceso de decodificación adicional.

En contraste, los archivos correspondientes a los registros cinemáticos y de consumo de combustible obtenidos mediante el CANedge2 fueron almacenados en formato MF4, un tipo de archivo binario sin procesar que requiere ser convertido a valores físicos para su adecuada interpretación. Para ello, tal como se muestra en la Figura 42, se cargaron archivos DBC (Base de Datos CAN) en el apartado *Bus Logging* del software de código abierto Asammdf. Estos archivos DBC contienen las reglas necesarias para decodificar los mensajes CAN, permitiendo transformar los valores en formato hexadecimal en magnitudes físicas comprensibles. Una vez decodificados, los datos fueron exportados en formato CSV para facilitar su análisis en las siguientes etapas del procesamiento.



**Figura 42.** *Interfaz de Asammdf con los DBCs cargados*

Una vez almacenados los archivos que contenían los datos de operación del motor, posición y flujo de combustible en formato CSV, se procedió a realizar los procesos de limpieza, sincronización e interpolación de datos. Para ello, se empleó el lenguaje de programación R junto con su entorno de desarrollo RStudio, el cual facilitó la manipulación y el tratamiento estructurado de los registros obtenidos. La interfaz de trabajo utilizada se muestra en la Figura 43.

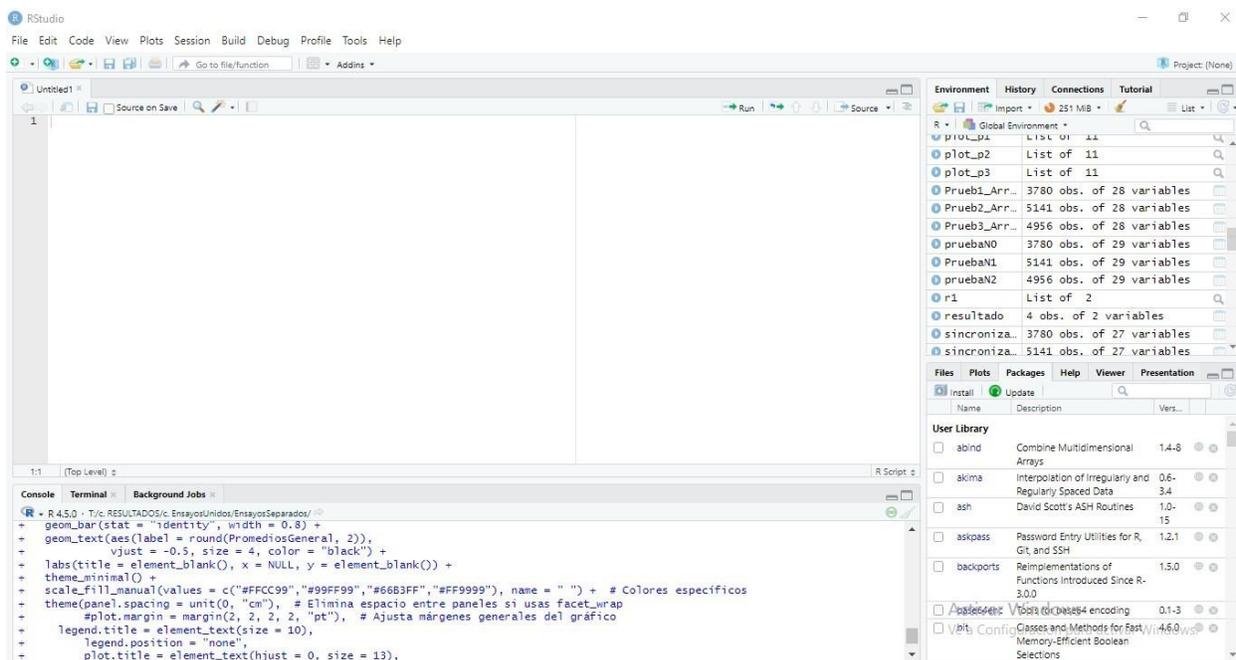


Figura 43. Interfaz gráfica de RStudio

El proceso de limpieza de datos inició con la selección exclusiva de las variables de interés, las cuales se detallaron en la Tabla 7. Esta etapa fue esencial, ya que cada uno de los registradores utilizados durante la campaña experimental generó una gran cantidad de variables, muchas de las cuales no aportan información relevante para los objetivos del estudio. A continuación, se procedió a renombrar las variables seleccionadas utilizando la función `dplyr::rename()`, con el fin de estandarizar los nombres y facilitar su manipulación en etapas posteriores. Este procedimiento se aplicó individualmente a cada archivo CSV generado por los diferentes equipos.

Previo a la aplicación de filtros, se transformaron los valores de todas las columnas, excepto aquellas correspondientes a latitud y longitud, al tipo numérico mediante la función `base::as.numeric()`. Finalmente, se implementaron distintos filtros condicionales mediante la función `dplyr::filter()`, con el objetivo de eliminar las filas que no cumplieran con los criterios definidos. Cabe destacar que este último paso fue aplicado únicamente en aquellas tablas que presentaban registros con datos atípicos o no deseados.

Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de sincronización temporal de los datos, utilizando como referencia las marcas de tiempo registradas por cada equipo. Este enfoque fue posible gracias a que todos los dispositivos utilizaron fuentes horarias basadas en señales provenientes de relojes atómicos de satélites GNSS. En el caso del registrador ELM327, los datos de fecha y hora fueron proporcionados por el teléfono Android donde se ejecutó la aplicación Torque Pro, la cual

sincroniza su reloj interno con la hora GNSS del dispositivo móvil. Por su parte, el CANedge2 utilizó su reloj interno, previamente configurado mediante la función RTC (Real Time Clock). Finalmente, la unidad CANUp obtuvo directamente la hora y fecha exactas desde los satélites GNSS, gracias a su función de reloj de a bordo. Esta convergencia temporal permitió alinear cronológicamente los datos de forma precisa entre los diferentes sistemas de adquisición, para después realizar las transformaciones correspondientes de hora y fecha de cada uno de los registradores en un solo formato de fecha y hora en R con la función `base::as.POSIXct()`

Con las marcas de tiempo alineadas, se procedió a sincronizar los datos de los dispositivos utilizando los valores de fecha y hora en formato de tiempo de R. Para ello, se empleó la función `data.table::setDT()`, que permite convertir las tablas generadas por cada dispositivo en objetos de tipo `data.table`, facilitando la combinación de los registros temporales. Este proceso resultó en un dataframe sincronizado, estructurado y listo para su análisis, que fue posteriormente exportado como un nuevo archivo en formato CSV. En la Figura 44 se puede apreciar un fragmento del código desarrollado para la limpieza y sincronización de los datos.

```

1 - #===== PART 1: SINCRONIZACION DE DATOS =====
2
3 # Importación de librerías
4 library(tidyverse)
5 library(data.table)
6
7
8 SincronizarDatos <- function(dir_CanEdge, dir_OBD, dir_CanUp, rMes1, rMes2){
9
10 #===== IMPORTAR ARCHIVOS =====
11
12 CanEdge_datos <- read.csv(dir_CanEdge)
13 OBD_datos <- read.csv(dir_OBD)
14 CanUp_datos <- read.csv2(dir_CanUp)
15
16 #===== OBD =====
17 #seleccionar posición
18 str_sub(OBD_datos$Device.Time, start = 4L, end = 7L) <- rMes1
19 #cambiar formato fecha R
20 Variables_OBD <- transmute(OBD_datos, PK_Fecha = as.POSIXct(Device.Time, tryFormats = "%d-%m-%Y %H:%M:%S"))
21 #Agregamos columnas al DF con los valores seleccionados del archivo original
22 Variables_OBD <- mutate(Variables_OBD, select(OBD_datos,
23                                     Longitude,
24                                     Latitude,
25                                     Altitude,
26                                     Speed..OBD..km.h.,
27                                     Timing.Advance...,
28                                     Engine.RPM.rpm.,
29                                     Torque.Nm.,
30                                     Engine.Load...,
31                                     Fuel.Flow.rate.hour.1.hr.
32                                     ))
33
34 #Cambiamos el nombre a cada variable seleccionada
35 Variables_OBD <- rename(Variables_OBD,
36                         Longitude_1 = Longitude,
37                         Latitud_1 = Latitude,
38                         Altitud_1 = Altitude,
39                         VelocidadMps_1 = Speed..OBD..km.h.,
40                         AvanceEncendido_1 = Timing.Advance...,

```

**Figura 44.** Fragmento del código para la limpieza y sincronización de los datos

Tras finalizar las pruebas piloto, se identificó una inconsistencia en los datos recopilados por el registrador CANUp 27 Pro LTE G, relacionada con su frecuencia de muestreo limitada a 0,2 Hz. Esta tasa de adquisición resultó insuficiente frente a la mayor resolución temporal de los otros equipos, lo que ocasionó una pérdida significativa de información, especialmente en situaciones con rápidas variaciones en la velocidad y el consumo de combustible. Para mitigar este problema

y asegurar la continuidad y precisión de los datos, se implementó un proceso de interpolación utilizando el lenguaje de programación R. Esta solución permitió estimar los valores perdidos entre muestras y reconstruir una secuencia temporal más uniforme. La Figura 45 ilustra el código empleado para llevar a cabo este procedimiento.

```

1 - ===== INTERPOLACION CANUP =====
2 #PRUEBA()
3 library(zoo)
4 library(stringr)
5
6
7 InterpolacionCup <- function(dirCup){
8
9   datosCup <- read.csv(dirCup)
10
11   columnasFaltantes <- data.frame(Latitud = datosCup$Latitud,
12                                  Longitud = (datosCup$Longitud)/1000000)
13
14
15   convert_Consumo <- gsub("-----", "NA", datosCup$Consumo.Instantaneo.de.Combustible) %>%
16     as.vector() %>% as.numeric()
17
18   convert_Suministro <- gsub("-----", "NA", datosCup$Suministro) %>% as.vector() %>%
19     as.numeric()
20
21   convert_Retorno <- gsub("-----", "NA", datosCup$Retorno) %>% as.vector() %>%
22     as.numeric()
23
24
25
26   convert_Speed <- ifelse(datosCup$Velocidad == "-----", NA,
27                           as.numeric(gsub("km/h", "", datosCup$Velocidad)))
28
29   #Pasar de km/h a m/s
30   convert_Speed <- convert_Speed*(1000/3600) %>% as.vector()
31
32   #pasar de galones/hora a litros/hora
33   convert_Consumo <- convert_Consumo*3.785
34
35   CanUp_Modify <- data.frame(Tiempo = datosCup$Tiempo, Consumo = convert_Consumo,
36                              Suministro = convert_Suministro, Retorno = convert_Retorno,
37                              Velocidad = convert_Speed)
38
39   CU_Interpolado <- CanUp_Modify
40
41 }

```

**Figura 45.** Fragmento del código para la interpolación de los datos recopilados mediante el CANUp

Para llevar a cabo la interpolación de los datos registrados por el CANUp, se utilizaron dos librerías del entorno R: *zoo* y *stringr*. La librería *zoo* fue clave para implementar la interpolación lineal, mientras que *stringr* facilitó el tratamiento y limpieza de cadenas de texto contenidas en el archivo de origen. En primer lugar, se cargó el archivo CSV que contenía los datos recopilados por el CANUp. Posteriormente, se identificaron y gestionaron los valores faltantes representados como “-----”. Estos fueron reemplazados por valores *NA* y convertidos a formato numérico utilizando la función `base::as.numeric()` para las columnas correspondientes a consumo de combustible, flujo de suministro, flujo de retorno y velocidad.

A continuación, se procedió con la conversión de unidades: la velocidad se transformó de km/h a m/s, mientras que los valores de consumo y flujo de combustible se convirtieron de gal/h a L/h, asegurando así la coherencia de las unidades para el posterior análisis técnico. Posteriormente, se aplicó la interpolación lineal mediante la función `zoo::na.approx()` que permitió estimar los valores faltantes (*NA*) basándose en una aproximación lineal entre los puntos conocidos. Este método se fundamentó en la Ecuación 8.

$$y = y_1 + \frac{(x-x_1)*(y_2-y_1)}{x_2-x_1} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

$(x_1, x_2)$  y  $(y_1, y_2)$  son los puntos conocidos adyacentes.

$x$ , es el valor intermedio donde se realiza la interpolación.

$y$ , es el valor interpolado.

Gracias a este proceso, se logró reconstruir un conjunto de datos más continuo y representativo del comportamiento real durante la fase experimental. Finalmente, se aplicó el mismo procedimiento a todos los archivos registrados durante la campaña experimental, guardándolos como archivos CSV una vez completada la interpolación lineal.

### **3.7.1.2. Corrección de Error Sistemático en el Flujo de Combustible**

Durante las pruebas piloto, se detectó un error sistemático persistente entre las mediciones de flujo de combustible obtenidas por los sensores DFM 100ACAN y los valores registrados por la ECU del vehículo. Esta discrepancia dificultaba la comparación directa entre ambas fuentes, afectando la precisión y confiabilidad del análisis de consumo. Para corregir este error y mejorar la consistencia de los datos, se implementó un proceso de optimización utilizando el lenguaje de programación R. Dicho procedimiento se basó en la minimización del error relativo entre las mediciones diferenciales de los sensores y los valores de referencia proporcionados por la ECU. La Figura 46 muestra un fragmento representativo del código empleado para llevar a cabo esta corrección en las lecturas de flujo de combustible.

```

1 library(ggplot2)
2 library(ggplot2)
3 library(ggalt)
4 library(dplyr)
5 library(ggpubr)
6
7 Optimizacion_P0 <- read.csv2("T:/c. RESULTADOS/c. EnsayosUnidos/EnsayosSeparados/a. PruebaA1.csv")
8 Optimizacion_P1 <- read.csv2("T:/c. RESULTADOS/c. EnsayosUnidos/EnsayosSeparados/b. PruebaA2.csv")
9 Optimizacion_P2 <- read.csv2("T:/c. RESULTADOS/c. EnsayosUnidos/EnsayosSeparados/c. PruebaA3.csv")
10
11 PruebasTotales <- rbind(Optimizacion_P0,Optimizacion_P1,Optimizacion_P2)
12
13
14 FurPrincipal <- function(Ensayos){
15
16   Ensayos <- Ensayos %>% mutate(ConsumoDiferencialCalculado = ConsumoSuministroLph_2 - ConsumoRetornoLph_2)
17
18
19   Relativo <- function(real, medido, variacion){
20     #valCalculado <- abs(real - (medido-variacion))
21     valCalculado <- abs((real - (medido-variacion))/real)
22     errorMedio <- mean(valCalculado, na.rm = TRUE)
23     return(errorMedio)}
24
25   OptimizarFuncion_s1 <- optim(par = 0,
26                             fn = Relativo,
27                             real = Ensayos$ConsumoLph_1,
28                             medido = Ensayos$ConsumoDiferencialCalculado)
29   variacion <- OptimizarFuncion_s1$par
30   Ensayos <- Ensayos %>% mutate(ConsumoDifModificado_2 = ConsumoDiferencialCalculado - variacion)
31
32
33   OptimizarFuncion_s2 <- optim(par = 0,
34                             fn = Relativo,
35                             real = Ensayos$ConsumoLph_1,
36                             medido = Ensayos$ConsumoDiferencialLph_3)
37   variacion2 <- OptimizarFuncion_s2$par
38   Ensayos <- Ensayos %>% mutate(ConsumoDifModificado_3 = ConsumoDiferencialLph_3 - variacion2)
39
40   #desface a la derecha
41

```

**Figura 46.** Fragmento del código para corregir el error sistemático en el flujo de combustible

Para corregir el error sistemático identificado en las mediciones de flujo de combustible registradas por los sensores DFM 100ACAN, se aplicó el método de corrección directa por diferencia, utilizando como referencia los valores proporcionados por la ECU del vehículo, considerados como datos reales. Este método se basa en la existencia de un desfase constante entre ambas fuentes de medición, el cual puede corregirse al restar un valor fijo (denominado delta) a las mediciones del sensor. Dicho delta fue determinado mediante un proceso de optimización que minimizó el error relativo medio entre el consumo ajustado y el consumo de referencia, utilizando la Ecuación 9.

$$\text{Error relativo} = \frac{|Valor\ real - (Valor\ medido - variación)|}{Valor\ real} \quad \text{Ec. (9)}$$

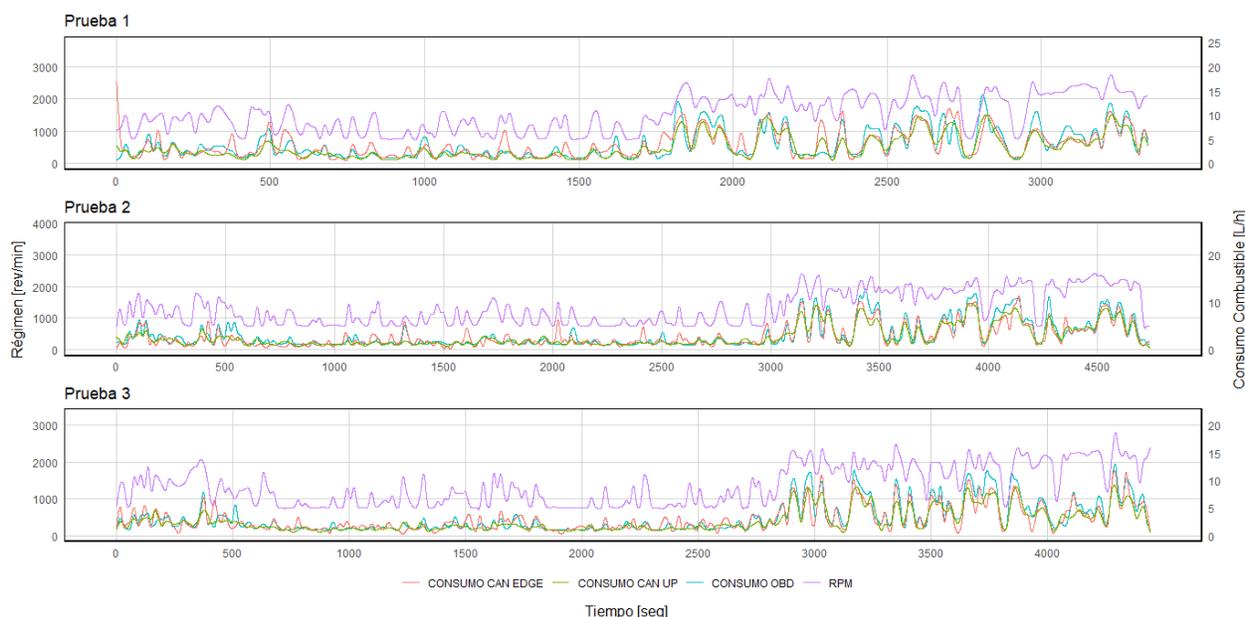
La Tabla 21 presenta los valores de delta obtenidos para cada uno de los sensores durante las tres pruebas realizadas, así como el porcentaje de datos eliminados durante el proceso de depuración y la cantidad de datos finales considerados en el análisis. Como puede observarse, los valores de delta varían ligeramente entre pruebas, lo que refleja las condiciones particulares de cada ensayo. Esta estrategia permitió reducir la discrepancia entre los registros, aumentando la precisión en la estimación del consumo de combustible en condiciones reales de operación.

**Tabla 21.** *Parámetros de corrección y depuración de datos para cada prueba experimental*

Pruebas	Valor Delta por Equipo		Datos Eliminados %	Cantidad de Datos
	CANedge 2	CANUp		Finales
Prueba 1	2,24	2,58	11,29	3353
Prueba 2	2,07	2,28	7,78	4741
Prueba 3	2,35	2,61	10,39	4441

### 3.7.1.3. Análisis de la Sincronización

Previo al inicio del procesamiento de datos, se llevó a cabo un análisis detallado de la sincronización entre los datos registrados por los distintos equipos utilizados en la campaña experimental (ELM327, CANedge2 y CANUp). La Figura 47 ilustra la variación en el régimen del motor (línea morada), registrado mediante el dispositivo ELM327, en comparación con el consumo de combustible reportado por el mismo equipo (línea celeste) y por los sensores de flujo DFM 100ACAN conectados a los dispositivos CANedge2 (línea roja) y CANUp (línea verde).

**Figura 47.** *Variación instantánea de régimen del motor y consumo de combustible*

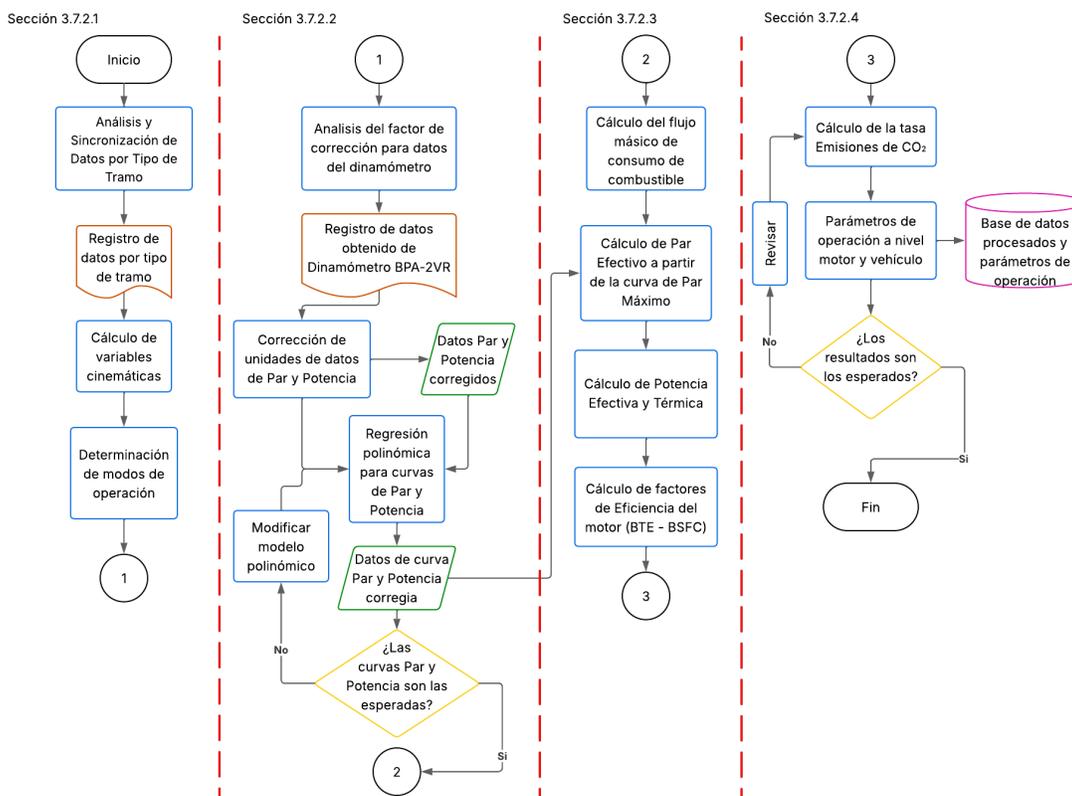
Para interpretar adecuadamente estos gráficos, es fundamental tener en cuenta que, a medida que aumenta la potencia, también se incrementan las revoluciones del motor y la cantidad de combustible inyectado en el múltiple de admisión. En los gráficos correspondientes a cada ensayo, se observa una clara correlación entre las variaciones del régimen del motor (evidenciadas por los

picos y descensos en la línea morada) y el comportamiento del consumo de combustible registrado por cada uno de los equipos (líneas celeste, roja y verde).

Esta coherencia en las tendencias confirma que los datos de las distintas fuentes se encuentran correctamente sincronizados, lo cual es fundamental para reducir los márgenes de error en los análisis posteriores y garantizar estimaciones precisas del consumo y rendimiento del motor.

### 3.7.2. Procesamiento de los Datos Experimentales

Esta etapa adopta un enfoque cuantitativo, partiendo de las bases de datos que fueron depuradas y sincronizadas durante la fase de pre - procesamiento. Como se muestra en la Figura 48, esta etapa se estructuró en una serie de subprocesos fundamentales, organizados en cuatro secciones principales. En la Sección 3.7.2.1, se desarrollaron los cálculos relacionados con la cinemática del vehículo y la identificación de los distintos modos de operación. En la Sección 3.7.2.2 se expone la metodología empleada para la obtención de las curvas de par y potencia máximas. A su vez, en la Sección 3.7.2.3 se describen los parámetros de operación del motor registrados durante los ensayos experimentales. Finalmente, en la Sección 3.7.2.4 se presentan los procedimientos utilizados para calcular el consumo específico de combustible y los factores de emisión.



**Figura 48.** Diagrama de Flujo - Etapa Correspondiente al Procesamiento de Datos

### 3.7.2.1. Cálculos cinemáticos y Modos de Operación

En esta sección se detallan los cálculos cinemáticos derivados de la base de datos previamente sincronizada durante la etapa de preprocesamiento. Las principales variables consideradas incluyen la aceleración instantánea (Ecuación 10), la distancia recorrida (Ecuación 11), la velocidad (Ecuación 12) y la velocidad promedio (Ecuación 13). Si bien el análisis detallado de las variables cinemáticas y la clasificación de los modos de operación es abordado en un estudio complementario (Isizán & Vallejo, 2023), aquí se presentan las ecuaciones más relevantes utilizadas en el procesamiento y caracterización del comportamiento dinámico del vehículo.

$$a = \frac{V_f - V_o}{\Delta t} (m/s^2) \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

$a$  = aceleración instantánea.

$V_f$  = *velocidad final*.

$V_o$  = *velocidad inicial*.

$\Delta t$  = *Variación de tiempo* ( $\Delta t = 1s$ ).

$$d = d_f - d_o (m) \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde:

$d$  = *distancia recorrida instantánea*.

$d_f$  = *distancia final*.

$d_o$  = *distancia inicial*.

$$V = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{\Delta r}}{\Delta t} (m/s) \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde:

$V$  = *velocidad instantánea*.

$\overrightarrow{\Delta r}$  = *posición instantánea del vector posición*.

$\Delta t$  = *variación del tiempo*,  $\Delta t = 1s$ .

$$V_{prom} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{t_i} \quad \text{E c. (13)}$$

Donde:

$V_{prom}$  = *velocidad promedio*.

$d_i$  = *distancia*.

$t_i$  = *tiempo*.

$n = \text{número de datos}$

Los modos de operación permitieron evaluar el rendimiento del vehículo y su eficiencia en el consumo de combustible bajo diferentes condiciones dinámicas. En este estudio se consideraron cuatro modos principales: ralentí (Ecuación 14), crucero (Ecuación 15), aceleración (Ecuación 16) y desaceleración (Ecuación 17). La identificación de cada uno de estos modos se realizó con base en criterios establecidos a partir de las variables cinemáticas calculadas previamente, empleando las ecuaciones que se presentan a continuación.

$$E_R = \sum_{i=1}^n \frac{T_{RI}}{T_{Ti}} * 100\% \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

$E_R = \text{porcentaje de permanencia en ralentí.}$

$T_{RI} = \text{tiempo de permanencia en ralentí.}$

$T_{Ti} = \text{tiempo total de la prueba.}$

$$E_C = \sum_{i=1}^n \frac{T_{CI}}{T_{Ti}} * 100\% \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde:

$E_C = \text{porcentaje de permanencia en crucero.}$

$T_{CI} = \text{tiempo de permanencia en crucero.}$

$T_{Ti} = \text{tiempo total de la prueba.}$

$$E_A = \sum_{i=1}^n \frac{T_{AI}}{T_{Ai}} * 100\% \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde:

$E_A = \text{porcentaje de permanencia en aceleración.}$

$T_{AI} = \text{tiempo de permanencia en aceleración.}$

$T_{Ai} = \text{tiempo total de la prueba.}$

$$E_D = \sum_{i=1}^n \frac{T_{DI}}{T_{Di}} * 100\% \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde:

$E_D = \text{porcentaje de permanencia en desaceleración.}$

$T_{DI} = \text{tiempo de permanencia en desaceleración.}$

$T_{Di} = \text{tiempo total de la prueba.}$

### 3.7.2.2. Obtención de Curvas Par y Potencia

Para la construcción de las curvas características del motor en términos de Par y Potencia máximas, se utilizó el software estadístico RStudio, a partir de los datos obtenidos del dinamómetro. En

primer lugar, se examinó el factor de corrección aplicado a los valores de Par y Potencia, cuyo valor fue de 1.2. Este factor permitió ajustar los datos a condiciones normalizadas, asegurando la comparabilidad de los resultados. Luego de la corrección, se realizó la limpieza de los datos, eliminando los valores faltantes (*NA*) y seleccionando las columnas de régimen del motor (RPM), Par motor y Potencia. Para garantizar un rango completo en los regímenes bajos, se añadió una fila con valores cero. La Figura 49 muestra un fragmento del código desarrollado para obtener las curvas de Par y Potencia.

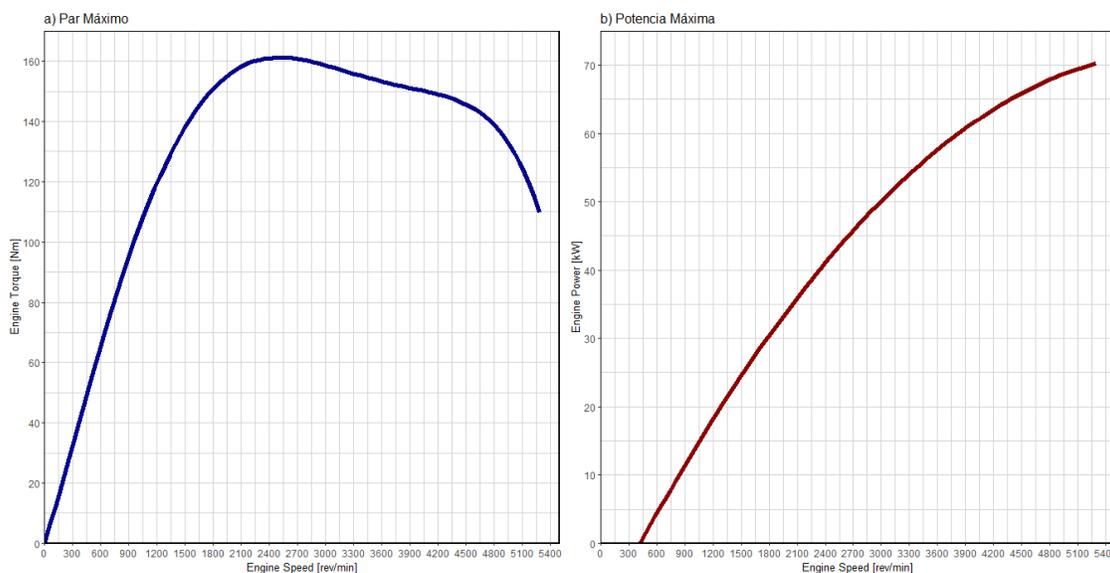
```

1- #===== Obtención de Curvas de Par y Potencia Máximas =====
2 library(patchwork)
3 library(tidyverse)
4 library(ggplot2)
5
6
7 #Datos obtenidos del dinamometro
8 curvaOriginal <- read.csv2("T:/a. ARCHIVOS CRUDO/d. Dinamometro/WINGLE-ROSALES/DINO PRUEBAS/Prueba2_v2.csv")
9 #Selección de columnas
10 datosObtenidos <- curvaOriginal[, 2:4]
11 datosObtenidos$PotenciaCorr <- datosObtenidos$PotenciaMotor*0.77
12 #dataframe2
13 datosObtenidos
14
15 #GRAFICA DE CURVAS NORMALIZADAS
16 graficaPar <- ggplot()+
17   geom_line(aes(x=datosObtenidos$RPM, y=datosObtenidos$ParMotor), color = "red", size = 2)+
18   geom_line(aes(x = datosObtenidos$RPM, y = datosObtenidos$PotenciaCorr * (170 / 60)),
19     color = "darkblue", size = 2) + # Normaliza Potencia
20   ggtitle(element_blank())+
21   xlab("Régimen [rev/min]")+
22   ylab("Par [Nm]")+
23   theme(
24     legend.position = "bottom",
25     legend.text = element_text(size = 12), # Cambia el tamaño del texto
26     legend.title = element_text(size = 12), # Cambia el tamaño del título
27     legend.key.size = unit(0.35, "cm"), # Cambia el tamaño de los iconos de la leyenda
28     panel.background = element_rect(fill = "white"), # Fondo blanco
29     panel.grid.major = element_line(color = "lightgrey"), # Cuadrícula en gris claro
30     panel.grid.minor = element_line(color = "lightgrey"),
31     axis.text.x = element_text(size = 12),
32     axis.text.y = element_text(size = 12),
33     panel.border = element_rect(color = "black", fill = NA, size = 1))+
34   # scale_x_continuous(breaks = seq(1600, 5400, by = 450),
35   #   expand = expansion(mult = c(0, 0))) + # Ajustar espacio en X
36   scale_y_continuous(
37     breaks = seq(from = 20, to = 170, by = 25),
38     limits = c(50, 170),
39     expand = expansion(mult = c(0, 0)))

```

**Figura 49.** Fragmento del código para la obtención de las curvas de par y potencia

Posteriormente, se construyó un modelo de regresión polinómica de quinto grado utilizando la función `base::lm()` para estimar las curvas de Par y Potencia. Se generó una secuencia de revoluciones desde el mínimo hasta el máximo valor de RPM, y mediante la función `base::predict()` se calcularon los valores ajustados para ambos parámetros. Estos resultados se visualizaron gráficamente con la librería `ggplot2`, permitiendo observar de manera clara la evolución del par y la potencia en función del régimen del motor, como se muestra en la Figura 50. Este enfoque permitió obtener una representación precisa y continua del comportamiento del motor bajo distintas condiciones de carga.



**Figura 50.** *Curvas Par y Potencia del vehículo utilizado*

### 3.7.2.3. Estimación de Parámetros de Operación del Motor

En esta etapa, se emplearon los valores registrados del funcionamiento del motor y del flujo instantáneo de combustible para llevar a cabo los cálculos fundamentales del análisis de desempeño. A partir de estos datos, se determinaron los siguientes parámetros: Flujo másico de combustible g/s, Par efectivo Nm Potencia térmica y Potencia efectiva kW, la Eficiencia Térmica al Freno (BTE %) , y el Consumo Específico de Combustible al Freno (BSFC g/kWh). La Figura 51 muestra un fragmento del código desarrollado en RStudio, diseñado para calcular de manera automatizada cada uno de estos indicadores. A continuación, se detallan las ecuaciones utilizadas para obtener cada uno de estos parámetros.

```

1 # Librería tidyverse para tratamiento de datos
2 library(tidyverse)
3 # Cargar archivo .R
4 source("Tr/b. CODIGO/e. PrincipalFiltradoDesfasado/EnsayosFiltradosDesfasadosPlot.R")
5
6 # Definir una función para crear cálculos de parámetros de operación
7 Factores <- function(test) {
8
9   #densidad gasolina
10  densidad <- 720 #kg/m3
11  #poder calorífico
12  poderCalorifico <- 43.4 #[MJ/kg]
13
14  #Calcular parámetros
15  test <- test %>% mutate(Consumo_gps_obd = Consumolph_1*densidad/3600,
16                        Consumo_gps_ce = ConsumoDiferencialSincronizado_2*densidad/3600,
17                        Consumo_gps_cu = ConsumoDiferencialModificado3_sincronizado*densidad/3600,
18
19                        ParEfectivo_Nm = CargaMotor_1*161.1732/100,
20                        PotenciaEfectiva_kW = (ParEfectivo_Nm*RPM_1*(2*pi/60))/1000,
21
22                        Pot_Termica_kW_obd = Consumo_gps_obd*poderCalorifico,
23                        Pot_Termica_kW_ce = Consumo_gps_ce*poderCalorifico,
24                        Pot_Termica_kW_cu = Consumo_gps_cu*poderCalorifico)
25
26  #Química de la combustión (estequiometría)
27  relacion <- 18/8
28  formula <- 44/(12*relacion)
29
30  # Factores
31  test <- test %>% mutate(Bte_obd = PotenciaEfectiva_kW/Pot_Termica_kW_obd,
32                        Bte_ce = PotenciaEfectiva_kW/Pot_Termica_kW_ce,
33                        Bte_cu = PotenciaEfectiva_kW/Pot_Termica_kW_cu,
34
35                        Bte_obd_por = (PotenciaEfectiva_kW/Pot_Termica_kW_obd)*100,
36                        Bte_ce_por = (PotenciaEfectiva_kW/Pot_Termica_kW_ce)*100,
37                        Bte_cu_por = (PotenciaEfectiva_kW/Pot_Termica_kW_cu)*100,
38
39                        CO2_gps_obd = Consumo_gps_obd*formula,
40                        CO2_gps_ce = Consumo_gps_ce*formula,
41                        CO2_gps_cu = Consumo_gps_cu*formula)
42
43

```

**Figura 51.** Fragmento del código para la estimación de los parámetros de operación del motor. Para el cálculo del Flujo másico de combustible expresado en g/s, se partió del flujo diferencial de combustible medido en L/h. Este flujo diferencial se obtuvo como la diferencia entre el flujo volumétrico de entrada y el flujo de retorno del combustible, registrado por los sensores DFM 100ACAN. A fin de convertir este valor a unidades de masa por unidad de tiempo, se aplicó la Ecuación 19, en la cual se incorporó la densidad del combustible utilizado durante la campaña experimental, correspondiente a gasolina Extra, con un valor de 720 Kg/m<sup>3</sup>.

$$\dot{m}_{combustible} = \frac{\text{Flujo diferencial de combustible} * \rho_{Gasolina Extra}}{3600} \text{ (g/s)} \quad \text{Ec. (19)}$$

El Par efectivo del motor se calculó a partir de los valores porcentuales de la carga del motor (*Engine Load*) registrados por el dispositivo ELM327, en combinación con el par máximo obtenido a partir de las curvas características generadas durante los ensayos con el dinamómetro BPA-2VR. Para este cálculo, se aplicó la Ecuación 20. Es importante destacar que tanto el par efectivo como el par máximo se expresan en Nm.

$$T_e = T_{max} * \% \text{ Carga del motor (Nm)} \quad \text{Ec. (20)}$$

La Potencia térmica del motor se calculó aplicando la Ecuación 21, en la cual se utilizó la masa de combustible consumida por segundo ( $\dot{m}_{combustible}$ ), expresada en g/s y el poder calorífico del combustible utilizado durante la campaña experimental (gasolina Extra), cuyo valor corresponde a 43,4 MJ/kg. Por otro lado, la potencia efectiva se obtuvo mediante la Ecuación 22, en función

del par efectivo  $T_e$  y del régimen de giro del motor (RPM). Ambas Potencias (térmica y efectiva) se expresaron en kilovatios kW.

$$P_t = m_{combustible} * Cp * 10^3 \text{ (kW)} \quad \text{Ec. (21)}$$

$$P_e = rpm * T_e * \frac{2\pi}{60} * \frac{1}{1000} \text{ (kW)} \quad \text{Ec. (22)}$$

La Eficiencia Térmica al Freno BTE se calculó relacionando la potencia efectiva con la potencia térmica mediante la Ecuación 23. A sí mismo, el Consumo Especifico al Freno BSFC se calculó relacionando el consumo instantáneo de combustible con la potencia efectiva mediante la ecuación 24. Cabe mencionar que la eficiencia térmica al freno se expresa en valores porcentuales mientras que el consumo específico al freno se expresa en g/kWh.

$$BTE = \frac{P_e}{P_t} \quad \text{Ec. (23)}$$

$$BSFC = \frac{\text{Consumo instantaneo de combustible} * 3600}{P_e} \text{ (g/kWh)} \quad \text{Ec. (24)}$$

#### 3.7.2.4. Cálculo de Factores de Emisión y Consumo

El cálculo de la tasa de emisiones de CO<sub>2</sub> del vehículo, se realizó mediante la ecuación 25. Cabe mencionar que la expresión H/C es la relación Hidrogeno-Carbono del combustible que se utilizó durante la campaña experimental (Extra) cuya formula es C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>. Por ende, el valor de esta relación corresponde a 2.25. De esta manera se obtuvo la cantidad de CO<sub>2</sub> producido por cada unidad másica de combustible quemada.

$$\frac{\text{kg de CO}_2}{\text{kg de Combustible}} = \frac{44}{12 + \frac{H}{C}} \quad \text{Ec. (25)}$$

Para obtener el factor de emisión de CO<sub>2</sub>, se relacionó las emisiones totales de CO<sub>2</sub>, con la distancia total recorrida durante la ruta tal y como se aprecia en la Ecuación 26.

$$FE_{vehículo} = \frac{\text{Masa total de CO}_2}{\text{Distancia total recorrida}} \text{ (g/km)} \quad \text{Ec. (26)}$$

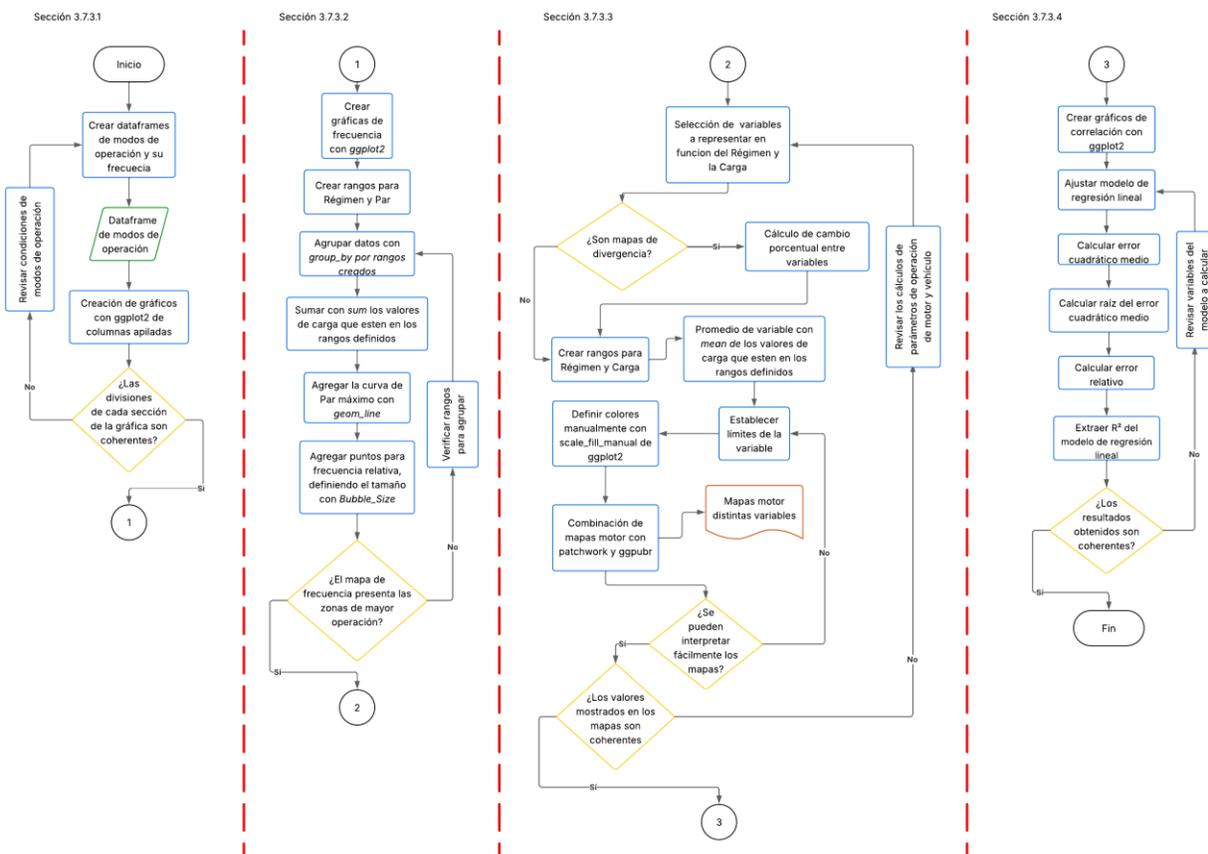
Para finalizar, se calculó el consumo total de combustible por kilómetro recorrido utilizando la ecuación 27, expresado en g/km.

$$\text{Consumo}_{km} = \frac{\text{Masa total de combustible consumido}}{\text{Distancia total recorrida}} \text{ (g/km)} \quad \text{Ec. (27)}$$

#### 3.7.3. Post – procesamiento de los Datos Experimentales

Esta etapa corresponde a la fase final del procesamiento de datos, en la cual se analizaron los resultados obtenidos previamente mediante una serie de representaciones gráficas. Estas visualizaciones abarcan desde gráficos estadísticos básicos hasta mapas de motor. Tal como se

presenta en la Figura 52, esta fase se estructuró en diversos subprocesos, distribuidos en cuatro secciones principales. La Sección 3.7.3.1 describe el procedimiento utilizado para generar los gráficos de los modos de operación. La Sección 3.7.3.2 expone la metodología aplicada para construir los gráficos de frecuencia de operación del motor. La Sección 3.7.3.3 se detalla el proceso seguido para la elaboración de los mapas de motor de distintas variables. Finalmente, la Sección 3.7.3.4 presenta el desarrollo de los gráficos de correlación, los cuales permiten identificar relaciones clave entre diferentes parámetros operativos del motor.



**Figura 52.** Diagrama de Flujo - Etapa Correspondiente al Post - procesamiento de Datos

### 3.7.3.1. Gráficos de Modos de Operación

Los gráficos de los modos de operación se generaron a partir del análisis de variables cinemáticas y la clasificación de los distintos modos de operación. Utilizando el software RStudio, se procesó una base de datos que incluía registros de velocidad, a partir de los cuales se calculó la aceleración instantánea. Posteriormente, se determinó la duración total de cada prueba (en minutos), y se clasificaron los modos de operación en ralentí, aceleración, desaceleración y crucero, de acuerdo con las condiciones establecidas para velocidad y aceleración total, se calculó el recorrido total en

kilómetros, así como el tiempo absoluto y relativo (en porcentaje) dedicado a cada modo de operación. Con estos datos, se construyó un nuevo dataframe que agrupa todas las variables derivadas, en la Figura 53 se presenta un fragmento del código elaborado para desarrollar los gráficos de los modos de operación.

```

1 library(dplyr)
2 library(tidyverse)
3 library(stringr)
4 library(lubridate)
5 library(ggplot2)
6 library(patchwork)
7 library(ggpubr)
8 source("T:/b. CODIGO/d. UninDataFrame_ClasificarModos/ArchivoGeneral.R")
9
10
11 #===== FUNCION PARA CICLOS DE OPERACION =====
12
13 operacion <- funcion(prueba) {
14   # Calcular aceleración
15   prueba <- mutate(prueba, Aceleracion_Mps2 = round(VelocidadMps_2) - lag(round(VelocidadMps_2), n=1, default = first(VelocidadMps_2)))
16   # Duración de la prueba
17   IntervaloCalculadoPrueba <- interval(prueba$PK_Fecha[1], tail(prueba$PK_Fecha, 1))
18   DuracionPruebaMin <- IntervaloCalculadoPrueba / dminutes(1)
19   #Condiciones para modos de operación
20   prueba <- prueba %>%
21     mutate(Modo_operacion = case_when(
22       VelocidadMps_1 == 0 ~ "Ralenti",
23       AceleracionMps2 >= 0.1 & VelocidadMps_1 >= 0 ~ "Aceleración",
24       AceleracionMps2 < 0 & VelocidadMps_1 >= 0 ~ "Desaceleración",
25       AceleracionMps2 >= -0.1 & AceleracionMps2 <= 0.1 ~ "Crucero"))
26   # Distancia total
27   RecorridoKm <- tail(prueba$DistanciaTotal_2, 1) / 1000
28   # Tiempo en ralenti
29   Ralenti <- nrow(filter(prueba, VelocidadMps_1 == 0))
30   # Tiempo en aceleración
31   TiempoAceleracion <- nrow(filter(prueba, AceleracionMps2 >= 0.1 & VelocidadMps_1 >= 0))
32   # Tiempo en desaceleración
33   TiempoDesaceleracion <- nrow(filter(prueba, AceleracionMps2 < 0 & VelocidadMps_1 >= 0))
34   # Tiempo en crucero
35   tiempoCrucero <- nrow(filter(prueba, AceleracionMps2 >= -0.1 & AceleracionMps2 <= 0.1))
36   # Tiempo total de la prueba
37   TiempoTotal <- nrow(prueba)
38   # Calcular porcentajes
39   PromedioRalenti <- (Ralenti / TiempoTotal) * 100
40   Prom_Aceleracion <- (TiempoAceleracion / TiempoTotal) * 100
41   Prom_Desaceleracion <- (TiempoDesaceleracion / TiempoTotal) * 100
42   Prom_Crucero <- (tiempoCrucero / TiempoTotal) * 100

```

**Figura 53.** Fragmento del código para la creación de los gráficos de los modos de operación

A partir de la función diseñada para calcular las variables cinemáticas y clasificar los modos de operación, se desarrolló una función adicional para generar gráficos de barras apiladas. Esta nueva función procesó tres conjuntos de datos correspondientes a pruebas en diferentes subtramos: urbano, suburbano y autopista. Para cada tramo, se calculó el promedio del tiempo relativo dedicado a cada modo de operación, y se combinaron los resultados en un único dataframe con etiquetas diferenciadas según el tipo de prueba. Finalmente, mediante la librería *ggplot2*, se generó un gráfico que muestra la distribución porcentual del tiempo destinado a cada modo de operación según el entorno de conducción.

### 3.7.3.2. Gráficos de Frecuencia de Operación del Motor

Para la obtención de los gráficos de frecuencia de operación del motor se emplearon variables clave como el régimen de giro, el Par efectivo y la carga, las cuales en un principio se integraron en un único dataframe. Posteriormente, se definieron rangos para cada una de estas variables con el fin de agrupar los datos por zonas de operación. Se calculó la carga promedio en cada grupo y su respectivo porcentaje con respecto a la carga total registrada durante la prueba. A continuación,

se filtraron los datos para excluir porcentajes irrelevantes y se escaló el tamaño de las burbujas proporcionalmente a la frecuencia relativa de operación.

Finalmente, se generó el gráfico con `ggplot2()`, utilizando la función `ggplot2::geom_line()` para representar la curva de Par máximo en color rojo y `ggplot2::geom_point()` para mostrar los puntos con su respectiva frecuencia relativa de operación en forma de burbujas. Las etiquetas con los porcentajes correspondientes se añadieron mediante la función `ggplot2::geom_text()`, permitiendo una interpretación clara de las zonas de mayor frecuencia de operación. La Figura 54 presenta un fragmento del código desarrollado para la creación de los mapas de frecuencia de operación del motor.

```

1 # Cargar las librerías necesarias
2 library(ggplot2)
3 library(dplyr)
4 library(patchwork)
5
6 source("T:/b. COOIGO/g. Dinametro_CurvasCaracteristicas/CurvasCaracteristicasDinametro.R")
7 source("T:/b. COOIGO/h. FactoresEmission/CalculosFactoresEmission3Equipos.R")
8 source("T:/b. COOIGO/h. FactoresEmission/version_2_FactoresE.R")
9
10 #===== grafica puntual =====
11
12 #Crear el gráfico
13 grafica_puntual <- ggplot() +
14 # Añadir la línea del par máximo
15 geom_line(data = NuevosDatos, aes(x = regimen, y = parAjustado, color = "Curva de par máximo"), size = 1.5) +
16 # Añadir los puntos del par efectivo
17 geom_point(data = archivoUnido, aes(x = RPM_1, y = ParEfectivo_Nm, color = "Valores instantáneos de operación"), shape = 8, size = 2) +
18 # Etiquetas y títulos
19 #geom_density_2d(data = archivoUnido, aes(x = RPM_1, y = ParEfectivo_Nm), color = "white", size = 1.5) +
20 # Etiquetas y títulos
21 labs(title = "a)",
22       y = "Par Efectivo [Nm]",
23       x = "Régimen [rev/min]") +
24 # Límites de los ejes
25 # xlim(min(x_limits), max(x_limits)) +
26 # ylim(min(y_limits), max(y_limits)) +
27
28 # Ajustar límites y marcas en el eje x
29 scale_x_continuous(limits = c(650, 3000),
30                   breaks = seq(650, 3000, by = 150),
31                   expand = expansion(c(0,0))) +
32 # Ajustar límites y marcas en el eje y (ajusta según tus datos)
33 scale_y_continuous(limits = c(0, 170),
34                   breaks = seq(0, 170, by = 10),
35                   expand = expansion(c(0,0))) +
36 # Personalizar colores para la leyenda
37 scale_color_manual(values = c("Curva de par máximo" = "red", "Valores instantáneos de operación" = "black")) +
38 # Tema minimalista
39 theme_minimal()

```

**Figura 54.** Fragmento del código para la creación de los gráficos de frecuencia de operación del motor

### 3.7.3.3. Mapas de Motor

La Figura 55 muestra un fragmento del código empleado para la generación de mapas motor. Para esto, se creó una función la cual estaba diseñada para representar gráficamente la relación entre el régimen de giro y la carga del motor, en función de una variable de salida seleccionada. Esta función permitió crear mapas de calor a partir de los datos experimentales, facilitando el análisis del comportamiento del motor bajo distintas condiciones de operación.

```

1 #Librerías utilizadas para mapas motor
2 library(ggplot2)
3 library(dplyr)
4 library(stringr)
5 library(scales)
6 #Importar archivo de cálculo de factores de emisión
7 source("T:/b. CODIGO/h. FactoresEmision/version_3_factores_co2pkm_modificado.R")
8
9 #Crear función para Mapas motor
10 Mapa <- function(Factores, VariableZ, nombrePlot, inicio, fin, paso, titulo) {
11
12   #Seleccionar variables
13   df_filt <- Factores %>% filter(.data[[VariableZ]] != Inf)
14   df_filt <- Factores %>% select(RPM_1, CargaMotor_1, all_of(VariableZ))
15   df_filt <- Factores %>% rename(consumo = .data[[VariableZ]])
16   #Crear rangos para régimen y carga
17   rango_regimen <- cut(df_filt$RPM_1, breaks = seq(from = min(df_filt$RPM_1),
18   to = max(df_filt$RPM_1),
19   by = 88), right = FALSE)
20
21   rango_carga <- cut(df_filt$CargaMotor_1, breaks = seq(from = min(df_filt$CargaMotor_1),
22   to = max(df_filt$CargaMotor_1),
23   by = 3.5), right = FALSE)
24
25   #Crear un nuevo dataframe agrupando por los rangos
26   bines <- df_filt %>% group_by(Rango_Regimen = rango_regimen, Rango_Carga = rango_carga)
27   #Calcular el promedio de consumo para cada grupo y eliminar grupos vacíos
28   resultado <- bines %>% summarise(Promedio_Consumo = mean(consumo, na.rm = TRUE), .groups = 'drop')
29   #Calcular el punto medio de cada rango de régimen y carga
30   resultado$Punto_Medio_Regimen <- (as.numeric(sub("\\[(.*)]", "%", resultado$Rango_Regimen)) +
31   as.numeric(sub("\\s*(.*)\\]", "%", resultado$Rango_Regimen))) / 2
32
33   resultado$Punto_Medio_Carga <- (as.numeric(sub("\\[(.*)]", "%", resultado$Rango_Carga)) +
34   as.numeric(sub("\\s*(.*)\\]", "%", resultado$Rango_Carga))) / 2
35
36   #Crear límites de intervalos para la variable de consumo
37   intervalos <- c(seq(inicio, fin, paso), Inf)
38   #Crear etiquetas personalizadas
39   etiquetas <- c(paste0("%", seq(inicio, fin, paso)[-length(seq(inicio, fin, paso))], "- ", seq(inicio, fin, paso)[-1], "%"),
   paste0("%", fin))

```

**Figura 55.** Fragmento del código para la creación de los mapas de motor

En primer lugar, se filtraron los datos mediante la función `dplyr::filter` para excluir valores infinitos, y se seleccionaron únicamente las variables relevantes utilizando. Posteriormente, se crearon rangos discretos para el régimen de giro y la carga del motor utilizando la función `base::cut()`, lo cual permitió agrupar los datos por zonas de operación. Una vez definidos los grupos, se aplicó la función `dplyr::group_by()` para estructurar los datos según los rangos creados, y luego se calculó el promedio de la variable de salida dentro de cada grupo. A partir de estos promedios, se calcularon los puntos medios de los rangos, lo que permite representar cada celda del mapa en coordenadas continuas.

Adicionalmente, se definieron intervalos personalizados para la variable de salida utilizando `base::quantile()` y se asignaron etiquetas correspondientes a cada nivel. Estos niveles son luego representados visualmente mediante la función `ggplot2::geom_raster()`, la cual genera un mapa de calor que muestra el promedio de la variable de salida mediante un gradiente de color. Para mejorar la interpretación del gráfico, se empleó `ggplot2::geom_contour()`. Finalmente, se utilizó `ggplot2::scale_fill_manual()` para asignar una paleta de colores específica (`#FFDE08`, `#72B84E`, `#009176`, `#00688D`, `#3F4286`, `#401C48`, `#1C0821`), asegurando una diferenciación clara entre cada categoría.

### 3.7.3.4. Gráficos de Correlación

La Figura 56 muestra el procedimiento realizado para generar gráficos de correlación que comparan los resultados obtenidos por los tres registradores utilizados: ELM327, CANedge2 y

CANUp. Para ello, se desarrolló una función específica capaz de calcular y representar la correlación entre dos variables contenidas en un dataframe. El proceso inició con la extracción de las columnas relevantes y la creación de un nuevo dataframe que contiene únicamente las variables de interés.

```

1 # Cargar librerías
2 library(ggplot2)
3 library(Metrics)
4 library(patchwork)
5 library(scales)
6 library(cowplot)
7 # Cargar archivos .R
8 source("../b. CODIGO/h. FactoresEmision/version_2_FactoresE.R")
9 source("../b. CODIGO/h. FactoresEmision/version_3_factores_co2pkm_modificado.R")
10
11 #Crear función principal para calcular la correlación de diferentes variables
12 correlacion <- function(EnsX,var1,var2, titleX, titleY, titulo, in_break, out_break) {
13   #Seleccionar Variables
14   Consumo1 <- EnsX[[var1]]
15   Consumo2 <- EnsX[[var2]]
16   #Crear nuevo dF
17   dispersion_consumo <- data.frame(Consumo1,Consumo2)
18   # Ajustar el modelo
19   modelo <- lm(Consumo2 ~ Consumo1, data = dispersion_consumo)
20   # Obtener las predicciones
21   predicciones <- fitted.values(modelo)
22   # Calcular MSE
23   mse <- mean((dispersion_consumo$Consumo1 - predicciones)^2)
24   # Calcular RMSE
25   rmse <- sqrt(mse)
26   #mse con función de R
27   mse_valor <- mse(dispersion_consumo$Consumo1, predicciones)
28   #error relativo
29   Form_Relativo <- (Consumo1 - Consumo2)/Consumo1
30   error_relativ <- abs(mean(Form_Relativo))*100
31   # Mostrar resultados
32   cat("MSE:", mse, "\n")
33   cat("MSE():", mse_valor, "\n")
34   cat("RMSE:", rmse, "\n")
35   # Coeficiente de determinación R^2
36   r_squared <- summary(modelo)$r.squared
37   cat("R^2:", r_squared, "\n")
38   cat("ErrorRelativo: ",error_relativ, "\n")
39   # Crear el gráfico con ggplot2

```

**Figura 56.** Fragmento del código para la creación de los gráficos de correlación

A continuación, se ajustó un modelo lineal mediante la función `base::lm()`, el cual predice la variable dependiente en función de la variable independiente. Para evaluar la precisión del modelo, se calcularon métricas de error como el Error Cuadrático Medio (*MSE*), la Raíz del Error Cuadrático Medio (*RMSE*) y el coeficiente de determinación  $R^2$ , este último utilizado para valorar la calidad del ajuste. Finalmente, se generó un gráfico de dispersión utilizando *ggplot2*, en el que se visualizó los puntos de datos y la línea de regresión ajustada.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos durante la investigación, que permiten una comparación e interpretación de los datos de consumo de combustible registrados por el OBD y el Flujómetro en el vehículo de empleado. El estudio inició con un análisis detallado de la cinemática del vehículo evaluado y sus modos de operación, que abarca tanto la cinemática de la ruta como los distintos modos de operación evaluados. A continuación, se evalúan los parámetros operativos del motor, en donde se analiza la frecuencia de operación en los distintos modos de operación en términos de Régimen (rev/min) y Par (Nm), con el objetivo de evaluar la eficiencia y comportamiento en diversas condiciones.

A continuación, se generan los mapas de motor para cada equipo de medición empleado. Estos mapas integran datos fundamentales como el consumo instantáneo de combustible, las tasas de emisiones contaminantes y los indicadores de eficiencia energética (BTE y BSFC), así como la emisión de CO<sub>2</sub> por unidad de energía producida. Adicionalmente, se analizan los factores de emisión y consumo obtenidos durante las pruebas, lo que permite contextualizar el rendimiento del motor en escenarios operativos reales. Para profundizar en el análisis, se establecieron correlaciones entre las distintas etapas de recolección de datos, lo que facilita la identificación de discrepancias en los mapas generados. Finalmente, se evalúa la tasa de consumo de combustible y los factores de emisiones del vehículo.

#### **4.1. Cinemática y Modos de Operación del Vehículo**

En esta sección, se analiza la cinemática del vehículo en la ruta de pruebas propuesta, con énfasis en la duración de cada modo de operación del vehículo, incluyendo subtramos urbanos, suburbanos y de autopista. Asimismo, se evalúan variables claves relacionadas con la cinemática del vehículo en la ruta donde se compararán diferentes aspectos seleccionados. Por último, se analiza los modos de operación en las distintas pruebas realizadas.

##### **4.1.1. Cinemática del Vehículo**

###### **4.1.1.1. Comparación de la ruta**

La Tabla 22. presenta un resumen de las características cinemáticas de tres pruebas realizadas en distintas zonas horarias en tres subtramos: urbano, suburbano y de autopista. Se incluyen datos sobre la duración min, la distancia km, las velocidades máxima y promedio km/h y la aceleración positiva promedio m/s<sup>2</sup>.

Al comparar las velocidades promedio en cada tramo, se observa que en el tramo urbano se tienen los valores más bajos entre 11,55 y 15,91 km/h, seguido del suburbano con 37,32 y 42,21 km/h y, por último, la autopista, que muestra las velocidades más altas de hasta 49,11 y 51,79 km/h. Esto se debe a que, en tramos urbanos, las frecuentes paradas por semáforos y atascos disminuyen la velocidad. En el suburbano, la circulación es más fluida, aunque todavía se ve afectada por semáforos y cruces. Por último, en la autopista, las interrupciones son mínimas, lo que permite mantener altas velocidades (Yang et al., 2020).

Al contrastar estos resultados con otro estudio (D. E. Arias, 2025), se evidencian características similares en cuanto a las velocidades promedio, lo que sugiere patrones de circulación parecidos en los diferentes lugares analizados. Tanto en el tramo urbano como en el suburbano y en la autopista, las condiciones de tráfico y la infraestructura parecen afectar las velocidades de manera similar. Esto indica que, a pesar de algunas diferencias en cada lugar, los patrones de cómo se mueve el tráfico son comparables en términos generales.

**Tabla 22.** Características cinemáticas de la ruta

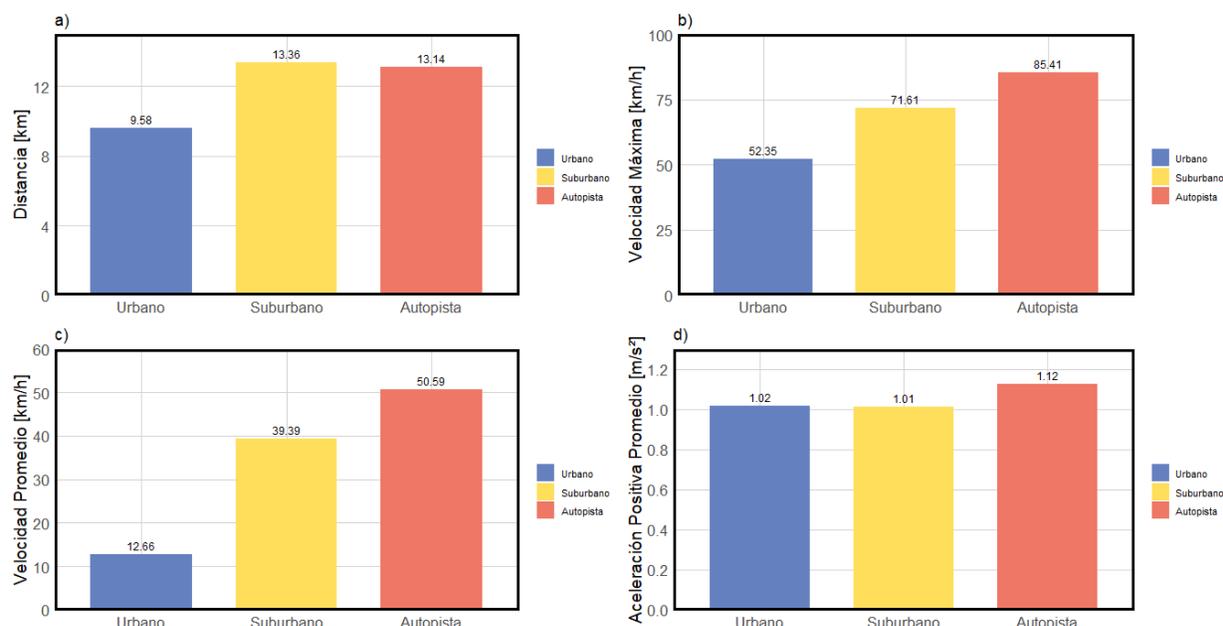
Subtramo	Urbano			Suburbano			Autopista			Total		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ensayo	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Duración (min)	27,07	48,85	47,62	20,98	21,98	18,98	14,9	14,8	15,95	62,98	85,67	82,58
Distancia (km)	7,27	9,48	9,58	13,69	13,69	13,36	12,73	12,84	13,14	33,69	36,01	36,08
Velocidad máxima (km/h)	48,99	52,35	51,24	72,61	68,87	70,96	85,41	83,13	80,05	85,41	83,13	80,05
Velocidad promedio (km/h)	15,91	11,55	11,96	39,02	37,32	42,21	50,98	51,79	49,11	31,92	25,12	26,1
Aceleración Positiva Promedio (m/s <sup>2</sup> )	1,017	1,019	1,017	1,019	1	1,010	1,026	1,034	1,031	1,018	1,010	1,12

#### 4.1.1.2. Comparación de Cinemática

En la Figura 57, se presentan los valores cinemáticos de la ruta, que incluyen la distancia recorrida, la velocidad máxima, la velocidad promedio y la aceleración positiva promedio en los tres subtramos: urbano, suburbano y de autopista. Esta Figura resume los resultados de toda la campaña experimental, permitiendo una comparación clara de la cinemática del vehículo a través de diagramas de barras.

En cuanto a la distancia recorrida, Figura 57. a), el tramo suburbano presenta la mayor distancia con 13,36 km, seguido por el urbano con 13,14 km y el de autopista con 9,58 km. En términos de velocidad, se logra observar como en la Figura 57. b), la autopista registra tanto la velocidad máxima más alta, de 85,41 km/h, como la velocidad promedio, Figura 57. c), más elevada, con 50,59 km/h. Esto se debe a que, en las zonas urbanas, las velocidades son mucho menores por la congestión y obstáculos como semáforos y peatones, mientras que la autopista permite un flujo de tráfico más constante (Garrido, 1999).

Respecto a la aceleración promedio, representada en la Figura 57. c), se observa como la autopista muestra el valor más alto de 1,12 m/s<sup>2</sup>, mientras que los tramos urbano y suburbano tuvieron valores similares de 1,02 m/s<sup>2</sup> y 1,01 m/s<sup>2</sup>, respectivamente. Esto sugiere que la aceleración es un poco más baja en las áreas urbanas y suburbanas debido a las paradas frecuentes, a diferencia de la autopista, que facilita un aumento más constante de la velocidad (Garrido, 1999).

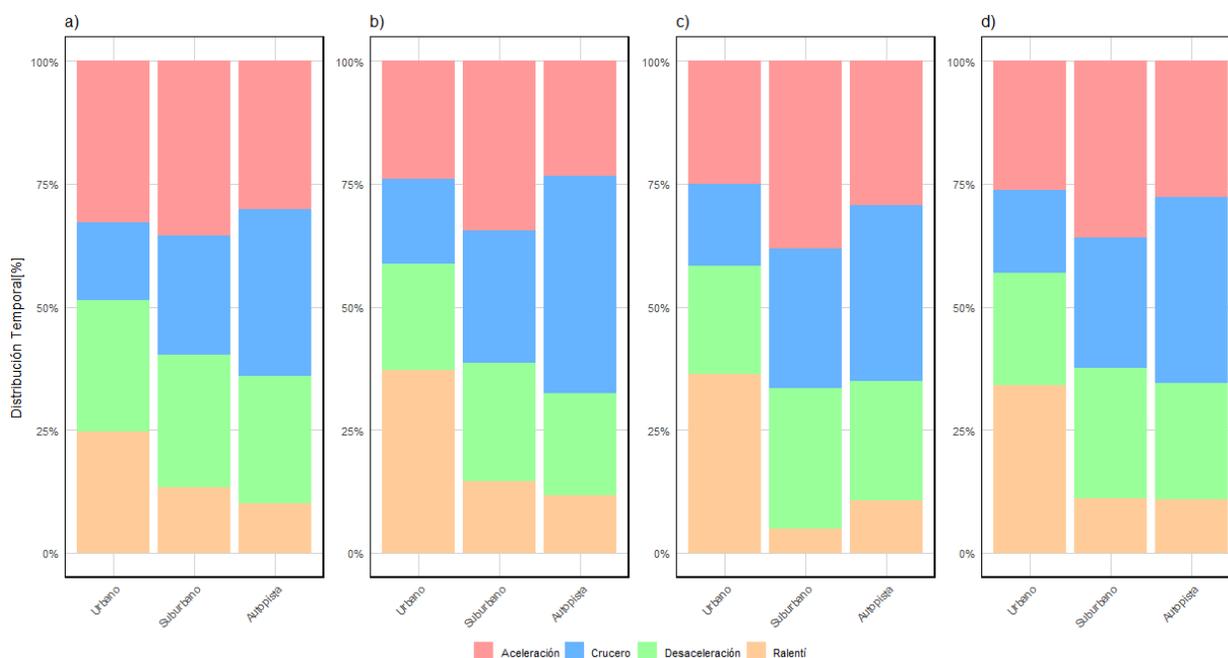


**Figura 57.** Cinemática de la ruta: a) Distancia, b) Velocidad máxima, c) Velocidad promedio, d) Aceleración positiva promedio

#### 4.1.2. Modos de Operación

La Figura 58 muestra la distribución porcentual de los distintos modos de operación del vehículo: aceleración, crucero, desaceleración y ralentí. Para los diferentes subtramos urbano, suburbano y autopista. Esta distribución refleja la frecuencia relativa de cada modo de operación dentro de dichos contextos. Esta Figura permite identificar fácilmente las diferencias en el comportamiento

operativo del vehículo según el entorno de conducción. La Prueba 1, muestra los valores más bajos de operación en modo crucero en el tramo urbano, lo que sugiere una conducción más interrumpida. En la Prueba 2 se observan altos porcentajes de ralentí en el tramo urbano y una mayor proporción de crucero en el tramo de autopista, indicando una conducción más eficiente en este último entorno. Por su parte, la Prueba 3 se caracteriza por una mayor proporción de tiempo en modo aceleración en tramos suburbanos. Estas variaciones pueden atribuirse a factores como la densidad del tráfico, los hábitos de conducción y las características propias de cada ruta. El tramo urbano, con frecuentes interrupciones y cambios de velocidad, mostró la mayor variabilidad operativa, mientras que las autopistas favorecen condiciones más estables y eficientes gracias a velocidades constantes.



**Figura 58.** Modos de operación: a) Prueba 1, b) Prueba 2, c) Prueba 3, d) Resumen total

La Tabla 23 muestra un resumen del comportamiento del vehículo en diferentes modos de operación: aceleración, desaceleración, ralentí y crucero, evaluados en tres subtramos: urbano (Urb), suburbano (Sub) y autopista (Aut). En el tramo urbano, los porcentajes promedio de permanencia fueron 32,75% en ralentí, 27,21% en aceleración, 23,37% en desaceleración y 16,66% en crucero. En el suburbano, los promedios fueron 10,9% en ralentí, 36,06% en aceleración, 26,53% en desaceleración y 26,5% en crucero. Para el tramo de autopista, se registraron 10,8% en ralentí, 27,6% en aceleración, 23,68% en desaceleración y 37,91% en crucero. Al comparar, se observa que los porcentajes de permanencia en ralentí son menores en

los tramos suburbano y de autopista, mientras que los tiempos de permanencia en crucero son significativamente más altos en la autopista.

Al comparar los datos obtenidos con otro estudio que analiza las variables cinemáticas en tramo urbano en taxis (Isizán & Vallejo, 2023), se evidencia que el ralenti representa el 36,09% del tiempo de operación estos vehículos, lo que indica una alta dependencia de este modo, probablemente debido a las frecuentes paradas en el tráfico urbano. En contraste, la camioneta estudiada presenta un 24,62% en ralenti, lo que sugiere un uso más eficiente del motor en comparación con los taxis. En cuanto a la aceleración, los taxis muestran un 30,39%, ligeramente inferior al 32,74% de la camioneta. La desaceleración sigue un patrón similar, con un 25,18% para los taxis y un 26,71% para la camioneta. Finalmente, en el modo de crucero se observa una diferencia notable, los taxis apenas alcanzan un 8,34%, mientras que la camioneta logra un 15,94%. Esto sugiere que la camioneta opera en trayectos menos interrumpidos.

**Tabla 23.** *Resumen del comportamiento del vehículo*

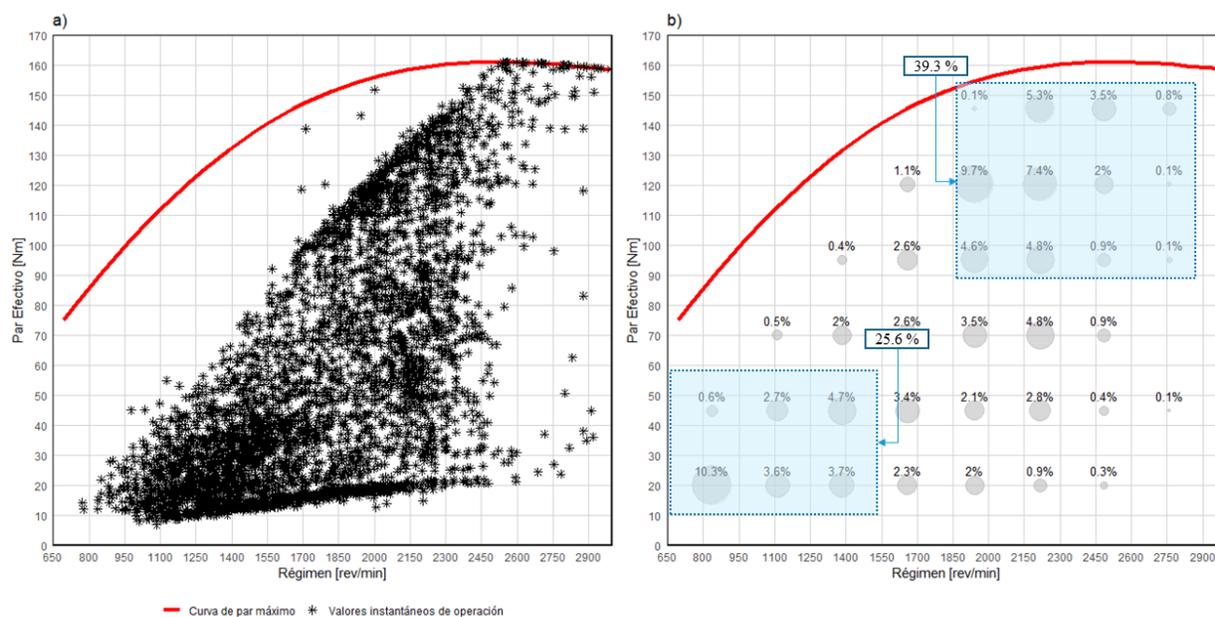
Pruebas	P1			P2			P3			Total		
	Urb	Sub	Aut									
Aceleración	32,74	35,48	30,17	23,98	34,47	23,4	24,91	38,25	29,23	26,26	35,97	27,72
Desaceleración	26,71	26,9	25,92	21,52	24,09	20,92	21,9	28,6	24,22	22,81	26,48	23,71
Ralenti	24,62	13,33	10,06	37,24	14,55	11,59	36,39	4,82	10,75	34,15	11,16	10,8
Crucero	15,94	24,29	33,85	17,26	26,89	44,09	16,79	28,33	35,8	16,79	26,4	37,78

#### 4.2. Parámetros de Operación del Motor: Par y Régimen

La Figura 59 muestra los patrones típicos de operación del motor en función del par efectivo Nm y el régimen de giro rev/min. Esta representación permite visualizar no solo los puntos de operación alcanzados durante la ruta establecida en la campaña experimental, sino también identificar las zonas del mapa donde el motor opera con mayor frecuencia. En la Figura 59. a), la línea roja representa la curva de par máximo del motor, mientras que los asteriscos indican los valores instantáneos de par registrados a lo largo de las pruebas. Además, se observa claramente que una parte significativa del área de operación del motor, definida por su curva de par máximo, no fue utilizada, lo que evidencia que el motor opera mayormente en condiciones alejadas de su capacidad plena. Por su parte, la Figura 59. b) incorpora también la curva de par máximo, pero muestra la frecuencia relativa de los puntos de operación, expresada en porcentajes y representada mediante círculos grises. Ambas figuras muestran resultados similares, las regiones con mayor

concentración de asteriscos coinciden con aquellas de mayor frecuencia relativa, lo que permite validar visualmente los rangos operativos predominantes y su distribución.

La Figura 59. a) revela que el motor opera principalmente en condiciones de bajo régimen y bajo par, particularmente entre los rangos de 800 a 1550 rev/min y 10 a 40 Nm. Sin embargo, también se identifican numerosos puntos de operación en zonas de alto régimen y elevado par, en el rango aproximado de 950 a 1550 rev/min y 100 a 150 Nm. La Figura 59.b) cuantifica estos patrones de operación y destaca que el motor trabaja el 25,6% del tiempo en zonas de bajo régimen, aproximadamente de 650 a 1550 rev/min y bajo Par, aproximadamente de 10 a 60 Nm. Además, el 39,3% del tiempo se encuentra en zonas de alto régimen, aproximadamente de 1850 a 2900 rev/min y elevado par, aproximadamente de 90 a 150 Nm. Esta información resulta clave para interpretar el comportamiento del motor en condiciones reales, permitiendo relacionar estos patrones con aspectos como el consumo de combustible.



**Figura 59.** Frecuencia de operación del motor: a) Comparación entre los puntos de operación en condiciones reales y la curva del motor a plena carga, b) Patrones típicos de operación del motor

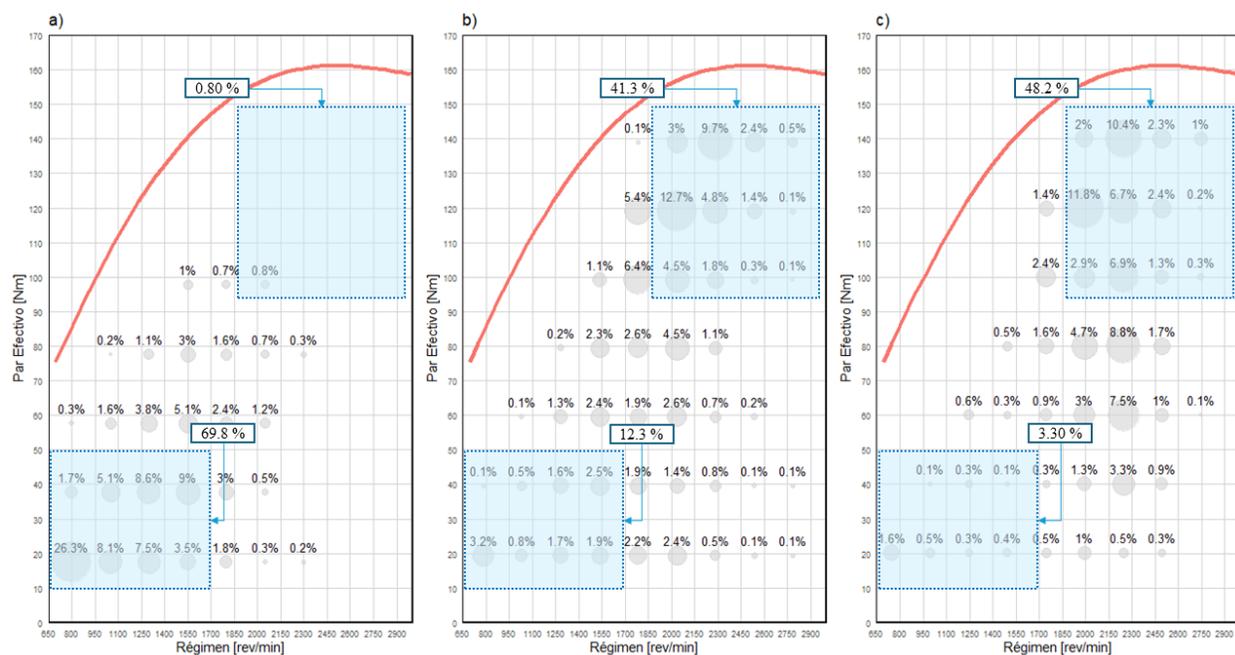
#### 4.2.1. Parámetros de Operación del Motor: Urbano, Suburbano y Autopista

La Figura 60 presenta los patrones típicos de operación del motor en función del régimen de giro rev/min y el par efectivo Nm, destacando la curva de par máximo para los distintos tramos de conducción: urbano, suburbano y autopista. En la Figura 60. a), correspondiente al tramo urbano, se observa una alta concentración de la frecuencia relativa de operación del motor en zonas de bajo

régimen y bajo par. Específicamente, el vehículo opera el 69,8% del tiempo dentro del rango de 650 a 1700 rev/min, mientras que el par efectivo se sitúa principalmente entre 10 y 50 Nm. Este comportamiento refleja una dinámica típica de conducción urbana, caracterizada por frecuentes detenciones, arranques suaves y baja demanda de potencia.

En la Figura 60. b), que representa el tramo suburbano, la frecuencia de operación se desplaza hacia regímenes y pares más elevados. En este caso, el 41,3% del tiempo el motor opera en el rango de 1850 a 2900 rev/min, con un par efectivo que oscila entre 95 y 150 Nm. Comparado con el tramo urbano, se registra una reducción del 57,5% en la frecuencia de operación en la zona de bajo régimen y Par, siendo esta zona utilizada únicamente el 12,3% del tiempo. Este patrón es consistente con condiciones de circulación más fluidas y velocidades moderadas.

Por último, la Figura 60. c), correspondiente al tramo de autopista, muestra una mayor concentración de la frecuencia relativa en zonas de régimen y par elevados, con un incremento del 6,9% respecto al tramo suburbano. En este entorno, el vehículo opera el 48,2% del tiempo en el rango de 1850 a 2900 rev/min, con Pares efectivos comprendidos entre 95 y 150 Nm. Asimismo, se observa una disminución del 9% en la frecuencia de operación en la zona de bajo par y régimen en comparación con el tramo suburbano, siendo utilizada solo el 3,3% del tiempo. Este comportamiento es característico de la conducción en autopista, donde las condiciones de operación son más estables y se requiere mayor potencia sostenida.



**Figura 60.** Patrones de Operación del Motor: a) Tramo urbano, b) Tramo suburbano, c) Tramo Autopista

### 4.3. Mapas Motor

En esta sección se analiza los resultados obtenidos mediante mapas de calor (mapas de motor), los cuales ofrecen una representación visual clara de las zonas de mayor consumo de combustible. Estos mapas se generan a partir de los datos recopilados durante la campaña experimental, y el análisis se enfoca en los tres equipos utilizados: ELM327, CANedge2 y CANUp. Es crucial comprender el comportamiento de estos equipos y los resultados obtenidos en esta investigación, en la que se evalúan aspectos como las tasas de consumo de combustible, las emisiones de CO<sub>2</sub>, la eficiencia térmica, el consumo específico al freno y otros factores relevantes que se detallarán más adelante. Cabe resaltar que, gracias a la optimización y el filtrado de los datos, se logró obtener resultados más precisos, los cuales reflejan con mayor exactitud las condiciones analizadas. Este enfoque permitió evaluar de manera más eficiente el rendimiento de los equipos en términos de consumo y eficiencia, ofreciendo una visión clara de su desempeño en diversos escenarios operativos.

#### 4.3.1. Consumo de Combustible y Tasa de Emisiones

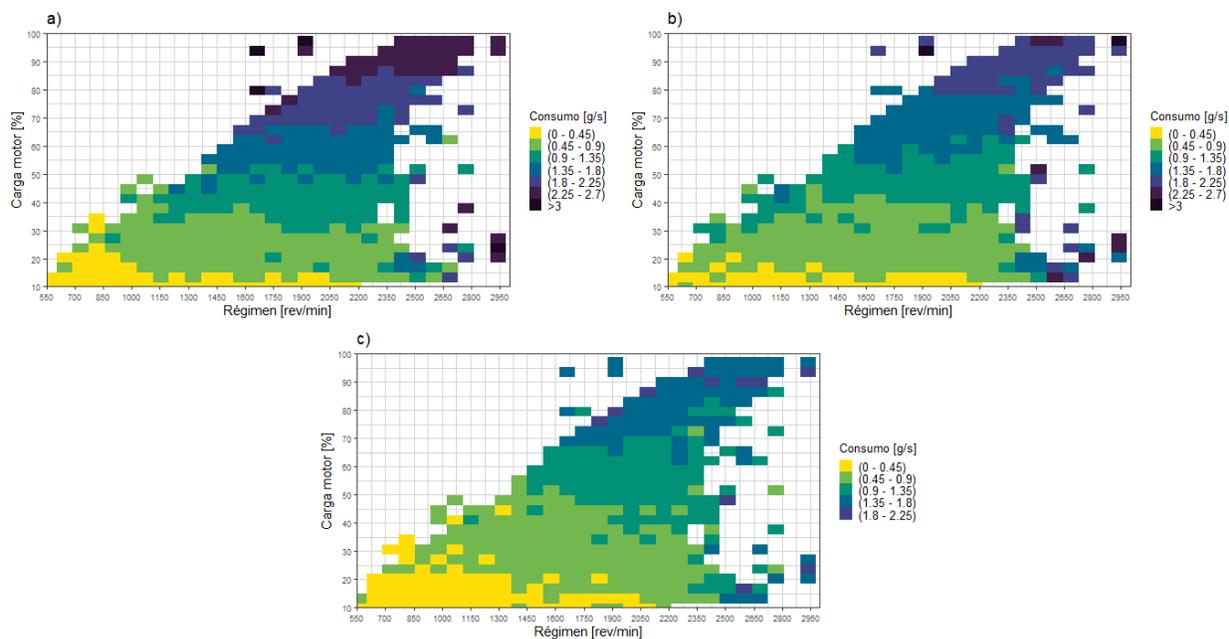
##### 4.3.1.1. Consumo Instantáneo de Combustible (g/s)

La Figura 61 muestra los mapas de motor del consumo de combustible instantáneo g/s, para los tres equipos utilizados en esta investigación. En estos mapas se logra visualizar la variación del

consumo en función del régimen de giro del motor rev/min y la carga %. Lo que proporciona una representación clara de las condiciones operativas del motor. La escala de colores utilizada es discreta, lo que permite clasificar los niveles de consumo en distintos rangos. Esto facilita la identificación de las zonas en las que el motor demanda mayor o menor cantidad de combustible. De hecho, las áreas de mayor consumo están representadas por cuadrículas en tonos azul oscuro y morado, correspondientes a valores superiores a 2,25 g/s, mientras que las cuadrículas en amarillo y verde, que abarcan de 0 a 1,8 g/s, reflejan condiciones de baja demanda de combustible.

Además, se puede apreciar una relación directamente proporcional entre el consumo y las variables de régimen de giro y carga del motor. Este comportamiento es previsible, ya que un aumento en la demanda de potencia, la cual incluye un incremento de carga y régimen del motor, implica un mayor requerimiento de combustible. De esta manera se observa como la presencia de zonas en donde se requiere mayor cantidad de combustible es visiblemente mayor en la Figura 61. a) en relación con los otros mapas. Esto puede atribuirse al hecho de que los valores provienen de estimaciones generadas por la ECU del vehículo y no de mediciones físicas directas. Este fenómeno coincide con lo reportado por (Pavlovic et al., 2021) quienes concluyen que la precisión del sistema OBD para estimar el consumo mejora únicamente en monitoreos prolongados.

La Figura 61. b) asociada al registrador CANedge2 con los sensores DFM 100ACAN, reflejó un comportamiento más moderado. De hecho, visualmente se aprecia como las zonas en donde se requiere una mayor cantidad de combustible se reducen. De forma similar en la Figura 61. c) asociada con el registrador CANUp, visualmente presenta zonas incluso más moderadas que las presentes en la Figura 61. b), de hecho, es evidente la presencia de una mayor cantidad de zonas en las que se requiere un menor consumo de combustible.

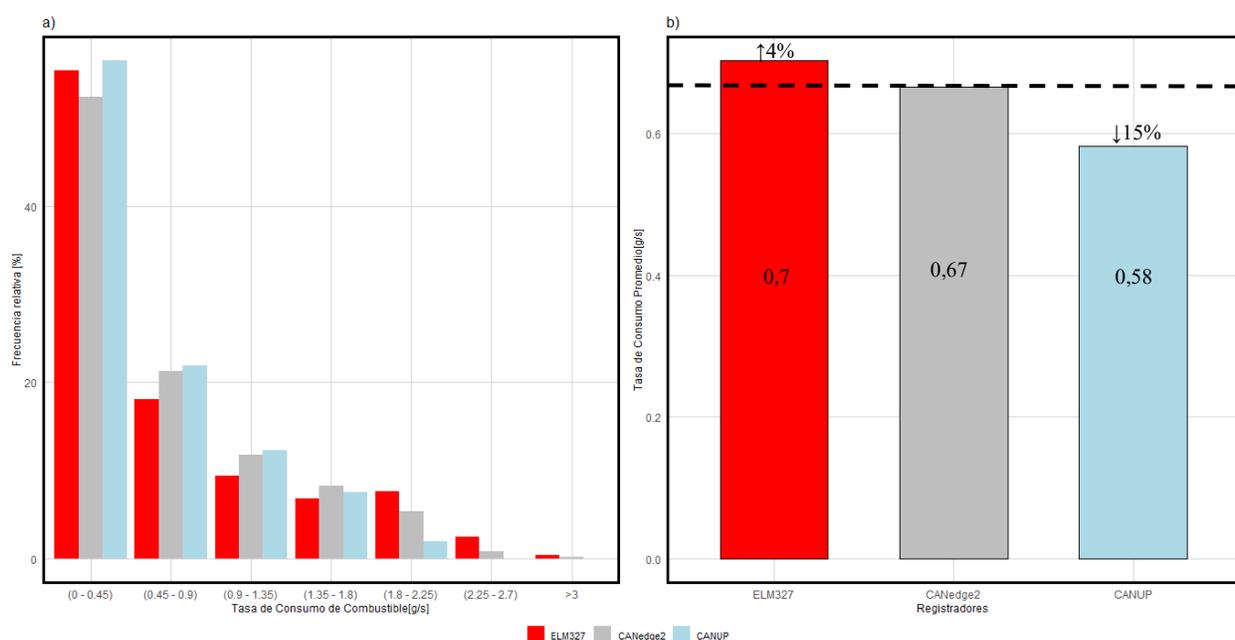


**Figura 61.** Mapas de motor consumo de combustible instantáneo: a) ELM327: OBD – II, b) CANedge2: Flujómetros, c) CANUp: Flujómetros

La Figura 62 complementa el análisis de los mapas motor en cuadrículas presentados en la Figura 61, al proporcionar una representación gráfica de la frecuencia de funcionamiento del motor en los distintos intervalos de consumo de combustible definidos. Esta representación, mediante gráficos de barras, permite visualizar con mayor claridad cómo se distribuye el funcionamiento del motor en relación con los diferentes rangos de consumo. De esta manera, se facilita una comparación directa y objetiva entre los dispositivos evaluados, brindando una visión más completa de las diferencias en las mediciones de combustible estimadas a través del sistema OBD-II como las obtenidas de forma física mediante los sensores de flujo.

La figura 62. a) compara la frecuencia de funcionamiento del motor, referente al consumo de combustible, asociada a los tres registradores utilizados. Además, para mejorar la interpretación, cada equipo se representa mediante un color diferente: rojo para el ELM327, gris para el CANedge2 y celeste para el CANUp. En términos generales, se observa como la mayor frecuencia se localiza en el rango más bajo de consumo de 0 a 0,45 g/s, indistintamente del registrador. En otras palabras, se entiende que los tres registradores indican que el motor funciona el 50% del tiempo aproximadamente en este rango bajo de consumo. Por el contrario, a medida que aumentan los rangos de consumo, la frecuencia de operación disminuye progresivamente. De hecho, en el rango más alto, correspondiente a consumos superiores a 3 g/s, se evidencia que el motor opera menos del 1% del tiempo, lo que refleja que estas condiciones de alta demanda son poco frecuentes

durante la operación registrada. Estas tendencias coinciden con hallazgos reportados en estudios previos en vehículos livianos, (Rosero Obando et al., 2024), donde se evidenció que, bajo condiciones de máxima potencia, y con aumentos simultáneos del Par motor y el régimen de giro, el consumo de combustible puede superar los 3,5 g/s. Finalmente, la Figura 62.b) presenta la tasa de consumo promedio registrada por cada uno de los dispositivos evaluados. El ELM327 reporta el valor más alto con 0,70 g/s, seguido del CANedge2 con 0,67 g/s y, en último lugar, el CANUp con 0,58 g/s. Al comparar los resultados, se observa que el consumo promedio registrado por el CANedge2 es un 15% superior al del CANUp, mientras que es aproximadamente un 4% inferior al registrado por el ELM327.



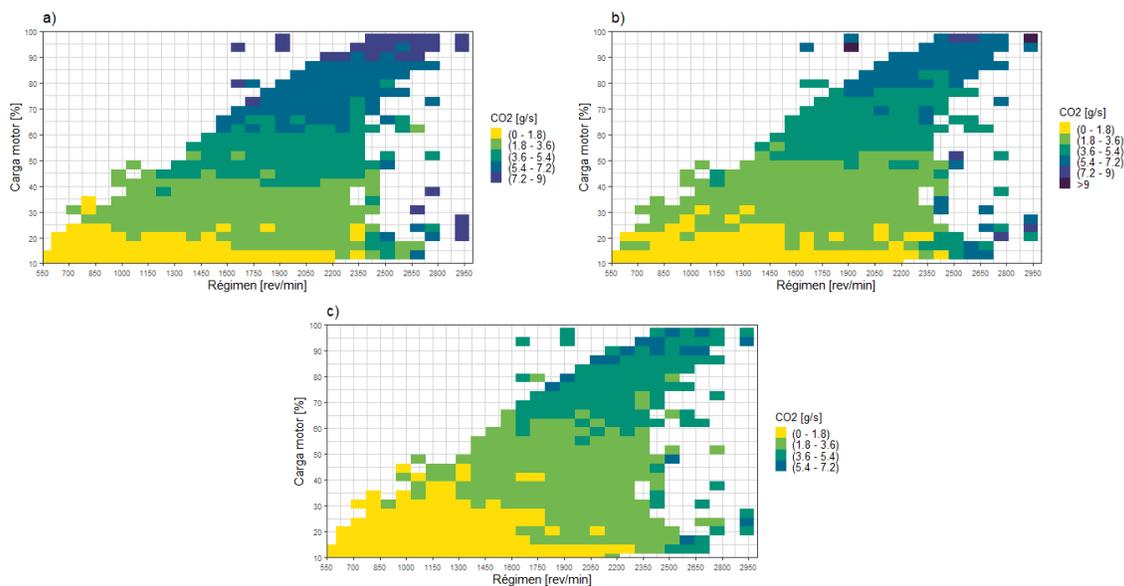
**Figura 62.** Frecuencia Relativa de consumo de combustible: a) ELM327: OBD – II, CANedge2: Flujómetros y CANUp: Flujómetros, b) Promedio

#### 4.3.1.2. Tasa de Emisiones de CO<sub>2</sub>

La Figura 63 presenta los mapas motor correspondientes a la tasa de emisiones de CO<sub>2</sub>, generados a partir de los datos obtenidos por los tres registradores utilizados en la investigación. Estos mapas permiten analizar con mayor detalle el comportamiento del motor al relacionar el régimen de giro rev/min y la carga % con los niveles de emisiones de CO<sub>2</sub>. De esta manera fue posible identificar la variación de emisiones de CO<sub>2</sub> bajo distintas condiciones de operación del vehículo. Al igual que en los mapas de consumo de combustible instantáneo, se empleó una escala de colores discreta, la cual facilita la interpretación visual al clasificar los valores de emisión en rangos específicos.

Este enfoque permite identificar rápidamente las zonas del mapa donde el motor presenta mayores emisiones de CO<sub>2</sub>.

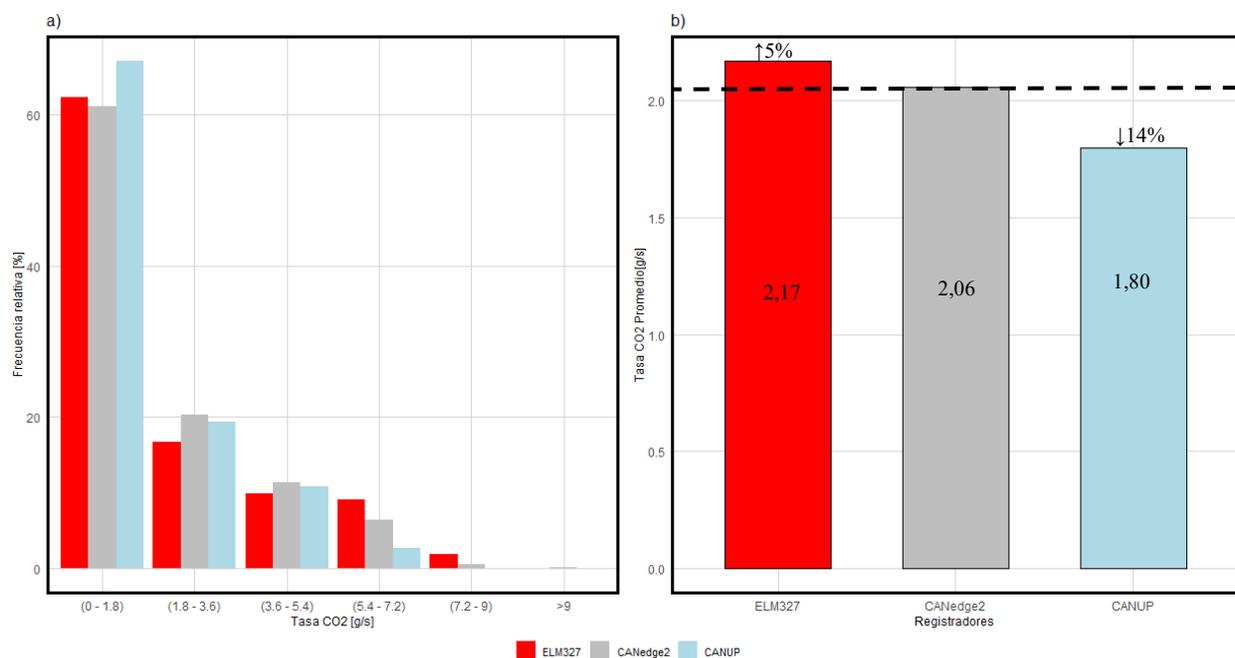
Es fundamental destacar la estrecha relación entre el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub>. En términos generales, un mayor consumo implica un incremento en las emisiones, dado que la combustión de combustibles fósiles genera dióxido de carbono como subproducto (Núñez, 2018). En la figura analizada, se evidencia una relación directa entre el consumo de combustible y los niveles de emisiones, pues las zonas en donde se visualizó un mayor consumo, identificadas previamente, coinciden con las zonas donde se registran los valores más altos de emisiones de CO<sub>2</sub>. En la Figura 63. a), correspondiente al registrador ELM327, se logra observar cómo existe una mayor cantidad de zonas en las que se concentra la mayor cantidad de emisiones, alcanzando valores entre 7,5 g/s y más de 9 g/s, superando los niveles observados con los otros equipos. Por su parte, las Figuras 61. b) y 61. c), correspondientes al CanEdge2 y al CanUp, respectivamente, presentan comportamientos más moderados. Pues los niveles de emisiones se concentran en zonas con rangos de 6 a 7,5 g/s. En los tres casos, los mayores niveles de emisiones se concentraron en condiciones de alta carga y elevadas revoluciones del motor, lo cual contrasta con lo reportado en estudios previos en vehículos livianos (Seo et al., 2021), donde se evidenció que, el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> es proporcional al régimen de giro y Par del motor, independientemente del tipo de combustible o cilindrada.



**Figura 63.** Mapas Motor de Tasa de Emisiones de CO<sub>2</sub>: a) ELM327: OBD – II, b) CANedge2: Flujómetros, c) CANUp: Flujómetros

La Figura 64 complementa el análisis de los mapas motor en cuadrículas presentados en la Figura 63, al proporcionar una representación gráfica de la frecuencia de funcionamiento del motor en los distintos intervalos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Esta representación, mediante gráficos de barras, permite visualizar con mayor claridad cómo se distribuye el funcionamiento del motor en relación con los diferentes rangos de emisiones. De esta manera, se facilita una comparación directa y objetiva entre los dispositivos evaluados, brindando una visión más completa de las diferencias en la tasa de emisiones estimada a través del sistema OBD-II como las obtenidas a partir de los sensores de flujo.

La figura 64. a) compara la frecuencia de funcionamiento del motor, referente a la tasa de emisiones de CO<sub>2</sub>, asociada a los tres registradores utilizados. Además, para mejorar la interpretación, cada equipo se representa mediante un color diferente: rojo para el ELM327, gris para el CANedge2 y celeste para el CANUp. En términos generales, se observa como la mayor frecuencia se localiza en el rango más bajo de emisiones de 0 a 1,8 g/s, indistintamente del registrador. En otras palabras, se entiende que los tres registradores indican que el motor funciona el 50% del tiempo aproximadamente en este rango bajo de emisiones. Por el contrario, a medida que aumentan los rangos de consumo, la frecuencia de operación disminuye progresivamente. De hecho, en el rango más alto, correspondiente a emisiones de CO<sub>2</sub> de 7,2 a 9 g/s, se evidencia que el motor opera menos del 1% del tiempo, lo que refleja que estas condiciones son poco frecuentes durante la operación registrada. Finalmente, la Figura 64.b) muestra los valores promedio de emisión de CO<sub>2</sub> registrados por cada uno de los dispositivos. El ELM327 presenta la tasa más alta, con un promedio de 2,17 g/s, seguido del CANedge2 con 2,06 g/s, y finalmente el CANUp con 1,80 g/s. Comparando estos valores, se observa que la tasa de emisión promedio registrada por el CANedge2 es un 14% superior a la del CANUp, mientras que es aproximadamente un 5% menor que la registrada por el ELM327.

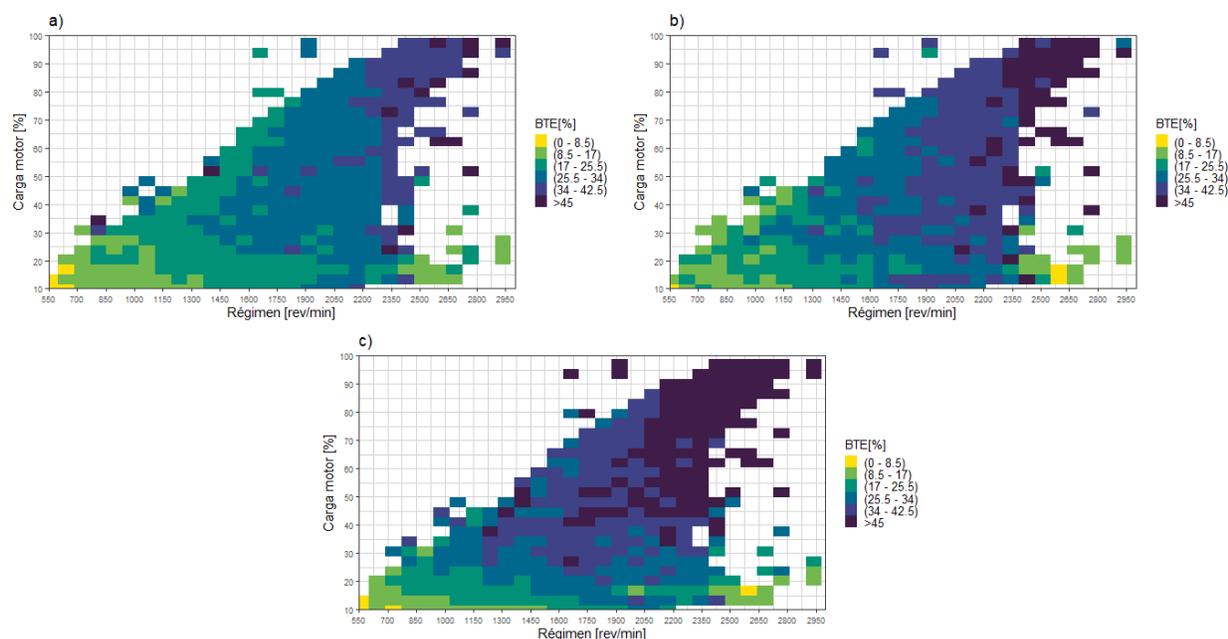


**Figura 64.** Frecuencia relativa de emisiones de CO<sub>2</sub>: a) ELM327: OBD – II, CANedge2: Flujómetros y CANUP: Flujómetros, b) Promedio

### 4.3.2. Mapas en Términos de Energía al Freno

#### 4.3.2.1. Eficiencia Térmica al Freno BTE

La Figura 65 muestra los mapas de eficiencia térmica al freno (BTE), elaborados a partir de los datos obtenidos por los tres registradores utilizados en el estudio. Al igual que en los mapas de motor anteriores, estos gráficos permitieron visualizar las zonas de mayor y menor eficiencia mediante una escala de colores y contornos. Además, estos mapas revelaron cómo la eficiencia térmica varía en función del régimen de giro del motor rev/min y la carga del motor %. Esto permitió analizar el desempeño del motor bajo distintas condiciones de operación donde la eficiencia es notablemente superior, así como zonas menos eficientes. De manera similar, los mapas de eficiencia térmica al freno (BTE) permitieron observar cómo varía este parámetro en función de los distintos puntos de operación del motor. En todos los gráficos, los niveles más bajos de BTE se representaron con tonalidades amarillas, correspondientes a valores entre 0 y 8,5%. Estas zonas de baja eficiencia se localizan principalmente en condiciones de bajo régimen y baja carga del motor. Por el contrario, los valores más altos de eficiencia aparecen en cuadrículas azul oscuro y morado, que indican eficiencias entre 34 y 42,5 %, y superiores a 45 %, respectivamente. Estas zonas de alta eficiencia se concentraron en rangos intermedios de régimen y carga, donde el motor tiende a operar más cerca de su punto óptimo.

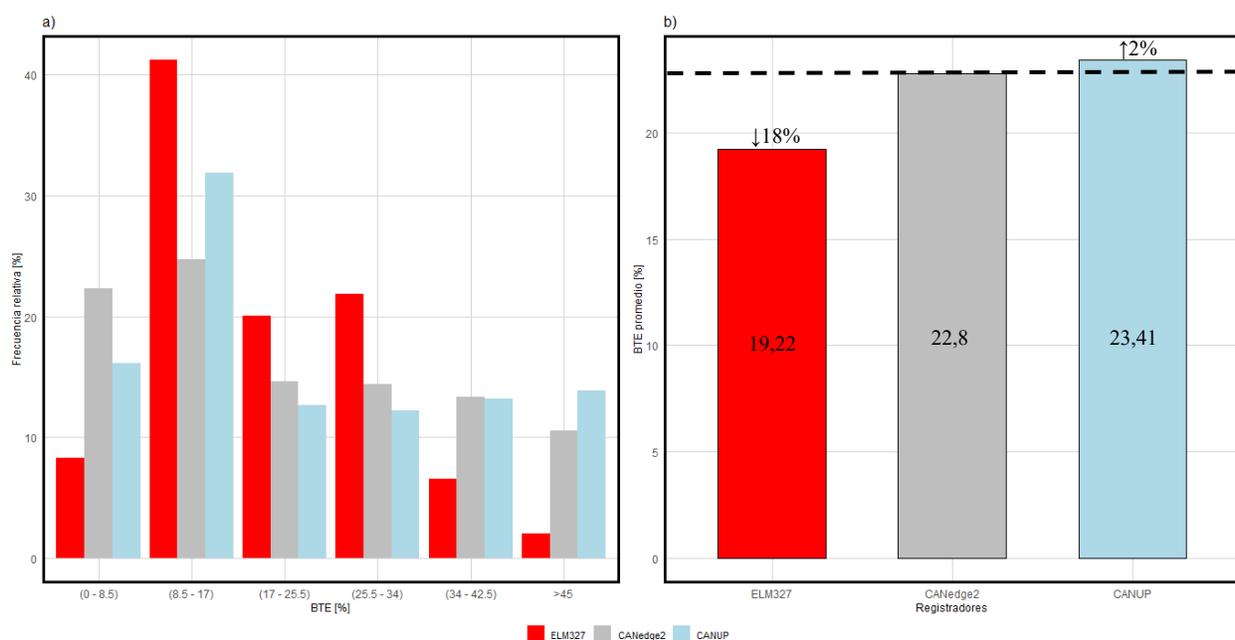


**Figura 65.** Mapas de motor de eficiencia térmica al freno BTE: a) ELM327: OBD – II, b) CANedge2: Flujómetros, c) CANUp: Flujómetros, d) Promedio

La Figura 66 complementa el análisis de los mapas motor en cuadrículas presentados en la Figura 64, al proporcionar una representación gráfica de la frecuencia de funcionamiento del motor en los distintos intervalos de eficiencia térmica al freno. Esta representación, mediante gráficos de barras, permite visualizar con mayor claridad cómo se distribuye el funcionamiento del motor en relación con la eficiencia térmica. De esta manera, se facilita una comparación directa y objetiva entre los dispositivos evaluados, brindando una visión más completa de las diferencias en la eficiencia térmica estimada a través del sistema OBD-II como las obtenidas a partir de los sensores de flujo. La Figura 66. a) compara la frecuencia de funcionamiento del motor en relación con la eficiencia térmica al freno (BTE) registrada por los tres dispositivos evaluados. Al igual que en secciones anteriores, se asigna un color específico a cada equipo para facilitar la interpretación: rojo para el ELM327, gris para el CANedge2 y celeste para el CANUp. En términos generales, se observa una mayor dispersión en la distribución de frecuencias en comparación con los análisis previos, ya que el funcionamiento del motor se concentra principalmente en los rangos medios de eficiencia térmica, entre 8,5% y 34%, sin importar el registrador considerado. No obstante, la mayor frecuencia de operación se ubica dentro del intervalo de 8,5% a 17%, lo cual corresponde a condiciones de bajo rendimiento, evidenciando que el motor opera una parte significativa del tiempo en un estado subóptimo. Por otra parte, aunque el rango de eficiencia térmica más alto de 25,5 a 34% muestra una menor concentración de frecuencias en comparación con los rangos

inferiores, aún presenta valores moderados de operación, especialmente con el registrador ELM327.

La discrepancia entre los dispositivos se vuelve más evidente en los extremos. En el rango de baja eficiencia, el ELM327 indica que el motor opera más del 40% del tiempo, mientras que el CANUP reporta más del 30%. En contraste, en condiciones de alta eficiencia térmica, el ELM327 muestra que el motor opera más del 20% del tiempo, mientras que tanto el CANedge2 como el CANUP indican valores inferiores al 10% en el rango de 25,5 a 34%. Finalmente, la Figura 66.b) muestra el valor promedio de eficiencia térmica del motor (BTE) calculado para cada uno de los dispositivos. El registrador CANUP presenta el valor más alto, con un promedio de 23,41%, seguido del CANedge2 con 22,8%, y finalmente el ELM327 con 19,22%. Al comparar estos resultados, se observa que el CANedge2 supera al ELM327 en un 18% y al CANUP en apenas un 2%. En conjunto, los datos sugieren que los dispositivos CANUP y CANedge2 ofrecen una estimación más alta y posiblemente más precisa de la eficiencia térmica del motor bajo condiciones reales de operación.



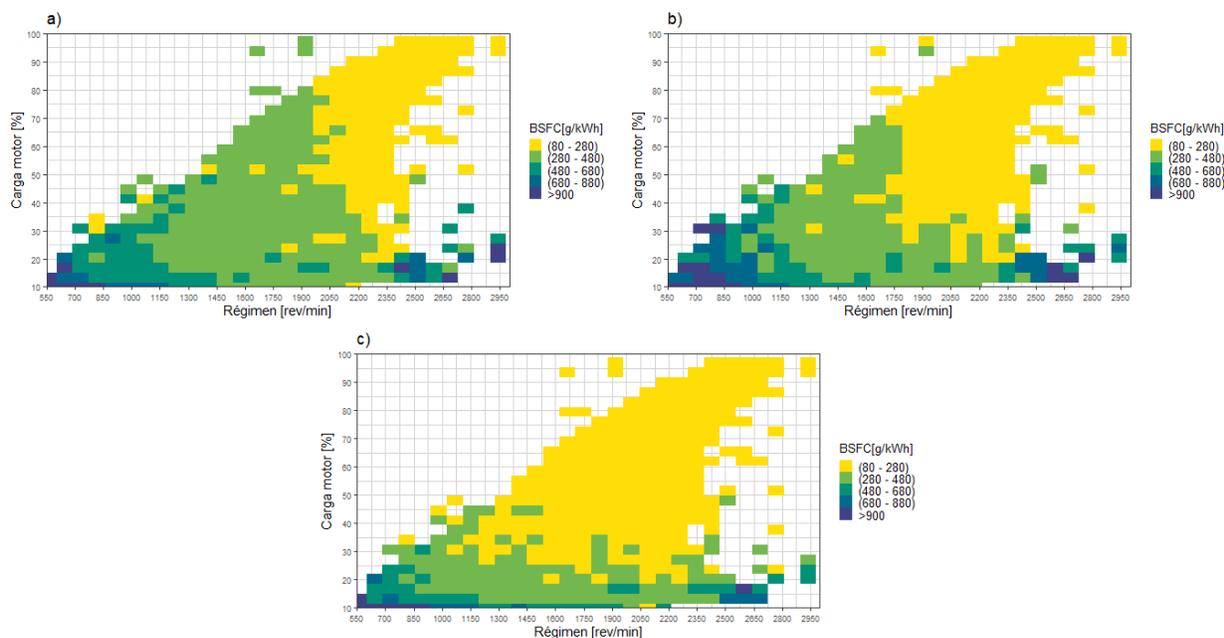
**Figura 66.** Frecuencia relativa de eficiencia térmica al freno: a) ELM327: OBD – II, CANedge2. Flujómetros y CANUP: Flujómetros, b) Promedio

#### 4.3.2.2. Consumo Específico al Freno BSFC

La Figura 67 muestra los mapas del motor de consumo específico de combustible al freno (BSFC), utilizando el mismo formato visual empleado en los mapas anteriores. Estos gráficos son

esenciales para evaluar el rendimiento energético del motor, ya que indican la cantidad de combustible consumido por unidad de energía generada, expresada en g/kWh. Mediante una escala de colores y contornos, los mapas permitieron identificar de forma clara las zonas de operación más y menos eficientes. Las áreas con valores bajos de BSFC representan condiciones óptimas de funcionamiento, donde el motor convierte el combustible en energía de manera más eficiente. Por el contrario, los valores altos de BSFC reflejan un mayor consumo relativo de combustible, lo que indica una menor eficiencia.

En todos los casos, se evidenció que el BSFC tiende a incrementarse en las zonas de operación con altos valores de régimen de giro rpm y carga del motor %. En estas condiciones, aunque el consumo de combustible es elevado, la energía generada no crece en la misma proporción, lo que se refleja en un aumento del BSFC. Estas zonas se representan mediante cuadrículas amarillas, con valores que oscilan entre 80 y 280 g/kWh.

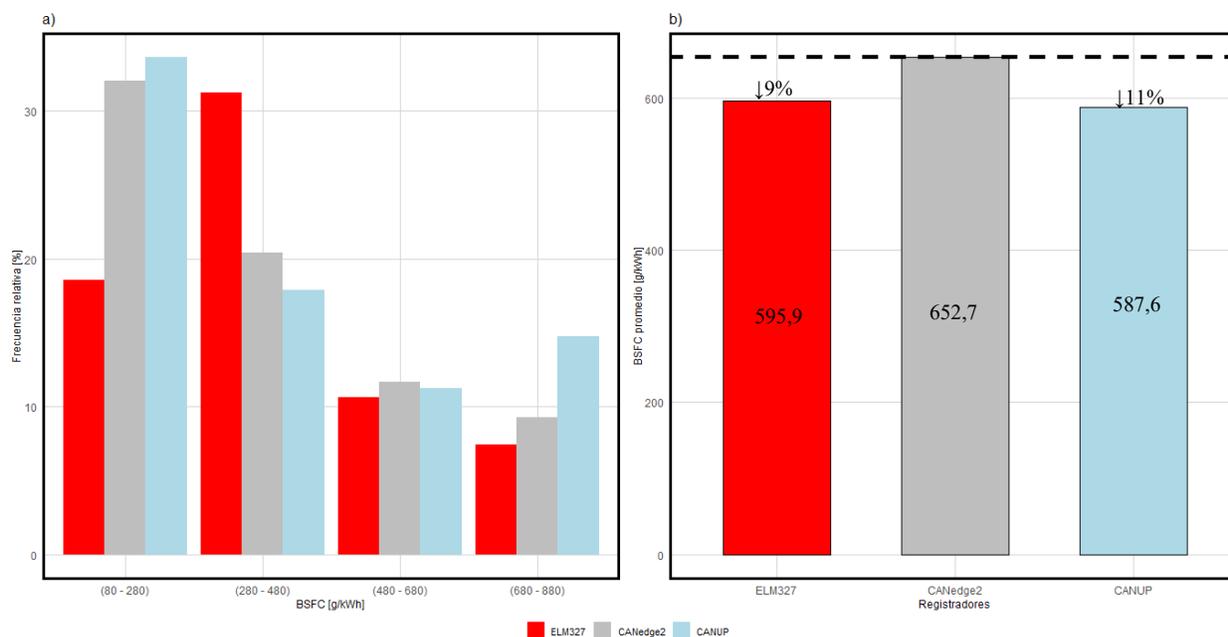


**Figura 67.** Mapas de motor de consumo específico al freno (BSFC): a) ELM327: OBD – II, b) CANedge2: Flujómetros, c) CANUp: Flujómetros

La Figura 68. a) compara la frecuencia de funcionamiento del motor en función del consumo específico de combustible al freno (BSFC) registrado por los tres dispositivos evaluados. Como en secciones anteriores, se utiliza una codificación por colores para facilitar la interpretación: rojo para el ELM327, gris para el CANedge2 y celeste para el CANUp. En términos generales, se observa una dispersión significativa en la distribución de frecuencias, especialmente en los rangos

bajos y medios de consumo específico, comprendidos entre 80 y 480 g/kWh. Esta variabilidad refleja diferencias importantes entre los dispositivos en la estimación del rendimiento del motor. Los registradores CANedge2 y CANUp concentran la mayor frecuencia de operación del motor en el rango bajo de consumo específico, entre 80 y 280 g/kWh, lo cual sugiere condiciones de mayor eficiencia térmica. En cambio, el ELM327 muestra una frecuencia significativamente menor en este mismo rango, indicando que el motor opera menos del 20% del tiempo, frente a más del 30% del tiempo registrado por los otros dos dispositivos.

Por otro lado, el ELM327 presenta su mayor frecuencia de funcionamiento en el rango medio de consumo específico, entre 280 y 480 g/kWh, donde indica que el motor opera más del 30% del tiempo. En contraste, tanto el CANedge2 como el CANUp reportan que en ese rango el motor opera menos del 20% del tiempo. Finalmente, la Figura 68.b) muestra el valor promedio del consumo específico al freno (BSFC) reportado por cada uno de los dispositivos. El registrador CANUp presenta el valor más bajo, con un promedio de 587,6 g/kWh, seguido del ELM327 con 595,98 g/kWh, mientras que el CANedge2 registra el valor más alto, con 652,77 g/kWh. Al comparar estos resultados, se observa que el valor reportado por el CANedge2 es aproximadamente un 11% mayor que el del CANUp, y un 9% superior al del ELM327. En conjunto, los datos sugieren que el dispositivo CANUp estima un menor consumo específico, lo que podría indicar una mayor eficiencia o una menor sensibilidad a sobreestimaciones bajo condiciones reales de operación.



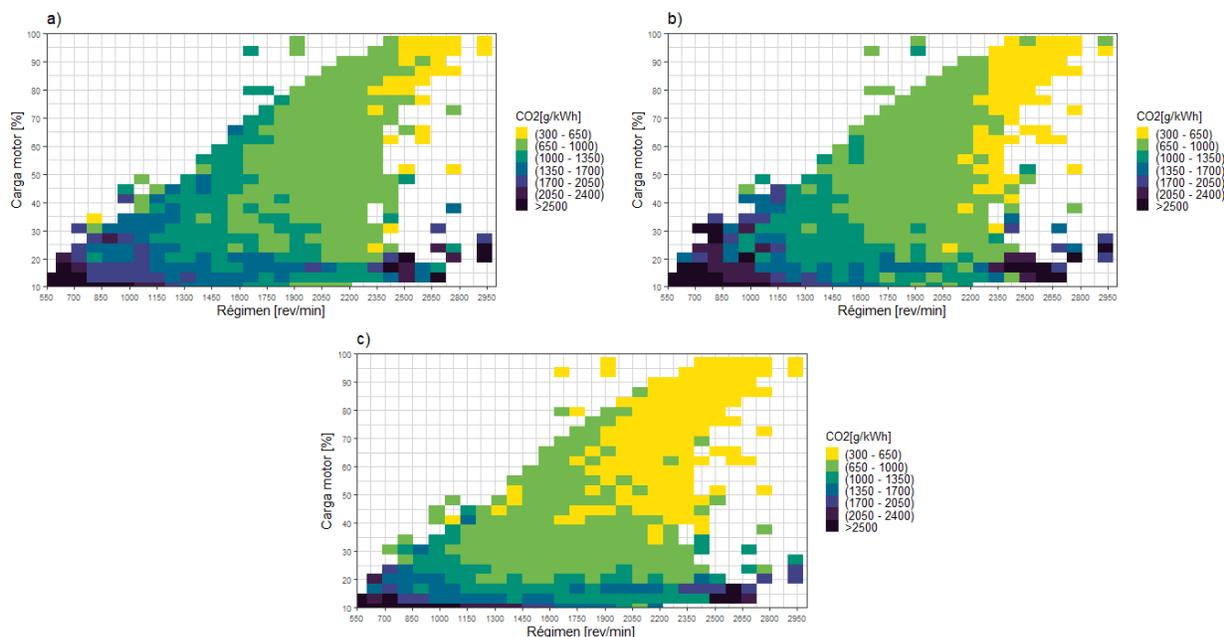
**Figura 68.** Frecuencia relativa de consumo específico al freno (BSFC): a) ELM327: OBD – II, CANedge2: Flujómetros y CANUp: Flujómetros, b) Prpmedio

#### 4.3.3. Tasa de emisiones de CO<sub>2</sub> por Unidad Energética

La Figura 69 presenta los mapas del motor correspondientes a la tasa de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de energía generada partir elaborados a partir de los datos recopilados por los tres registradores. Cada mapa muestra cómo varían las emisiones específicas de CO<sub>2</sub>, expresadas en g/kWh, en función del régimen de giro del motor rev/min y la carga del motor %. Estos mapas permiten identificar con precisión las zonas de menor y mayor emisión de CO<sub>2</sub> mediante una escala de colores y contornos que facilitan su interpretación. Las áreas con tonos más claros representan menores niveles de emisiones específicas, mientras que los tonos más oscuros indican una mayor cantidad de CO<sub>2</sub> emitido por unidad de energía generada.

Los resultados evidencian que las emisiones específicas de CO<sub>2</sub> tienden a disminuir a medida que aumentan tanto el régimen de giro como la carga del motor. Las zonas de menor emisión se representan en colores amarillo y verde, correspondientes a rangos de 300–650 g/kWh y 650–1000 g/kWh, y se concentran en regiones de operación media a alta, donde el motor trabaja de forma más eficiente. En contraste, las emisiones más elevadas se observan en tonalidades azul y morado, con valores entre 1700–2050 g/kWh y superiores a 2500 g/kWh, ubicadas principalmente en condiciones de baja carga y bajo régimen, donde la eficiencia del motor disminuye considerablemente. Estos patrones contrastan con lo reportado por (D. E. Arias, 2025), quien

identificó que las zonas de menor emisión de CO<sub>2</sub> se situaban en condiciones de alto régimen y elevada carga. Además, en situaciones de operación a ralentí, las tasas de emisión se mantienen en un rango de aproximadamente 950 a 1100 g/kWh.

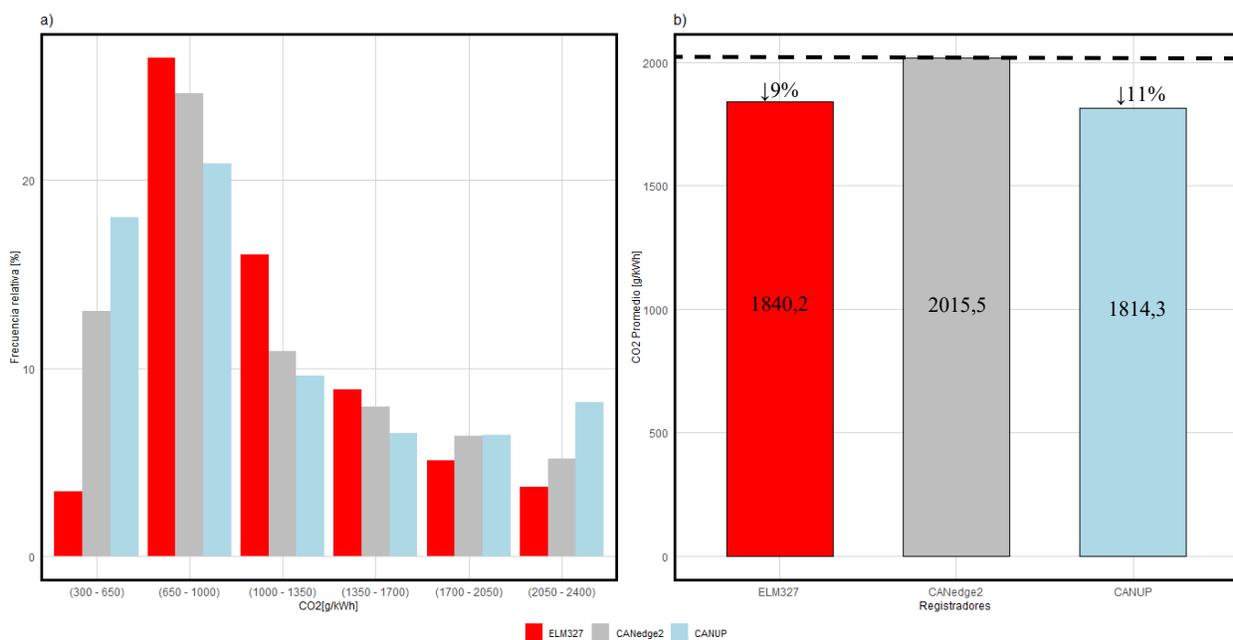


**Figura 69.** Mapas de motor de tasa de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad energética: a) ELM327: OBD – II, b) CANedge2: Flujómetros, c) CANUp: Flujómetros

La Figura 70 complementa el análisis de los mapas motor en cuadrículas presentados en la Figura 69, al ofrecer una representación gráfica de la frecuencia de funcionamiento del motor en los distintos intervalos de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad energética. Esta representación, mediante gráficos de barras, permite visualizar con mayor claridad cómo se distribuye el funcionamiento del motor respecto a los diferentes rangos de emisiones. De este modo, se facilita una comparación directa y objetiva entre los dispositivos evaluados, proporcionando una visión más integral de las diferencias en las emisiones estimadas a través de la información del sistema OBD-II como mediante los sensores de flujo.

La Figura 70. a) compara la frecuencia de funcionamiento del motor en función de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a los tres registradores utilizados. Para facilitar la interpretación, se emplea una codificación por colores: rojo para el ELM327, gris para el CANedge2 y celeste para el CANUp. En términos generales, se observa que la mayor frecuencia de funcionamiento se concentra en el rango bajo de emisiones, entre 650 y 1000 g/kWh, independientemente del registrador. En otras palabras, los tres dispositivos indican que el motor opera más del 20% del tiempo en este rango. Por el contrario, a medida que aumentan los rangos de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad energética, la

frecuencia de operación disminuye progresivamente. No obstante, se identifican diferencias entre los dispositivos respecto a los rangos con menor frecuencia de funcionamiento. El ELM327 presenta su menor frecuencia en el rango más bajo de emisiones, de 300 a 650 g/kWh, mientras que el CANedge2 muestra la menor frecuencia en el rango más alto, entre 2050 y 2400 g/kWh. De forma similar, el CANUp reporta su menor frecuencia de operación en el rango alto de 1700 a 2050 g/kWh. Finalmente, la Figura 70.b) muestra el valor promedio de las emisiones específicas de CO<sub>2</sub> registradas por cada dispositivo. El CANedge2 presenta el valor más alto, con un promedio de 2015,58 g/kWh, seguido por el ELM327 con 1840,23 g/kWh, mientras que el valor más bajo es reportado por el CANUp, con 1814,33 g/kWh. Al comparar estos resultados, se observa que el CANedge2 registra un valor aproximadamente un 11% mayor que el CANUp, y un 9% superior al ELM327. Estos resultados sugieren que el dispositivo CANedge2 tiende a reportar mayores niveles de emisiones específicas de CO<sub>2</sub> por unidad de energía generada, lo cual podría estar relacionado con diferencias en la precisión del cálculo o en la interpretación de las señales del sistema OBD bajo condiciones reales de operación.



**Figura 70.** Frecuencia relativa de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad energética: a) ELM327: OBD – II, CANedge2: Flujómetros y CANUp: Flujómetros, b) Promedio

#### 4.4. Factores de emisión y consumo por pruebas

La Tabla 24 presenta un resumen comparativo de los factores de emisión promedio obtenidos a partir de los tres registradores utilizados en el estudio. Además, se incluyen los resultados por

subtramos de operación para variables clave como la eficiencia térmica al freno (BTE), el consumo específico de combustible (BSFC), las emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad energética, las tasas promedio de consumo y emisión instantánea.

En relación con la eficiencia térmica al freno (BTE), se observa que, en los tres registradores, los valores más altos se registran en el tramo de autopista. Este comportamiento es consistente con investigaciones previas (Hidalgo & Veintimilla, 2021), donde se señala que en condiciones de alta carga y régimen constante el motor puede operar más cerca de su punto óptimo de eficiencia. En el caso del registrador CANUp, se alcanzó una eficiencia de 31,19%, lo cual se aproxima al valor teórico máximo para motores de combustión interna, indicando una conversión más efectiva de la energía térmica en energía mecánica útil.

Respecto al consumo específico de combustible al freno (BSFC), se aprecia que los valores más bajos también se presentan en el tramo de autopista, especialmente en los datos del CANUp con 222,94 g/kWh, lo que refleja una mayor eficiencia en estas condiciones. Por el contrario, en el tramo urbano, el BSFC se incrementa notablemente, lo cual puede atribuirse a las frecuentes paradas y arranques, así como a la operación en régimen bajo, donde el motor funciona lejos de su punto de eficiencia óptima. Estas tendencias son coherentes con lo reportado en estudios previos realizados en la ciudad de Ibarra (D. E. Arias, 2025), donde se determinó un BSFC promedio de 284,23 g/kWh en condiciones similares. En comparación, los valores obtenidos mediante el registrador ELM327 son un 3,73% inferiores, lo cual puede explicarse por la similitud en las metodologías de medición aplicadas.

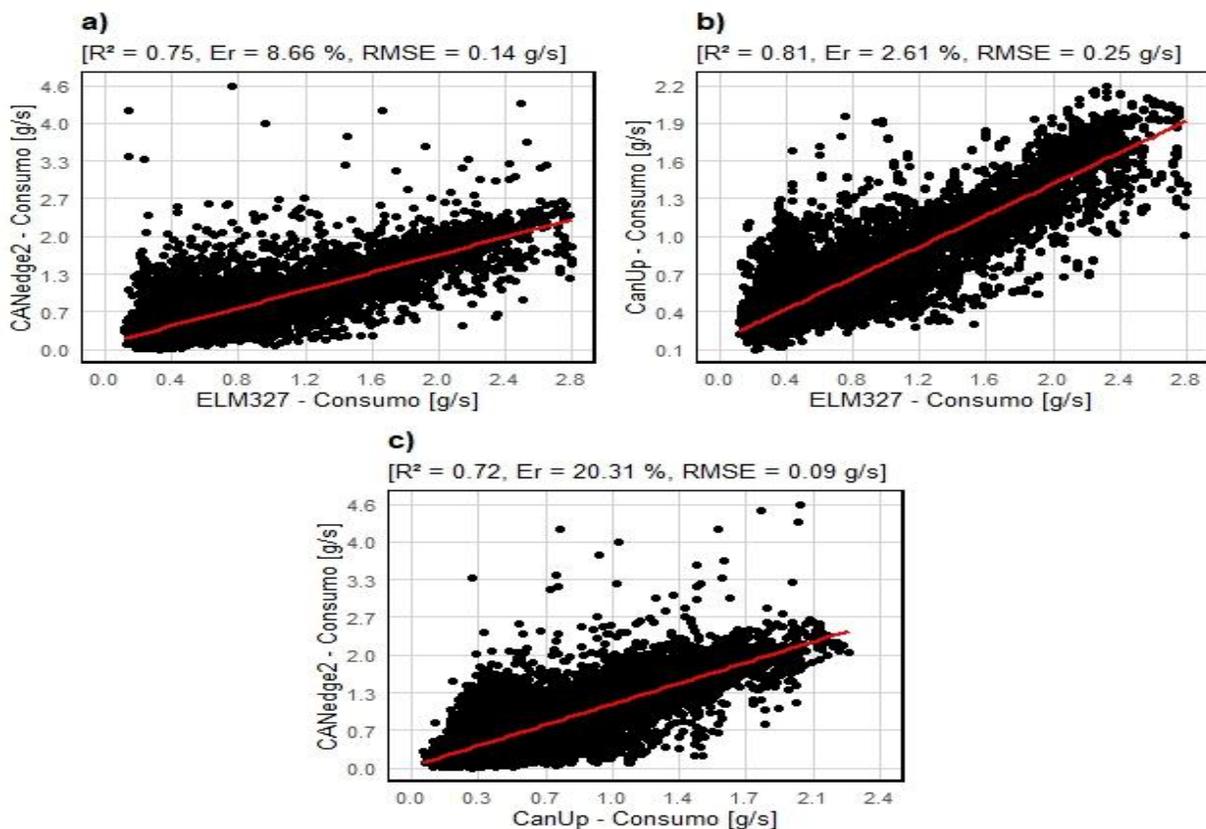
En cuanto a la tasa promedio de consumo de combustible (FC) y de emisiones instantáneas de CO<sub>2</sub>, los valores más altos también se registran en el tramo de autopista. Esto se debe a que el motor trabaja en condiciones de alto régimen y elevada carga. No obstante, al analizar los promedios por registrador, se evidencia que el ELM327 muestra tasas de consumo y emisión superiores superando en un 13% y 20% a los valores registrados por el CANedge2 y el CANUp, respectivamente.

**Tabla 24.** Factores de emisión promedio calculados

Equipo	Tramo	BTE (%)	Factores de Emisión por Energía Generada (g/kWh)		Tasa Promedio (g/s)	
			BSFC	CO <sub>2</sub>	FC	CO <sub>2</sub>
ELM327	Urbano	14,16	513,61	1585,88	0,39	1,22
	Suburbano	23,38	308,75	953,33	0,96	2,96
	Autopista	28,04	274,02	846,10	1,22	3,79
	Total	19,21	336,23	1038,18	0,70	2,16
CANEdge2	Urbano	16,81	534,56	1650,6	0,41	1,27
	Suburbano	28,03	285,29	880,91	0,88	2,74
	Autopista	32,83	243,04	750,44	1,08	3,36
	Total	22,79	318,73	984,16	0,66	2,05
CANUp	Urbano	17,15	433,36	1338,10	0,33	1,03
	Suburbano	28,67	256,49	791,99	0,79	2,46
	Autopista	31,19	222,94	688,41	0,99	3,08
	Total	23,41	278,80	860,86	0,58	1,79

#### 4.5. Análisis de la Correlación entre los Equipos de Recolección de Información

En esta sección se examina la relación entre los distintos conjuntos de datos a través de gráficos de dispersión. Estos gráficos permiten visualizar la correlación entre variables, facilitando la interpretación de los resultados y la identificación de patrones relevantes o discrepancias significativas entre los equipos. La Figura 71 presenta tres gráficos de correlación que comparan los datos de consumo de combustible obtenidos a partir de los registradores ELM327, CANedge2 y CANUp. En cada gráfico se analizan dos conjuntos de datos para evaluar el grado de asociación entre ellos. Los resultados incluyen el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que indica qué proporción de la variabilidad en el consumo puede ser explicada por el modelo lineal. Asimismo, se presentan el Error Relativo ( $E_r$ ) y el Error Cuadrático Medio (RMSE), los cuales permiten cuantificar la precisión y exactitud del modelo predictivo. Estos indicadores son fundamentales para validar la consistencia de los datos entre los distintos equipos de medición y determinar posibles discrepancias en sus registros.



**Figura 71.** Correlación de consumo de combustible: a) ELM327 – CANedge2, b) CANUp – ELM327, c) CANedge2 – CANUp

La Tabla 25 presenta los resultados del análisis comparativo entre los distintos registradores utilizados durante la campaña experimental, así como las principales métricas estadísticas aplicadas para evaluar la concordancia de los datos: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el error relativo (Er) y el error cuadrático medio (RMSE).

Los resultados muestran que la correlación más alta se obtuvo entre ELM327 y CANUp, con un  $R^2$  de 0,81, un error relativo mínimo de 2,61% y un RMSE de 0,25 g/s, lo que evidencia una alta coherencia entre ambos dispositivos en la medición del consumo de combustible. En segundo lugar, la comparación entre ELM327 y CANedge2 arrojó un  $R^2$  de 0,75, con un error relativo de 8,66% y un RMSE de 0,14 g/s, lo que indica una concordancia aceptable, aunque ligeramente menor que la del caso anterior. Por último, la correlación entre CANedge2 y CANUp presentó un  $R^2$  de 0,72, acompañado de un error relativo significativamente más alto de 20,31%, a pesar de que registró el RMSE más bajo de 0,09 g/s. Este resultado sugiere que, aunque las diferencias absolutas entre ambos dispositivos son pequeñas, existe una considerable dispersión relativa entre sus mediciones.

**Tabla 25.** *Indicadores Estadísticos del gráfico de dispersión*

Correlación	Métricas estadísticas		
	Coefficiente de determinación $R^2$	Error Relativo %	Error cuadrático medio RMSE (g/s)
CANedge2 vs ELM327	0,75	8,66%	0,14
CANUp vs ELM327	0,81	2,61%	0,25
CANedge2 vs CANUp	0,72	20,31%	0,09

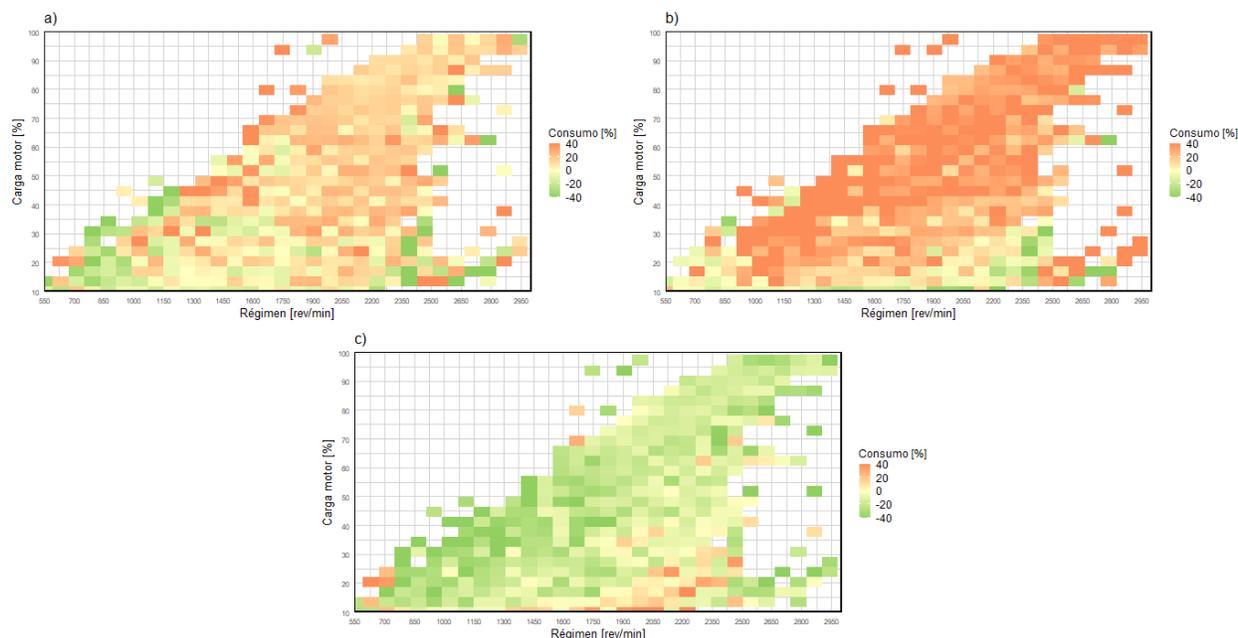
#### 4.6. Mapas Comparativos

La Figura 72 presenta los mapas de motor comparativos, elaborados para comparar el desempeño en cuanto a la medición del consumo de combustible de cada registrador ELM327, CANedge2 y CANUp. Estos mapas permiten visualizar, de forma espacial, las diferencias en el consumo registrado por cada dispositivo en función del régimen de giro rev/min y la carga del motor %. Para facilitar la interpretación comparativa, se empleó una escala de colores divergente. En este esquema, las zonas en amarillo indican diferencias prácticamente nulas entre los valores reportados por los registradores, lo que sugiere una alta concordancia en esos puntos operativos. Esta metodología sigue el enfoque planteado en trabajos previos como (Ortiz, 2020), donde las zonas neutras fueron utilizadas como referencia para identificar las regiones de transición, en las que un combustible comienza a mostrar resultados superiores o inferiores en comparación con el otro comparado. Así, los colores verde y naranja permiten distinguir con claridad qué dispositivo registra mayor o menor consumo relativo, respectivamente.

En la Figura 72. a), correspondiente al mapa comparativo entre los dispositivos ELM327 y CANedge2, se observa una mayor extensión de zonas en color naranja, las cuales indican que el dispositivo ELM327 registra un consumo de combustible superior, particularmente bajo condiciones de alto régimen de giro y elevada carga del motor. Este patrón sugiere una tendencia del ELM327 a sobrestimar el consumo en escenarios de alta exigencia operativa. En contraste, en zonas de bajo régimen y carga reducida, el dispositivo CANedge2 muestra un desempeño más favorable, evidenciado por una mayor proporción de zonas en color verde, que indican un consumo más alto registrado por este equipo.

Por su parte, la Figura 72. b), que compara los dispositivos ELM327 y CANUp, evidencia una predominancia aún mayor de zonas en color naranja, asociadas a un mayor consumo registrado por el ELM327, en comparación con el mapa anterior. Las zonas en las que el CANUp reporta un consumo superior son mínimas y se concentran principalmente en condiciones de baja carga del

motor. Finalmente, la Figura 72. c), correspondiente al mapa comparativo entre los dispositivos CANUp y CANedge2, revela una mayor proporción de zonas verdes, lo que indica un consumo superior registrado por el CANedge2. No obstante, también se identifican zonas neutras, especialmente en condiciones de alto régimen y alta carga, donde ambos dispositivos presentan niveles de consumo similares, lo cual refleja una buena concordancia en estas regiones. En contraste, las zonas en color naranja, donde el CANUp reporta un mayor consumo, son reducidas y se ubican principalmente en zonas de baja carga.

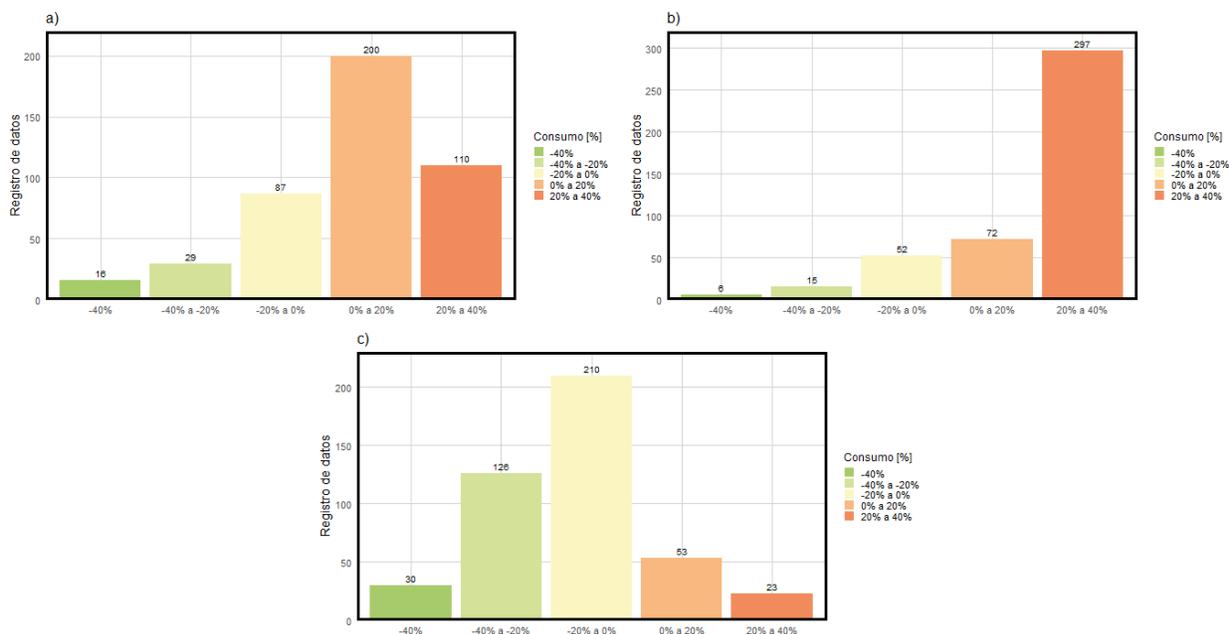


**Figura 72.** Mapas de motor comparativos: a) ELM327 – CANedge2, b) ELM327 – CANUp, c) CANUp – CANedge2

La Figura 73 complementa el análisis previamente planteado para la Figura 72, al representar de manera cuantitativa la diferencia en porcentajes del consumo de combustible registrado por los dispositivos utilizados a través de diferentes gráficos de barras. Esta representación permite visualizar la distribución de los registros de datos en función de distintos rangos de variación porcentual.

En la Figura 73. a), que compara el ELM327 con el CANedge2, se destaca que la mayoría de los registros se concentran en el rango de 0% a 20% con un total de 200 registros. Además, esto confirma la sobreestimación observada visualmente en la Figura 72.a). Por otro lado, en la Figura 73. b) correspondiente a la comparación entre el ELM327 y el CANUp, se observa un comportamiento aún más marcado, con un pico de 297 registros en el rango de 20% a 40%, evidenciando que el ELM327 registra consistentemente valores de consumo más altos frente al

CANUp en la mayoría de las condiciones operativas. Finalmente, la Figura 73. c), que muestra la comparación entre el CANUp y el CANedge2, presenta una distribución más equilibrada, pues la mayoría de los datos se agrupan en los rangos negativos, especialmente entre -20% y 0% con un total de 210 registros y entre -40% y -20% con 126 registros, lo que indica que el CANedge2 suele reportar un consumo ligeramente superior al del CANUp. No obstante, también se registra un número significativo de datos cercanos a cero, lo que sugiere una mayor concordancia entre estos dos dispositivos respecto a los casos anteriores.



**Figura 73.** Registro de datos de mapas comparativos: a) ELM327 – CANedge2, b) ELM327 – CANUp, c) CANUp – CANedge2

## 4.7. Análisis del Factor de Consumo de Combustible y Emisiones de CO<sub>2</sub>

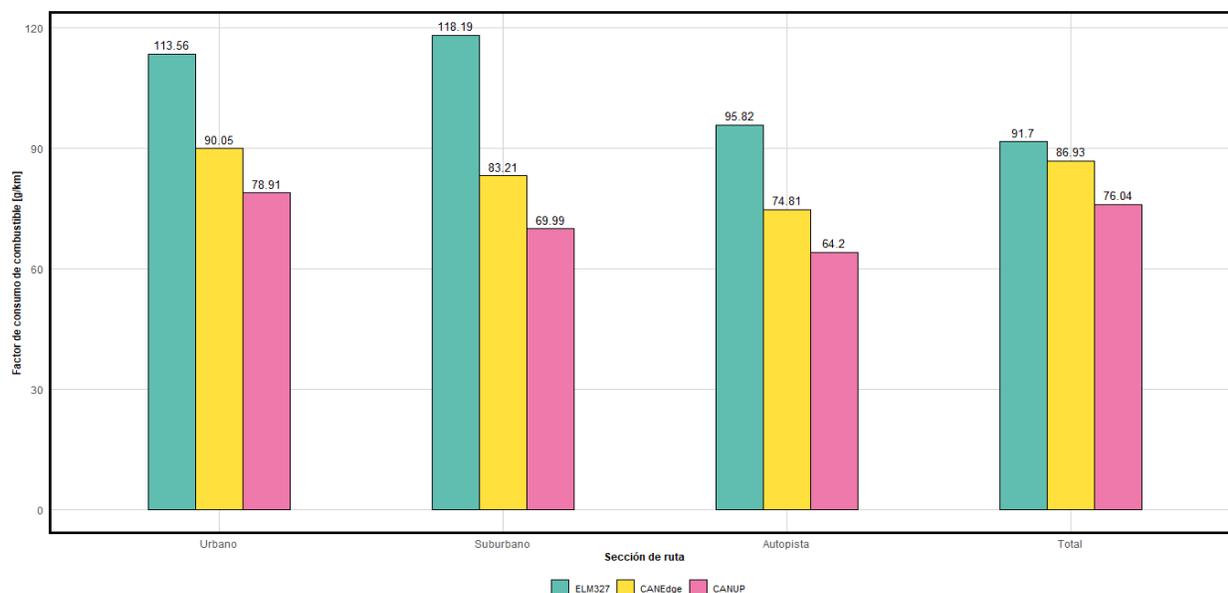
### 4.7.1. Factor de Consumo de Combustible

La Figura 74 muestra un gráfico de barras comparativo del consumo de combustible, expresado en g/km, medido por los tres dispositivos utilizados. El análisis abarca los distintos subtramos de la ruta evaluada: urbano, suburbano y autopista, e incluye además un promedio general del consumo bajo todas las condiciones operativas. En el eje vertical se representa los valores de consumo, los cuales oscilan entre 0 y 120 g/km, lo que permite observar de manera clara las diferencias de rendimiento entre los dispositivos en función del tipo de conducción. En el eje horizontal, se identifica los diferentes tipos de subtramos: urbano, suburbano, autopista, y una categoría adicional que representa el promedio total.

Para facilitar la lectura e identificación de los datos, cada dispositivo está representado con un color distintivo: verde para el ELM327, amarillo para el CANedge2, y rojo para el CANUp. Esta codificación visual permite comparar de forma directa el comportamiento de cada equipo en los diferentes contextos de conducción. En el tramo urbano, el ELM327 registra el consumo más elevado, alcanzando 113,56 g/km. Este valor supera en un 26,10% al registrado por el CANedge2, que es de 90,05 g/km, y en un 43,91% al del CANUp, que es de 78,91 g/km. Además, el CANedge2 presenta un consumo un 14,11% superior al del CANUp.

Este patrón se mantiene en el tramo suburbano, donde el ELM327 alcanza un valor de 118,19 g/km, mientras que el CANedge2 registra 83,21 g/km y el CANUp 69,99 g/km. Esto implica que el ELM327 presenta un consumo 42,03% mayor que el del CANedge2 y un 68,86% mayor que el del CANUp. Además, en comparación con las mediciones de flujo, el CANedge2 supera al CANUp en un 18,91%. En el tramo de autopista, donde se registran los consumos más bajos, el ELM327 registra un 95,82 g/km, en comparación con 74,81 g/km del CANedge2 y 64,2 g/km del CANUp. Las diferencias son significativas, el ELM327 muestra un consumo 28,08% mayor que el del CANedge2 y 49,25% mayor que el del CANUp. Además, el CANedge2 supera al CANUp en un 16,52%. En el promedio general, el ELM327 muestra el mayor consumo con 91,7 g/km, seguido por el CANedge2 con 86,93 g/km y el CANUp con 76,04 g/km. Esto implica una diferencia del 5,48% en comparación con el CANedge2 y del 20,59% respecto al CANUp. Además, se observa que el CANedge2 supera al CANUp en un 14,32%.

Estas diferencias pueden deberse a la naturaleza de las mediciones: el ELM327 se basa en estimaciones de la ECU, mientras que el CANedge2 y el CANUp emplean sensores físicos. Además, el tipo de vía influye significativamente: el tráfico urbano eleva el consumo por las paradas frecuentes, mientras que las autopistas permiten una operación más eficiente del motor.



**Figura 74.** Factor de consumo de Combustible g/km

La Tabla 26 muestra un resumen de los factores de consumo de combustible g/km. Estos valores revelan que el ELM327 registró consistentemente los valores de consumo más altos en todos los tramos: 113,56 g/km en urbano, 118,19 g/km en suburbano y 95,82 g/km en autopista. Le sigue el CANedge2, con valores de 90,05, 83,21 y 74,81 g/km, respectivamente. Finalmente, el CANUp presentó el mejor desempeño, con los niveles de consumo más bajos: 78,91 en urbano, 69,99 en suburbano y 64,2 g/km en autopista.

**Tabla 26.** Resumen factores de consumo de combustible

Equipos	Factor de consumo de combustible (g/km)			
	Sección de ruta			
	Urbano	Suburbano	Autopista	Total
ELM327	113,56	118,19	95,82	91,70
CANEdge2	90,05	83,21	74,81	86,93
CANUp	78,91	69,99	64,20	76,04
Promedio	94,17	90,46	78,27	84,89

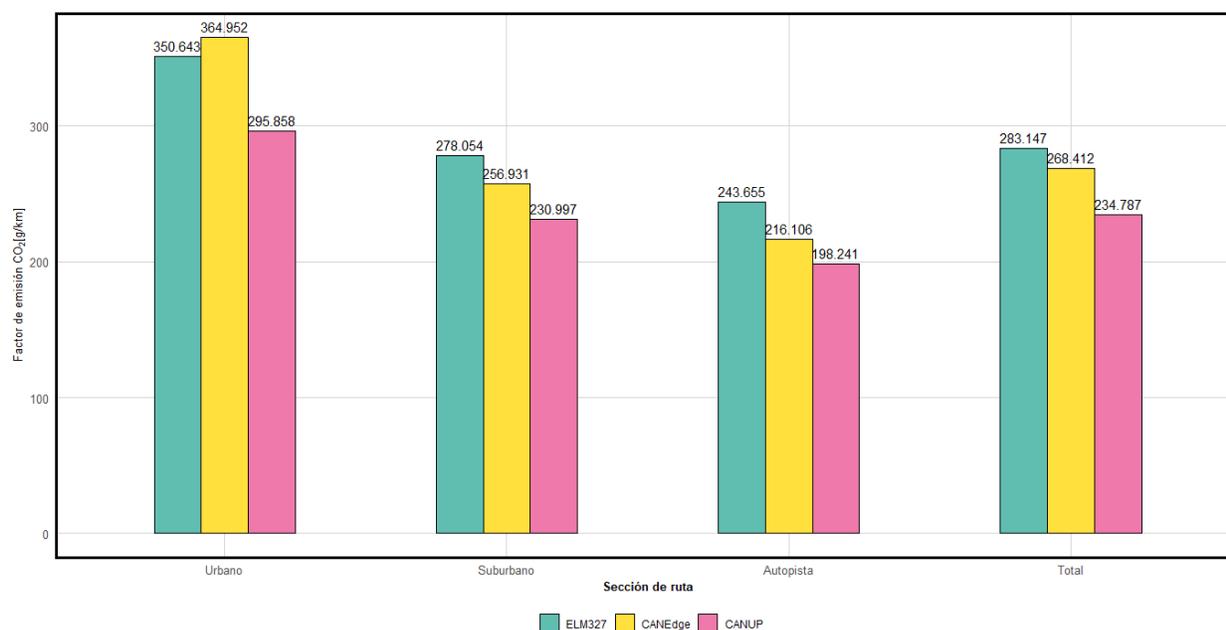
#### 4.7.2. Emisiones de CO<sub>2</sub>

La Figura 75 presenta un gráfico de barras que compara el factor de emisión de CO<sub>2</sub>, expresado en g/km, registrado por los tres dispositivos utilizados. Este análisis se realiza en los diferentes tramos de la ruta evaluada: urbano, suburbano y autopista, e incluye además un promedio general de emisiones en todas las condiciones de operación. En el eje vertical del gráfico se representa el factor de emisión de CO<sub>2</sub>, con valores que oscilan entre 0 y 400 g/km, permitiendo visualizar claramente las diferencias de desempeño entre los dispositivos. En el eje horizontal se muestran

los distintos tipos de tramos: urbano, suburbano y autopista, junto con el valor consolidado del promedio total. El código de color empleado es similar al de la Figura 74: verde para ELM327, amarillo para CANedge2 y rojo para CANUp.

En el tramo urbano, los resultados indican que la unidad telemática CANUp registró las emisiones más bajas, con un valor de 295,858 g/km. En contraste, el CANedge2 y el ELM327 mostraron valores más altos y relativamente similares, con 364,952 y 350,643 g/km, respectivamente. No obstante, el registrador que más se destaca en este tramo es el CANedge2, que supera al ELM327 en un 4,08% y al CANUp en un 23,46%. En el tramo suburbano, se observa una disminución en las emisiones para los tres dispositivos. En esta ocasión, el ELM327 presenta los valores más altos, con 278,054 g/km, mientras que el CANedge2 y la unidad CANUp le siguen con 256,931 y 230,997 g/km, respectivamente. Así, el ELM327 supera al CANedge2 en un 8,22% y al CANUp en un 20,37%. Además, el CANedge2 supera al CANUp en un 11,22%.

El tramo de autopista refleja las emisiones más bajas entre todos los tramos evaluados. Aquí, el CANUp registró el valor mínimo de 198,241 g/km, seguido por el CANedge2 con 216,106 g/km y el ELM327 con 243,665 g/km. Esto evidencia que, en condiciones de conducción más estables, las diferencias entre dispositivos se reducen; sin embargo, el ELM327 continúa mostrando los valores más elevados, superando al CANedge2 en un 12,75%, al CANUp en un 22,91%, como también el CANedge2 supero en un 9,01% al CANUp. Al analizar el promedio general, el registrador ELM327 presentó nuevamente las emisiones más altas, con un valor de 283,147 g/km, seguido por el CANedge2 con 268,412 g/km y el CANUp con 234,787 g/km. Estos resultados revelan que, si bien existen variaciones entre los distintos sistemas de medición, todos reflejan un patrón común: mayores emisiones en el entorno urbano, que disminuyen progresivamente en los tramos suburbanos y de autopista. En términos de diferencia porcentual, el ELM327 se destaca en todos los tramos, superando al CANedge2 en un 5,48%, al CANUp en un 20,59% y en comparación al CANedge2 este supera con 14,32% al CANUp.



**Figura 75.** Factor de emisión de CO<sub>2</sub> por distancia recorrida g/km

La Tabla 27 muestra el resumen de los factores de emisión de CO<sub>2</sub> g/km. Estos valores indican que el CANUP registra las emisiones más bajas en todos los tramos analizados, con 295,858 g/km en el tramo urbano, 230,997 g/km en el suburbano y 198,241 g/km en autopista. Le sigue el ELM327, con valores de 350,643, 278,054 y 243,655 g/km, respectivamente, mientras que el CANedge2 presenta valores intermedios de 364,952, 256,931 y 216,106 g/km. A nivel general, el CANUP reafirma su mejor desempeño con un promedio total de 234,787 g/km, en comparación con los valores más altos registrados por el ELM327 de 283,147 g/km y el CANedge2 con 268.412 g/km. Estos resultados sugieren que, aunque el CANUP es el más preciso y eficiente para estudios de emisiones, su frecuencia de muestreo de cada 5 segundos puede limitar su aplicabilidad en ciertos análisis dinámicos. En ese sentido, el CANedge2 se perfila como una opción más adecuada para estudios comparativos que requieren mayor resolución temporal en la recopilación de datos.

**Tabla 27.** Resumen factores de emisión de CO<sub>2</sub>

Equipos	Factor de emisión CO <sub>2</sub> (g/km)			
	Sección de ruta			
	Urbano	Suburbano	Autopista	Total
ELM327	350,643	278,054	243,655	283,147
CANEdge2	364,952	256,931	216,106	268,412
CANUP	295,858	230,997	198,241	234,787

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- En el presente estudio se llevó a cabo con éxito una campaña experimental con el propósito de medir el consumo de combustible del vehículo Great Wall Wingle 2.4 L bajo condiciones reales de circulación. La campaña se desarrolló en el mes de agosto en la provincia de Imbabura, utilizando una ruta de aproximadamente 35 km dividida en tres tramos claramente diferenciados: urbano, suburbano y autopista. Para la medición del consumo se emplearon tres metodologías complementarias: en primer lugar, se utilizó el dispositivo ELM327, que registró los datos desde la ECU del vehículo a través del protocolo OBD-II; adicionalmente, se utilizó una medición directa mediante dos flujómetros DFM 100ACAN, cuyos datos fueron registrados por dos dispositivos distintos: el CANedge2, con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, y el CANUp, que operó a una frecuencia más alta de 0.2 Hz. Esta combinación de métodos permitió contrastar y validar los datos obtenidos desde la ECU con mediciones físicas de mayor precisión, fortaleciendo así el análisis del comportamiento del vehículo en condiciones reales de operación.
- La tasa de consumo de combustible promedio obtenida a partir de los datos del dispositivo ELM327 fue de 0,70 g/s, superando en aproximadamente un 6 % a la registrada por el CANedge2 y en un 20 % a la registrada por el CANUp. Estas diferencias refuerzan la evidencia de que el ELM327, al basarse en estimaciones proporcionadas por el sistema OBD-II, tiende a sobreestimar el consumo de combustible en comparación con los sistemas de medición directa mediante flujómetros DFM 100ACAN. Adicionalmente, la tasa promedio registrada por el CANedge2 fue alrededor de un 13 % superior a la del CANUp, diferencia que podría estar relacionada con la variación en la frecuencia de muestreo, ya que el CANUp opera a 0,2 Hz mientras que el CANedge2 registra a 1 Hz, lo que puede influir en la forma en que se capturan y procesan los datos.
- Basado en los resultados obtenidos mediante el registrador CANedge2 junto con los sensores de flujo de combustible DFM 100ACAN, se observó que el mayor factor consumo de combustible se presentó en el tramo urbano, con un valor aproximado de 90 g/km, seguido del tramo suburbano con alrededor de 83 g/km, y finalmente el tramo de autopista con aproximadamente 74 g/km. Esta tendencia decreciente es coherente con las características

propias de cada tramo: en el urbano predominan las paradas frecuentes, las aceleraciones constantes y las bajas velocidades, condiciones que incrementan la demanda de combustible. En contraste, en la autopista se mantienen velocidades más estables y eficientes, lo que favorece un menor consumo de combustible.

- A partir del análisis de los mapas de motor, se constató que, independientemente del dispositivo utilizado, el vehículo opera aproximadamente el 50 % del tiempo en el rango más bajo de consumo de combustible, correspondiente a 0,45 g/s. A medida que los intervalos de consumo aumentan, la frecuencia de operación disminuye progresivamente. En particular, se observó que el motor funciona menos del 1 % del tiempo en el rango de consumo más alto, superior a 3 g/s, lo que evidencia que las condiciones de alta demanda de combustible son poco frecuentes durante la operación real registrada.
- En el análisis comparativo de los mapas de motor, se identificó que el registrador ELM327 tiende a reportar un consumo de combustible más elevado en comparación con los otros dos dispositivos. La comparación entre el ELM327 y el CANedge2 mostró una mayor extensión de zonas en color naranja, particularmente bajo condiciones de alto régimen de giro y elevada carga del motor, lo que indica una sobreestimación del consumo por parte del sistema OBD-II. Esta tendencia fue aún más marcada al comparar el ELM327 con el CANUp, donde se observó una predominancia más extensa de zonas en color naranja, reforzando la diferencia entre las estimaciones del OBD-II y las mediciones directas mediante flujómetros. Por su parte, la comparación entre el CANUp y el CANedge2 mostró niveles de consumo similares en zonas neutras del mapa, especialmente bajo condiciones de alta carga y régimen elevado, lo que sugiere una mayor coherencia entre ambos sistemas de medición directa.

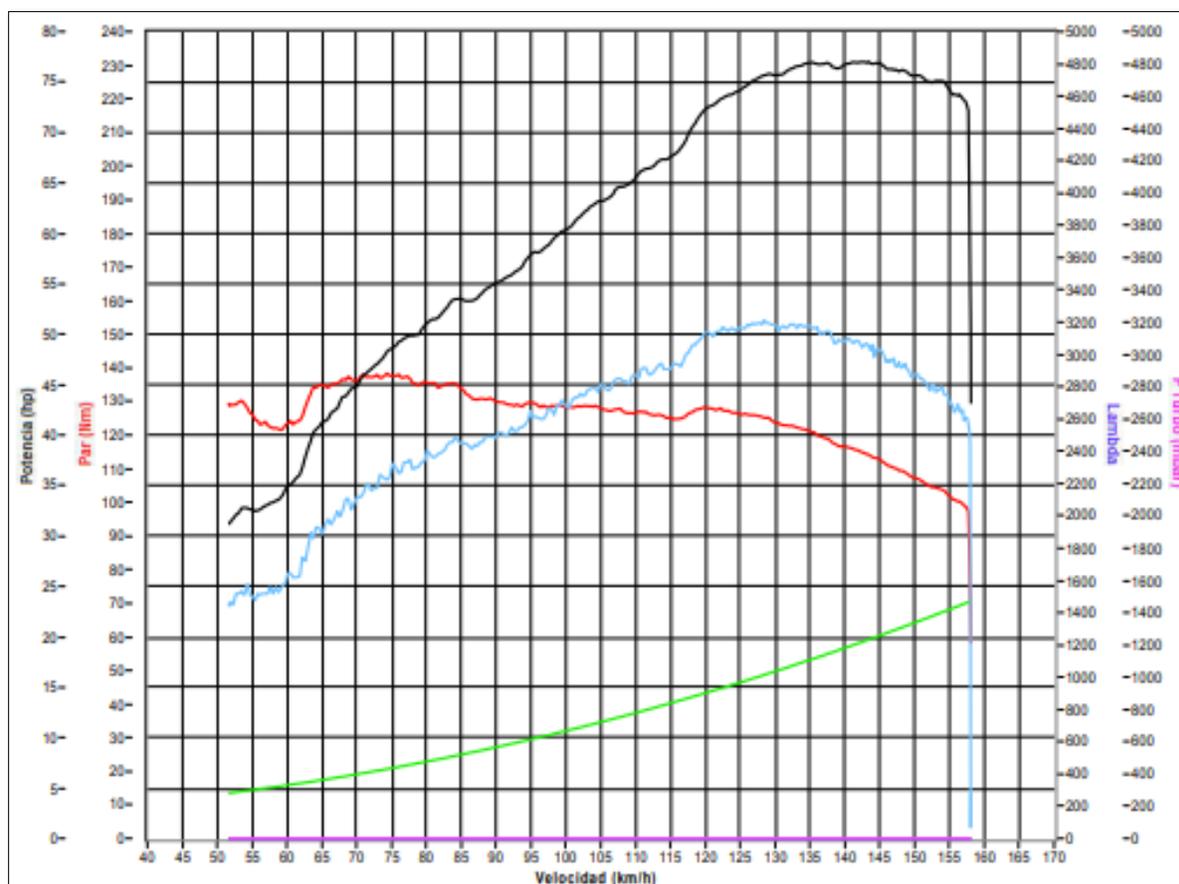
## 5.2. Recomendaciones

- Se sugiere validar los resultados de este estudio mediante la adopción de métodos adicionales de medición física. En particular, el uso del método gravimétrico para comparar la masa del combustible inicial y final podría ofrecer una medición más real del consumo. Además, llevar a cabo análisis de los gases de escape en un laboratorio mientras el vehículo opera en un dinamómetro bajo condiciones controladas permitiría calcular el flujo másico de combustible quemado. Estas medidas contribuirían a corroborar las estimaciones obtenidas a través de la ECU y los flujómetros, aumentando así la fiabilidad de los resultados.

- Si bien en el estudio se analizó el consumo de combustible utilizando dos sensores de flujo con configuraciones adecuadas en la metodología, que permitieron obtener el consumo real segundo a segundo tanto en el suministro como en el retorno, se recomienda considerar el uso de un flujómetro diferencial. Este tipo de flujómetro, que cuenta con dos cámaras para medir el flujo de entrada y salida, podría ofrecer mediciones más precisas en comparación con el dispositivo utilizado en la investigación, que solo dispone de una cámara.
- Si bien en este estudio se analizó el consumo de combustible de un vehículo de categoría M1 (Camionetas) que utiliza gasolina, sería interesante extender este tipo de investigación a otras categorías de vehículos. Esto incluiría vehículos de categoría N1, como camiones medianos y pesados que utilizan diésel, así como maquinaria pesada como el tractor, cuyo combustible se ajusta a la viscosidad cinemática adecuada para el flujómetro. Esto permitiría obtener una comprensión más amplia del consumo de combustible en diferentes tipos de vehículos y condiciones operativas.
- Se recomienda utilizar los datos obtenidos como entrada para desarrollar un modelo empírico de emisiones. Este modelo permitirá estimar el rendimiento del vehículo evaluado en diversas condiciones cinemáticas. Además, Los datos resultantes pueden emplearse para desarrollar un inventario de emisiones basado en datos experimentales obtenidos en el mismo dominio espacial estudiado.
- Se recomienda investigar otros métodos para expresar la carga del motor que vayan más allá de los datos estimados obtenidos a través del OBD. Aunque la carga del motor medida con la interfaz ELM327 a través del puerto OBD-II ha sido esencial para nuestros análisis, considerar enfoques adicionales podría mejorar la precisión de los datos recopilados. Incorporar métodos alternativos, como el uso de sensores de rendimiento o técnicas de monitoreo en tiempo real, proporcionaría una visión más completa del funcionamiento del motor y permitiría un análisis más detallado de cómo varían ciertos parámetros en función de la carga. Esto podría facilitar una mejor comprensión del comportamiento del motor y contribuir a optimizar su rendimiento.

## ANEXOS

## Anexo1: Resultado de la Prueba en el Dinamómetro



Fecha prueba	08/11/24 - 12:08:10
Modelo vehiculo	GREATWALL WINGLE 5
Matricula	IBE 2429
Cliente	KEVIN ROSALES
Operador	CESAR
Cilindrada	2400
Alimentación	Gasolina
Tipo motor	Aspirado
Cuentarrev	Automático
Tracción	Posterior
Temperatura (°C)	26
Presión (mbar)	883
Nombre archivo	241108_120810.dat
Note	

● Potencia al cigüeña	● Potencia a la rueda	● Potencia disipada
● Par motor	● Lambda	● Presion turbo

Potencia max motor	77,0	hp
Potencia max a correspondientes a	4801	rpm
corregido por	143	km/h
factor de corrección	1,000	
Potencia max a la rueda	51,4	hp
Par máximo	138,0	Nm
Par máximo a correspondientes a	74	km/h
correspondientes a	2484	rpm
Presión turbo max	0	mbar
Presión turbo max a correspondientes a	51	km/h
correspondientes a	1717	rpm
Lambda max	1	
Lambda max a correspondientes a	144	km/h
correspondientes a	4821	rpm
Velocidad punta	158	km/h
Número de RPM máximas	5293	rpm

Notas: PRUEBA 2

## Anexo2: Configuración del CANedge2

```

{
  "general": {
    "device": {
      "meta": "RosalesK VilatunaJ"
    },
    "security": {},
    "debug": {
      "syslog": 0,
      "restart_timer": 120
    }
  },
  "log": {
    "file": {
      "split_size": 50,
      "split_time_period": 0,
      "split_time_offset": 0,
      "cyclic": 1
    },
    "compression": {
      "level": 0
    },
    "encryption": {
      "state": 0
    },
    "error_frames": {
      "state": 0
    }
  },
  "rtc": {
    "sync": 3,
    "timezone": -5,
    "adjustment": 0,
    "tolerance": 30,
    "message": {
      "chn": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "0",
      "id_mask": "7FF"
    }
  },
  "valid_signal": {
    "type": 0,
    "byteorder": 1,
    "bitpos": 1,
    "length": 1,
    "factor": 1,
    "offset": 0
  },
  "time_signal": {
    "type": 0,
    "byteorder": 1,
    "bitpos": 8,
    "length": 40,
    "factor": 0.001,
    "offset": 1577840400
  },
  "secondaryport": {
    "power_schedule": []
  },
  "can_internal": {
    "general": {
      "rx_state": 1,
      "tx_state": 1
    },
    "filter": {
      "id": [
        {
          "name": "AllStandardID",
          "state": 1,
          "type": 0,
          "id_format": 0,
          "method": 0,
          "f1": "0",
          "f2": "7FF",
          "prescaler_type": 0
        },
        {
          "name": "AllExtendedID",
          "state": 1,
          "type": 0,
          "id_format": 1,
          "method": 0,
          "f1": "0",
          "f2": "1FFFFFFF",
          "prescaler_type": 0
        }
      ]
    }
  },
  "control": {
    "control_rx_state": 0,
    "control_tx_state": 0,
    "start": {
      "message": {
        "chn": 0,
        "id_format": 0,
        "id": "0",
        "id_mask": "7FF"
      }
    },
    "signal": {
      "type": 0,

```

```

        "byteorder": 0,
        "bitpos": 0,
        "length": 0,
        "factor": 0,
        "offset": 0
    },
    "trigger_high": 0,
    "trigger_low": 0
},
"stop": {
    "message": {
        "chn": 0,
        "id_format": 0,
        "id": "0",
        "id_mask": "7FF"
    },
    "signal": {
        "type": 0,
        "byteorder": 0,
        "bitpos": 0,
        "length": 0,
        "factor": 0,
        "offset": 0
    },
    "trigger_high": 0,
    "trigger_low": 0
}
},
"can_1": {
    "general": {
        "rx_state": 1,
        "tx_state": 1
    },
    "phy": {
        "mode": 0,
        "retransmission": 1,
        "fd_spec": 0,
        "bit_rate_cfg_mode": 1,
        "bit_rate_std": 500000,
        "bit_rate_fd": 1000000
    },
    "filter": {
        "remote_frames": 0,
        "id": [
            {
                "name": "AllStandardID",
                "state": 1,
                "type": 0,
                "id_format": 0,
                "method": 0,
                "f1": "0",
                "f2": "7FF",
                "prescaler_type": 0
            },
            {
                "name": "AllExtendedID",
                "state": 1,
                "type": 0,
                "id_format": 1,
                "method": 0,
                "f1": "0",
                "f2": "1FFFFFFF",
                "prescaler_type": 0
            }
        ]
    },
    "heartbeat": {
        "state": 0,
        "id_format": 1,
        "id": "00435353"
    },
    "control": {
        "control_rx_state": 0,
        "control_tx_state": 0,
        "start": {
            "message": {
                "chn": 1,
                "id_format": 0,
                "id": "0",
                "id_mask": "7FF"
            },
            "signal": {
                "type": 0,
                "byteorder": 0,
                "bitpos": 0,
                "length": 0,
                "factor": 0,
                "offset": 0
            },
            "trigger_high": 0,
            "trigger_low": 0
        },
        "stop": {
            "message": {
                "chn": 1,
                "id_format": 0,
                "id": "0",
                "id_mask": "7FF"
            },
            "signal": {
                "type": 0,
                "byteorder": 0,
                "bitpos": 0,
                "length": 0,
                "factor": 0,
                "prescaler_type": 0
            }
        }
    }
}
}

```

```

        "offset": 0
    },
    "trigger_high": 0,
    "trigger_low": 0
}
},
"can_2": {
    "general": {
        "rx_state": 1,
        "tx_state": 1
    },
    "phy": {
        "mode": 0,
        "retransmission": 1,
        "fd_spec": 0,
        "bit_rate_cfg_mode": 1,
        "bit_rate_std": 250000,
        "bit_rate_fd": 1000000
    },
    "filter": {
        "remote_frames": 0,
        "id": [
            {
                "name": "AllStandardID",
                "state": 1,
                "type": 0,
                "id_format": 0,
                "method": 0,
                "f1": "0",
                "f2": "7FF",
                "prescaler_type": 0
            },
            {
                "name": "AllExtendedID",
                "state": 1,
                "type": 0,
                "id_format": 1,
                "method": 0,
                "f1": "0",
                "f2": "1FFFFFFF",
                "prescaler_type": 0
            }
        ]
    },
    "heartbeat": {
        "state": 0,
        "id_format": 1,
        "id": "00435353"
    },
    "control": {
        "control_rx_state": 0,
        "control_tx_state": 0,
        "start": {
            "message": {
                "chn": 2,
                "id_format": 0,
                "id": "0",
                "id_mask": "7FF"
            },
            "signal": {
                "type": 0,
                "byteorder": 0,
                "bitpos": 0,
                "length": 0,
                "factor": 0,
                "offset": 0
            },
            "trigger_high": 0,
            "trigger_low": 0
        },
        "stop": {
            "message": {
                "chn": 2,
                "id_format": 0,
                "id": "0",
                "id_mask": "7FF"
            },
            "signal": {
                "type": 0,
                "byteorder": 0,
                "bitpos": 0,
                "length": 0,
                "factor": 0,
                "offset": 0
            },
            "trigger_high": 0,
            "trigger_low": 0
        }
    },
    "lin_1": {
        "phy": {
            "mode": 0,
            "bit_rate": 19200
        }
    },
    "lin_2": {
        "phy": {
            "mode": 0,
            "bit_rate": 19200
        }
    },
    "connect": {
        "wifi": {
            "mode": 0,

```

```
"keyformat": 0,
"accesspoint": []
},
"protocol": 0,
"s3": {
  "sync": {
    "ota": 600,
    "heartbeat": 300,
    "logfiles": 1
  }
},
"server": {
  "request_style": 0,
  "keyformat": 0,
  "signed_payload": 0
}
}
```

### Anexo 3: Configuración del CANmod.gps

```

{
  "phy": {
    "can": {
      "phy": {
        "mode": 0,
        "retransmission": 1,
        "bit_rate_cfg_mode": 0,
        "bit_rate_std": 500000,
        "bit_rate_fd": 1000000
      }
    }
  },
  "sensor": {
    "gnss": 5,
    "imu_mount_alignment": {
      "z": 0,
      "y": 0,
      "x": 0
    },
    "dyn_model": 0
  },
  "output": {
    "status": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "01",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "time": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "02",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "position": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "03",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "altitude": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "04",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "attitude": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "05",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "odo": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "06",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "speed": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "07",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "geofence": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "08",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    },
    "imu": {
      "state": 1,
      "id_format": 0,
      "id": "09",
      "trigger": 0,
      "scaler": 1
    }
  }
}

```

## REFERENCIAS

- Álvarez, J. D., & Álvarez, J. L. (2023). *Transformación de un sistema de alimentación de combustible con carburador por un sistema de inyección electrónica en un motor 200 CC*. Universidad del Azuay.
- appa renovables. (2022). *Renovables en el mundo*. <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-en-el-mundo-y-en-europa/#:~:text=En%20conjunto%2C%20el%20uso%20de,primaria%20consumida%20a%20nivel%20mundial>.
- Arboleda, M. E., & Hernández, M. E. (2023). *Análisis del nivel de octanaje en combustibles comercializados en Ecuador y su repercusión en el desempeño del MCI*. Universidad Técnica del Norte.
- Arias, D. E. (2025). *Análisis del consumo de combustible de un vehículo en condiciones de tráfico real a diferentes alturas*. Universidad Técnica del Norte.
- Arias, D. M., & Ladino, M. T. (2018). *Caracterización de las curvas de Presión, Par y Potencia de un motor de combustión interna bajo diferentes regímenes de operación*.
- Arias, E. I., & Ludeña, J. A. (2018). *Estimación del consumo de combustible y niveles de emisiones contaminantes de un vehículo de categoría M1 en rutas con mayor grado de saturación*.
- Arroyo, M. A. (2019). *Análisis del dimensionado de motores para aplicaciones de competición con el código AVL Boost*.
- Arroyo, M., & Ramírez, A. (2020). *Dióxido de carbono, sus dos caras*. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjRvaiN2OmCAxWySjABHbzECMAQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F8109260.pdf&usq=AOvVaw28NHs2AKtRxvhwmMo8RaM7&cshid=1701277481775097&opi=89978449>
- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. (2023). *Anuario 2023*.
- Avalos, G. V. (2020). *Determinación del rendimiento de combustible de una flota de taxis de 1400 cc en la ciudad de Cuenca aplicando técnicas de Ecodriving*. [Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10042>
- Ávila, J. M., Muñoz, A., Montefort, J. M., & Martínez, S. (2005). *Procesos alternativos de combustión en motores de combustión interna*. 15, 36–54.
- Benavides, H. O., & León, G. E. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*.
- Benavides, K. F., & Molina, P. A. (2023). *Análisis de los parámetros de funcionamiento de un motor MPI variando las características de filtrado y tipo de gasolina para mejorar el rendimiento de consumo de combustible mediante ciclo de emisiones reales*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24250/1/TTS1151.pdf>
- Burke, R. D., Brace, C. J., & Hawley, J. G. (2011). Critical evaluation of on-engine fuel consumption measurement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 225(6), 829–844. <https://doi.org/10.1177/0954407010395685>
- Cabrera, R. V., & Cifuentes, V. X. (2009). *Adaptación de un sistema de inyección programable en un vehículo a carburador*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Cao, J., Zhang, J., Chen, Y., Fan, R., Xu, L., Wu, E., Xue, Y., Yang, J., Chen, Y., Yang, B., & Wu, S. (2023). Current status, future prediction and offset potential of fossil fuel CO2

- emissions in China. En *Journal of Cleaner Production* (Vol. 426). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139207>
- Vamag. (2025). *Car Venches*. <https://www.vamag.com/en/pages/1644-car-benches>
- Cárdenas, G. C. (2009). *Las herramientas de software para el análisis cuantitativo de información*. 5.
- Carlos Santiafo Zeas Carillo. (2019). *Implementación de Datos de medición de consumo de combustible*. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9200>
- Carlos Santiafo Zeas Carillo. (2019). *Implementación de un sistema de adquisición y transmisión de datos para la medición de consumo de combustible*. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9200/1/14844.pdf>
- Cely, M. G. (2018). *Influencia de las herramientas de procesamiento de información, en gestión de proyectos eficientes al interior de una organización*.
- Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE). (2015). *Disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos por lo que respecta a la emisión de contaminantes según las necesidades del motor en materia de combustible [2015/ 1038]*. <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29fdocstts.html>
- CSS Electronics. (s/f-a). *Documentación de CANedge2 FW 01.08.01*. Recuperado el 9 de noviembre de 2024, de <https://canlogger.csselectronics.com/canedge-docs/ce2/index.html>
- CSS Electronics. (s/f-b). *Documentación de CANmod.router FW 01.01.01*. Recuperado el 9 de noviembre de 2024, de <https://canlogger.csselectronics.com/canmod-router-docs/specification/specification.html>
- Datasheet ELM327*. (s/f). Recuperado el 9 de noviembre de 2024, de <https://www.datasheet.live/pdfviewer?url=https%3A%2F%2Fpdf.datasheet.live%2Fae89c13%2Felmelectronics.com%2FELM327.pdf>
- Deenapanray, P. N. K., & Khadun, N. A. (2021). Land transport greenhouse gas mitigation scenarios for Mauritius based on modelling transport demand. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100299>
- Diagnostic Tester Diagprog4. (2015, septiembre). *Can Data Logger*. <https://www.diagprog4.com/es/candatalogger#:~:text=Can%20Data%20Logger%20es%20un,tarjeta%20microSD%20en%20tiempo%20real>.
- DieselNet. (2023, agosto). *Emissions Standars*. <https://dieselnet.com/standards/eu/ghg.php>
- Echaiz, C. A. (2019). *Seminario de tesis III*.
- Forehead, H., & Huynh, N. (2018). Review of modelling air pollution from traffic at street-level - The state of the science. En *Environmental Pollution* (Vol. 241, pp. 775–786). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.019>
- Figueroa Salgado, S. J., & Araque Maldonado, J. O. (2005). *El proceso de combustión en motores de combustión interna* (1ra ed.). Universidad de los Andes.
- García, J. (2015). *Evaluación del consumo y de las emisiones contaminantes de un vehículo mediante Smartphones*. <https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/23241/TFG%20García%20Gómez%202015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Garrido, M. G. (1999). *Estudio de velocidades*.
- Great Wall. (2019). *Ficha Técnica Wingle 5*. file:///C:/Users/User/Downloads/pdf-wingle-5-grat-wall-ficha\_compress.pdf
- Guerrero, J. C., & Nieto, L. G. (2018). *Tecnologías que favorecen la eficiencia energética del motor de gasolina*. <https://goo.gl/XCpzYa>

- Hidalgo, I., & Veintimilla, V. (2021). *Propuesta de estudio para el modelado térmico en motores de combustión interna alternativos*. Universidad Politécnica Salesiana.
- ICM. (2021). *Emisiones del transporte*. [https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2021/10/COP26-T9\\_Transporte\\_final.pdf](https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2021/10/COP26-T9_Transporte_final.pdf)
- INEC. (2022). *Anuario de Estadísticas de Transporte 2022*.
- INEN. (2012). *NTE INEN 935:2012*. <https://es.scribd.com/document/633017778/935-8-Gasolina>
- Influx Technology. (2021, junio 23). *Data loggers and their Importance*. <https://www.influxtechnology.com/post/data-loggers-and-their-importance>
- International Standard ISO 1585*. (1992).
- Isizán, K., & Vallejo, D. (2023). *Caracterización de los perfiles de conducción y la operación del motor del motor en taxis con el uso de equipos ON-BOARD*. Universidad Técnica del Norte.
- Iván, D., & Palacios, B. (2021). *Metodología de estimación de consumo de combustible y mapa de motor*. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10887>
- Iván David Villamar Aguirre. (2008). *Estudio y análisis de los sistemas de diagnóstico en los automóviles moderno, sistemas OBD*. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiSydbIyauDaxW6LUQIHYLgD6MQFnoECCAQAQ&url=https%3A%2F%2Fdspace.uazuay.edu.ec%2Fbitstream%2Fdatos%2F208%2F1%2F07031.pdf&usg=AOvVaw1SRZuEIDMGhQVH11LrTthw&csid=1703541321446284&opi=89978449>
- Jiménez, E. J., & Cárdenas, J. S. (2023). *Modelo paramétrico para la estimación de emisiones contaminantes en vehículos MI ciclo OTTO con OBD-II*.
- Jiménez, J. U. (2019). *Introducción a R y RStudio*. Universidad Tecnológica de Panamá.
- Kan, Z., Tang, L., Kwan, M. P., Ren, C., Liu, D., Pei, T., Liu, Y., Deng, M., & Li, Q. (2018). Fine-grained analysis on fuel-consumption and emission from vehicles trace. *Journal of Cleaner Production*, 203, 340–352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.222>
- Laboratorio de ciencias básicas. (2022).
- Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina*. (2002). <https://ia802909.us.archive.org/12/items/ec.nte.2204.2002/ec.nte.2204.2002.pdf>
- Lizano, C. D. (2017). *Diseño y construcción de la estructura tubular para la carrocería del prototipo de un auto eléctrico biplaza UTA-CIMI7*.
- Loza, C. P., Quishpe, H. S., & Rubio, J. C. (2022). Análisis de las Normativas INEN de Ecuador y Euro de la Comunidad Europea, en cuanto a las consideraciones Técnicas y Procedimientos para la medición de las emisiones de gases contaminantes de los vehículos. *Polo del Conocimiento*, 7, 468–494.
- Madrazo, M. O. (2017). *Visión global del efecto invernadero*.
- Martínez, Á. L. (2020). *Desarrollo de un motor de combustión interna de 2065 kW, trabajando con biogás*.
- Martínez, A., Lanz, A., García, M., Velásquez, A., & Martínez, J. (2012). *Motores OTTO de 4 tiempos*. <https://www.mecanicoautomotriz.org/517-manual-mecanica-automotriz-motores-otto-4tiempos>
- Matínez, J. C. (2020). *Análisis de emisiones en vehículos a gasolina mediante ciclos de prueba estático y dinámico en procesos de revisión técnica vehicular*.
- Meredith. (2020, marzo 3). *How Data Loggers Are Used in Different Industries*. <https://www.madgetech.com/posts/blogs/how-data-loggers-are-used-in-different-industries/>
- Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Balance energético nacional*. <https://www.rekursyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/wp-1692740456472.pdf>

- Modet, R., & Caro, M. (2021). *Modelos de Machine Learning para la estimación del consumo de combustible en vehículos*.  
[https://oa.upm.es/69955/3/TFG\\_RAQUEL\\_MODET\\_MARTIN\\_CARO.pdf](https://oa.upm.es/69955/3/TFG_RAQUEL_MODET_MARTIN_CARO.pdf)
- Morocho, P. S. (2014). *Determinación del porcentaje de restricción de flujo de gas en el colector de escape de un motor de combustión interna del vehículo Mazda B2200*.  
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5699/1/UPS-CT002796.pdf>
- Muñoz, D. A. (2020). *Automóviles*.
- Nagmanflow. (2023, julio 23). *The Importance of Flow Meter Calibration: Ensuring Accurate and Reliable Measurements*. <https://nagmanflow.medium.com/the-importance-of-flow-meter-calibration-ensuring-accurate-and-reliable-measurements-bdfb0329052c>
- Navixy. (2023, marzo 18). *Medidores de flujo de combustible*.  
<https://www.navixy.com/es/docs/academy/fuel-control/fuel-flow-meter/>
- Noregon. (2020, febrero 3). *What Does OBD Stand For*.
- Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2204. (2002).
- Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2656. (2016).
- Noroña, M. V., Jerez, D. A., Loor, C. M., & Gómez, M. F. (2023). *Estimación del consumo de combustible en un vehículo Ford Explorer aplicando la técnica Ecodriving en la ciudad de Guayaquil*.  
<https://ojs.southfloridapublishing.com/ojs/index.php/jdev/article/view/2427/1942>
- Nuninge, O. (2018). *Evaluación y comparación de métodos de medición de consumo de combustible para laboratorio y ruta de un vehículo liviano*.  
<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/2f121664-83f4-48db-bfee-bdc78508589a/content>
- Núñez, C. S. (2018). *Estudio de emisiones de gases en vehículos a gasolina*.
- Ortiz, J. M. (2020). *Estudio comparativo de eficiencia e impacto ambiental del GLP como combustible para autobuses urbanos*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía.
- Pasquale, C., Sacone, S., Siri, S., & Ferrara, A. (2019). Traffic control for freeway networks with sustainability-related objectives: Review and future challenges. En *Annual Reviews in Control* (Vol. 48, pp. 312–324). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.07.002>
- Pavlovic, J., Fontaras, G., Broekaert, S., Ciuffo, B., Ktistakis, M. A., & Grigoratos, T. (2021). How accurately can we measure vehicle fuel consumption in real world operation? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90.  
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102666>
- Payri González, Francisco., & Desantes Fernández, J. M. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Universitat Politècnica de València.
- Piusi. (2020, junio 26). *Flow meter calibration*. <https://www.piusi.com/usa/news/flow-meter-calibration>
- Plan-de-Creación-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado*. (2021).
- Ramírez, D. A. (2014). *Cuantificación de la reducción del consumo de combustible en el proyecto de eficiencia energética en el sector transporte, bajo un protocolo estándar, y evaluación de la costo efectividad de dos herramientas de estimación de ahorros*. Universidad de Chile.
- Rockwood Iglesias, Robert Esteban Yupanqui Taipe, & David Eduardo. (2020). *Determinación del rendimiento de combustible de una flota de taxis de 1400 centímetros cúbicos en la*

- ciudad de Cuenca mediante parámetros de conducción normal*. [Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10159>
- Romero, Y. L., & Rivera, R. A. (2005). *Control del sistema de inyección de un motor a gasolina*. Universidad del Azuay.
- Rosero, F., Fonseca, N., López, J. M., & Casanova, J. (2020). Real-world fuel efficiency and emissions from an urban diesel bus engine under transient operating conditions. *Applied Energy*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114442>
- Rosero Obando, 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>
- Rovira de Antonio, Antonio., & Muñoz Domínguez, Marta. (2015). *Motores de combustión interna*. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Sanchez, L. P., & Zúñiga, A. P. (2018). *Análisis de la contaminación de gases de vehículos tipo L1 y L3, mediante el muestreo de emisiones para la determinación de niveles de contaminación en la ciudad de Loja*.
- Santos, M. C. (2018). *Análisis de la evolución del diseño del automóvil desde sus inicios hasta la actualidad*.
- Seo, J., Park, J., Park, J., & Park, S. (2021). Emission factor development for light-duty vehicles based on real-world emissions using emission map-based simulation. *Environmental Pollution*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116081>
- Smith, G. M. (2023, febrero 23). *Data logger - Funcionamiento*. <https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-data-logger>
- Soca, J. R. (2022). *Clasificación de automóviles*. <https://www.researchgate.net/publication/362680674>
- Tapia, P., Tigre, V., & Torres, F. (2017). Determinación del consumo de combustible de vehículos en base a los ciclos de conducción EPA FTP75 y EPA HWFET, en dinamómetro de chasis. *Infociencia*, 11.
- Technoton. (s/f-a). *Manual de instrucciones CANUp 27 Standard / Pro / Genset*.
- Technoton. (s/f-b). *Medidores de flujo de combustible MEDIDORES DFM 50/90/100/220/250/500*.
- Technoton. (2000). *Medidores de flujo de combustible*.
- Universidad de Cataluña. (2023). *Herramientas de análisis de datos*. Universidad de Cataluña. <https://www.ucatalunya.edu.co/blog/las-mejores-herramientas-de-analisis-de-datos-y-su-importancia-para-la-toma-de-decisiones>
- Wang, J., Wang, R., Yin, H., Wang, Y., Wang, H., He, C., Liang, J., He, D., Yin, H., & He, K. (2022). Assessing heavy-duty vehicles (HDVs) on-road NOx emission in China from on-board diagnostics (OBD) remote report data. *Science of the Total Environment*, 846. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157209>
- Yang, Z., Liu, Y., Wu, L., Martinet, S., Zhang, Y., Andre, M., & Mao, H. (2020). Real-world gaseous emission characteristics of Euro 6b light-duty gasoline- and diesel-fueled vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.102215>
- Zhou, M., Jin, H., & Wang, W. (2016). A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 49, 203–218. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.09.008>

Zhou, Y., Chen, X., Tan, X., Liu, C., Zhang, S., Yang, F., Zhou, W., & Huang, H. (2018). Mechanism of CO<sub>2</sub> Emission Reduction by Global Energy Interconnection. *Global Energy Interconnection*, 1(4), 409–419. <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.04.001>