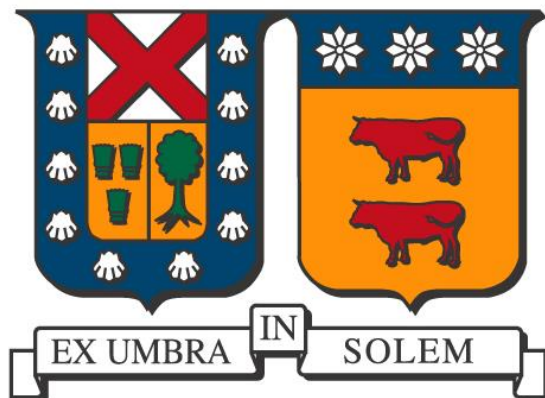


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SAN JOAQUÍN – CHILE**



**“Análisis técnico y regulatorio para la homologación de vehículos
mediante sistema de monitoreo de emisiones portátiles en Chile”**

NICOLÁS IGNACIO BRAVO DÍAZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MAURICIO OSSES ALVARADO

PROFESOR CORREFERENTE: MSC. SEBASTIÁN TOLVETT CARO

2019

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi familia, principalmente a mis padres que sin su sacrificio no podría estar celebrando este momento. Quiero decirles que, pese a su trabajo, los turnos y los días que no pudieron acompañarme por ello, los amo y les agradezco por siempre mostrar interés en lo que hago.

Le agradezco a mi Nona y a mi Tata, quienes me acogieron como su quinto hijo en los momentos que mis padres no pudieron estar, todos los recuerdos, las vacaciones en el sur, las enseñanzas y los valores que me inculcaron, gracias por todo. También agradecerle a mi tío Rodolfo y tía Carmen, quienes, pese a que no se llevan bien, son parte importante de mi vida y cada uno me acompaña a su manera.

Doy gracias a mis amigos, aquellos del colegio que me acompañaron desde kínder y a los que descubrí en ese electivo biólogo. A mis amigos de la Universidad, que sin ellos no habría podido entender la materia ni haber disfrutado tanto estos años, les agradezco todas esas discusiones y encontrones que tuvimos por entender los ramos de forma diferente. A todos ustedes, que nos conocimos de formas diferentes y que seguramente me encontraban callado al comienzo, solo quiero decirles que los quiero demasiado.

Agradecer al equipo de la UTFSM, particularmente al Profesor Danilo y Adolfo, por el apoyo y el trabajo que realizamos en el desarrollo de la VAM. También agradecer a todo el equipo de la UTEM, quienes me acogieron y compartimos varias jornadas de medición. En especial, le agradezco al Profesor Mauricio, al Profesor Sebastián y a Kevin por ese viaje a USA donde vi por primera vez lo que implicaba este trabajo y lo motivante que es.

Finalmente agradecer a CONICYT por la oportunidad única que le entrego al equipo mediante este proyecto FONDEF IDeA I+D, cuyo código es ID18I10297, donde se financia una herramienta prometedora en el control de las emisiones vehiculares, la cual en un futuro marcará la diferencia a nivel nacional y regional en lo que refiere al proceso de homologación vehicular.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de título a las personas que me acompañan desde pequeño, que me criaron y vieron crecer, a todos aquellos que metieron mano, me retaron y enseñaron, a mi Madre, Padre y Tata. En especial se lo dedico a mi Nona, quien me acompañó lo más que pudo y se lo agradezco todos los días. Los amo a todos.

Resumen

El proceso de homologación vehicular corresponde a la única barrera que interpone un país durante la internación de un vehículo, la robustez de este proceso es vital para diferenciar aquellos modelos menos contaminantes o más seguros, recordando que el proceso de homologación vela tanto por la seguridad de los pasajeros como por el medio ambiente. El presente trabajo de título tiene como objetivo evaluar la aplicabilidad a nivel técnico y regulatorio de normativas internacionales referente a la homologación de vehículos al implementar sistemas de monitoreo de emisiones portátiles en Chile, dado que dicho procedimiento es internacionalmente aclamado por su versatilidad y capacidad de identificar vehículos con comportamientos anómalos.

Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto CONICYT FONDEF IDeA I+D ID18I10297, cuyo título es “Sistema de medición en ruta de emisiones contaminantes y actividad vehicular”, donde la Universidad Técnica Federico Santa María y la Universidad Tecnológica Metropolitana figuran como entidades beneficiarias. Para efectos de este proyecto, la Universidad Tecnológica Metropolitana funcionará como laboratorio central, proporcionando personal calificado en el uso de los sistemas de emisiones portátiles y sus dependencias para conducir los diferentes ensayos de conducción en ruta.

Como resultado de este trabajo se tiene el desarrollo de un protocolo de medición actualizado a las diferentes normativas internacionales y adaptado a los diversos equipos de medición disponibles por parte del equipo de trabajo. Este protocolo cuenta con las siguientes cinco fases: Diseño de la prueba, Preparación previa, Realización de la prueba, Post procesamiento de los datos y el Análisis final de los datos. Cada una de ellas se encuentra explicada en detalle y se proporciona una lista compacta con el procedimiento. Dicho protocolo fue probado exitosamente con una medición en ruta donde se consideran todos los contaminantes disponibles para medir, tanto gaseosos como material particulado, además de registrar la actividad vehicular con un dispositivo diseñado y construido por personal del proyecto FONDEF. Se finaliza con una muestra del análisis de resultados de emisiones en ruta, utilizando diversas herramientas gráficas para visualizar de diferentes formas las emisiones vehiculares.

Al final de este trabajo se presentan las conclusiones sobre el análisis presentado, tanto a nivel técnico como regulatorio que responden a la factibilidad de implementación a nivel nacional de dicha técnica, junto a las conclusiones propias de la puesta en práctica de un protocolo de muestreo en condiciones reales de conducción y recomendaciones de posibles trabajos complementarios.

Palabras clave: Emisiones en condiciones reales de conducción, sistema portátil de medición de emisiones, contaminantes gaseosos, material particulado, actividad vehicular.

Abstract

The vehicle homologation process corresponds to the only barrier that a country interposes during the internment of a vehicle, the robustness of this process is vital to differentiate those less polluting or safer models, remembering that the homologation process ensures both the safety of the passengers as per the environment. The purpose of this work is to evaluate the applicability at a technical and regulatory level of international regulations regarding the homologation of vehicles when implementing portable emission measurement systems in Chile, given that said procedure is internationally acclaimed for its versatility and ability to identify vehicles with anomalous behaviors.

This work is carried out within the framework of the CONICYT FONDEF IDeA R&D ID18I10297 project, whose title is “System for measuring pollutant emissions and vehicular activity route”, where the Technical University Federico Santa María and the Metropolitan Technological University are listed as beneficiary entities. For the purposes of this project, the Metropolitan Technological University will function as a central laboratory, providing qualified personnel in the use of portable emission systems and their dependencies to conduct the different road driving tests.

As a result of this work there is the development of a measurement protocol updated to the different international regulations and adapted to the various measurement equipment available by the work team. This protocol has the following five phases: Test design, Pre-preparation, Testing, Post data processing and Final data analysis. Each of them is explained in detail and a compact list is provided with the procedure. This protocol was successfully tested with an on-route measurement with all the contaminants available to measure, both gaseous and particulate material were considered, in addition to recording the vehicle activity with a device designed and built by FONDEF project personnel. It ends with a sample of the analysis of the results of on-route emissions, using various graphic tools to visualize vehicle emissions in different ways.

At the end of this work, the conclusions on the analysis are presented, both at a technical and regulatory level that respond to the feasibility of implementing this technique at the national level, alongside with the conclusions of the implementation of a sampling protocol in real driving conditions and recommendations of possible complementary works.

Keywords: Real driving emissions, portable emission measurement system, gaseous pollutants, particulate matter, vehicular activity.

Glosario

CAA	Clean Air Act
CARB	California Air Resources Board
CFR	Código de Regulación Federal
CH ₄	Metano
CLD	Detectores de quimioluminiscencia
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
DPF	Diesel Particle Filter
DTO	Decreto
ECU	Engine Control Unit
EFM	Exhaust Flow Meter
EPA	Environmental Protection Agency
EURO	Normativa Europea sobre emisiones vehiculares
FCpollutant	Factor de conformidad del contaminante
FID	Detector de ionización de flama
FTP	Federal Test Procedure
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
HC	Hidrocarburos
HCHO	Emisiones de formaldehído
HFID	Detector calentado de ionización de flama
HWFET	Highway Fuel Economy Test
ISC	In Service Conformity
LDV	Light Duty Vehicle
LEV	Low Emission Vehicle
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
MR	Masa de Referencia
MTT	Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones
NDIR	Sensores infrarrojos no dispersivos
NDUV	Sensores ultravioletas no dispersivos
NEDC	New European Driving Cycle
NH ₃	Amoniaco

NMOG	Compuestos orgánicos distintos del metano
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
NTE	Not To Exceed
OBD	On-board diagnostics
PEMS	Portable Emissions Measurement System
PM	Particulate Matter
PN	Particle Number
PNM	Peso Neto de Marcha
RDE	Real Driving Emissions
SC03	Ciclo suplementario, conducción con aire acondicionado
SCR	Selective Catalytic Reduction
TA	Type approval
THC	Hidrocarburos Totales
UE	Unión Europea
US06	Ciclo suplementario, conducción agresiva y a alta velocidad
VAM	Vehicle Activity Monitor
VLP	Vehículo Liviano de Pasajeros
VOC	Compuestos Orgánicos Volátil
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
3CV	Centro de Control y Certificación Vehicular

Tabla de contenidos

Introducción	XIV
Objetivos	XVI
Objetivo General	XVI
Objetivos Específicos	XVI
1. Estado del Arte	1
1.1. Normativa Internacional.....	1
1.1.1. Norma Europea	1
1.1.2. Norma Estadounidense (EPA y CARB).....	8
1.2. Normativa Nacional	15
1.3. Sistema PEMS.....	20
1.3.1. Consideraciones de los equipos.....	20
1.3.2. Discusión internacional	25
2. Metodología	28
2.1. Fases e hitos por objetivo	28
2.2. Equipos utilizados	30
3. Protocolo de medición PEMS	36
3.1. Diseño de la prueba	37
3.2. Preparación previa.....	41
3.3. Realización de la prueba	44
3.4. Post procesado de datos.....	45
3.4.1. Tratamiento inicial	45
3.4.2. Correcciones generales.....	46
3.4.3. Obtención de emisiones instantáneas	48
3.4.4. Caracterización por zonas de emisión	49
3.4.5. Unificación de datos.....	50
3.5. Análisis de los datos.....	51
4. Mediciones experimentales	52
4.1. Jornada de medición.....	53
4.2. Análisis de resultados.....	56
5. Conclusiones	64
5.1. Conclusiones Generales	64
5.2. Conclusiones Específicas	65
5.3. Recomendaciones.....	68
Referencias	70
Anexos.....	73

Lista de figuras

Figura 1.1: Gráfica de velocidades del ciclo de prueba WLTC a través del tiempo. Extraído de [4].	5
Figura 1.2: Programa de conformidad USEPA. Extraído de [7].	9
Figura 1.3: Distribución de las etapas del FTP-75, velocidad en función del tiempo. Extraído de [11].	11
Figura 1.4: Ciclo suplementario US06, conducción agresiva y a alta velocidad. Duración 596 [s], velocidad máxima 80 [mph] (128,8 [km/h]). Extraído de [12].	12
Figura 1.5: Ciclo suplementario SC03, impacto del sistema de aire acondicionado. Duración 596 [s], distancia recorrida 3,58 [mi] (5,56 [km]). Extraído de [13].	12
Figura 1.6: Ciclo de prueba HWFET, economía de combustible en autopista. Duración 765 [s], distancia recorrida 10,26 [mi] (16,45 [km]). Extraído de [14].	13
Figura 3.1: Metodología general aplicada en ensayos de emisiones en ruta RDE.	36
Figura 3.2: Preparación de los sistemas de medición previo al montaje al interior del vehículo, revisión de los analizadores, filtros y calibración.	41
Figura 3.3: Montaje de los equipos de medición al interior del vehículo junto a las líneas de muestreo, alimentación y conexión. Las baterías (no visibles en la figura) se posicionan en la parte posterior de los equipos.	42
Figura 3.4: Montaje finalizado, se aprecia la sonda de muestreo en el parabrisas trasero, de donde se alimentan todos los sensores de emisiones con sus respectivas líneas.	44
Figura 3.5: Ejemplo comparativo del cambio en la linealidad del analizador al ser muestreado con la misma señal, al inicio y fin de la prueba (calibración y auditoria respectivamente).	47
Figura 4.1: Trayecto completo de prueba de conducción a alta velocidad. Creado mediante GPS Visualizer [37].	55
Figura 4.2: Distribución real de velocidad de circulación en función de la distancia recorrida durante la prueba.	56
Figura 4.3: Emisión instantánea y acumulada (total) de CO ₂ registrado durante la jornada. Se presentan los valores corregidos por la deriva del analizador.	57
Figura 4.4: Emisión instantánea de CO ₂ en función de la velocidad de circulación del vehículo.	57
Figura 4.5: Emisión instantánea de CO ₂ en función de la elevación georreferencial del vehículo.	58

Figura 4.6: Ruta de ida al punto de retorno ubicado en la salida Gabriela de la autopista Acceso Sur, comuna de La Pintana. Generado por GPS Visualizer [37], obtenido de Google Earth [38].	59
Figura 4.7: Ruta de regreso al laboratorio de la UTEM, ubicado en la comuna de Ñuñoa. Generado por GPS Visualizer [37], obtenido de Google Earth [38].	59
Figura 4.8: Gráfica de la emisión instantánea y acumulada de NO _x en función del tiempo.	61
Figura 4.9: Gráfica de la emisión instantánea y acumulada de CO en función del tiempo.....	61
Figura 4.10: Emisiones de contaminantes locales en función de la velocidad de circulación.	62
Figura 4.11: Gráfica comparativa entre los valores de emisiones declarados durante la homologación en el 3CV, los valores máximos permitidos por la normativa Euro 5a y los valores registrados durante la prueba de conducción real RDE Chile. * los valores de MP presentan un factor 10x; ** los valores de CO ₂ presentan un factor 0,001x.....	62

Lista de tablas

Tabla 1.1: Valores de masa para vehículos ligeros. Norma europea.....	2
Tabla 1.2: Estándares de emisión de la norma EURO 6 para vehículos ligeros, para pruebas en dinamómetro de chasis. Modificada de [2].	3
Tabla 1.3: Parámetros clave al comparar el ciclo NEDC con el WLTP. Modificado de [4].	5
Tabla 1.4: Velocidades de ensayo RDE.	7
Tabla 1.5: Niveles de emisión permitidos por los estándares Tier 3 y LEV III. Modificada de [8].	10
Tabla 1.6: Parámetros clave del régimen de prueba FTP. Modificado de [10].	11
Tabla 1.7: Clasificación de vehículo comercial liviano según DTO - 211/1991 MTT [16].	15
Tabla 1.8: Límites de emisión estipulados en DTO– 29/2012 MMA , EPA. Modificado de [17].	16
Tabla 1.9: Límites de emisión estipulados en DTO– 29/2012 MMA, EURO. Modificado de [17].	16
Tabla 1.10: Límites de emisión estipulados en DTO– 29/2012 MMA, EPA. Modificado de [17]. ..	16
Tabla 1.11: Límites de emisión estipulados en DTO– 29/2012 MMA, EURO. Modificado de [17].	17
Tabla 1.12: Límites de emisión estipulados en DTO – 211/1991 MTT, Euro 6b y Euro 6c, Peso Bruto Vehicular < 2.700 [kg]. Modificado de [16].	17
Tabla 1.13: Límites de emisión estipulados en DTO – 211/1991 MTT, Euro 6b y Euro 6c, Peso Bruto Vehicular < 2.700 [kg]. Modificado de [16].	17
Tabla 1.14: Límites de emisión estipulados en DTO – 211/1991 MTT, USEPA, Peso Bruto Vehicular < 2.700 [kg]. Modificado de [16].	18
Tabla 1.15: Deriva admisible del analizador durante ensayo PEMS. Extraído de [5].	24
Tabla 2.1: Especificaciones equipos SEMTECH – D y G. Modificado de [34] y [35]. Los valores propios de cada equipo se presentan con su distintivo característico.....	30
Tabla 2.2: Concentraciones de gases utilizadas durante el proceso de calibración y auditoria. Se adjunta el valor recomendado por el fabricante entre paréntesis a la derecha del valor utilizado. Modificado de [34] y [35].	33
Tabla 2.3: Especificaciones generales del equipo DEKATI DMM - 230. Modificado de [36].	33
Tabla 2.4: Resumen de las características generales de la unidad VAM utilizada.	34

Tabla 3.1: Variables de estudio en pruebas de conducción en ruta RDE. Extraído de [5].....	38
Tabla 3.2: Masas molares de contaminantes comunes. Obtenido de [42].....	49
Tabla 3.3: Aproximación utilizada para obtener la masa molar de los gases de escape cuando no se dispone de la información segundo a segundo. Extraído de [43].....	49
Tabla 4.1: Características técnicas vehículo de prueba, extraído de [44]. Valores de homologación vehicular a cargo del Centro de Control y Certificación Vehicular 3CV [45], extraído de [46].	52
Tabla 4.2: Características generales de las rutas contempladas. El valor de elevación corresponde a altura geo referencial.	53
Tabla 4.3: Variables seleccionadas para controlar durante la prueba. Modificado de la Tabla 3.1. .	54

Introducción

Dentro de los sectores más contaminantes a nivel atmosférico sobresalen la industria manufacturera, las centrales termoeléctricas, el sector de transporte y la agricultura. Cada uno de ellos contribuye con diferentes contaminantes, en algunos predominan aquellos que afectan la calidad del aire a nivel local (e.g. óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, ozono troposférico, material particulado fino), mientras que otros sectores emiten en mayor cantidad los gases de efecto invernadero (e.g. dióxido de carbono, metano). El desarrollo de este trabajo se enfocará en el sector transporte, específicamente, en los mecanismos de homologación para vehículos ligeros a nivel nacional, ya que este sector contribuye de forma considerable a la contaminación atmosférica.

Durante el último tiempo, diversos estudios han demostrado que existe una diferencia alarmante entre el valor declarado de emisiones contaminantes liberadas y la cantidad real de emisiones que un automóvil emite en condiciones reales de operación. De esta situación destaca el denominado “Dieselgate” que involucro a la compañía fabricante de automóviles Volkswagen, la cual mediante un dispositivo “trampa” (Defeat Device) instalado en sus vehículos diésel alteraba la eficacia de los mecanismos de control de emisiones instalados. Esto llevo a que se registraran emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) hasta 7 veces el valor límite estipulado por la norma. Esto combinado con reportes de la pobre calidad del aire a través de todo el mundo y un mejor entendimiento de como los contaminantes afectan a la salud de la población, plantea un escenario donde las naciones deben mejorar sus planes de control y monitoreo de emisiones, implementando mejores tecnologías de medición y actualizando constantemente los inventarios de emisiones.

En el ámbito nacional, la definición de estos estándares de emisión y métodos de homologación vienen de la experiencia de casos internacionales, actualmente basándose en una mezcla de la normativa Europea y de Estados Unidos. Esta mezcla poco común se ocasiona producto que se le permite a los fabricantes homologar sus vehículos mediante el método que ellos definan. Resultando en un proceso engorroso y poco claro a veces. Además, se están aplicando estándares obsoletos o incompletos, lo cual aumenta la urgencia de implementar un sistema nacional moderno, actualizado, robusto y estricto, que nos permita identificar anomalías en los vehículos que deseen comercializarse a nivel nacional con el fin de prohibir su ingreso y así disminuir la tasa de contaminación atmosférica que sufrimos.

Dentro de los regímenes de prueba de emisiones nace el análisis en condiciones reales de operación, el cual, mediante equipos de medición diseñados para ser utilizados fuera de las condiciones de laboratorio, permite caracterizar el comportamiento real del vehículo junto con la eficacia de los

sistemas de abatimiento. Este tipo de procedimiento se encuentra en una etapa temprana de implementación a gran escala, siendo la Unión Europea pioneros en ello con su normativa EURO 6.

Dado esto se identifica la oportunidad de desarrollar una nueva normativa nacional, recopilando información de las normas existentes ya probadas en otros países, pero teniendo el resguardo de realizar una correcta fusión, adoptando los elementos más robustos y transformándonos en el primer país de la región en implementar un sistema de monitoreo de emisiones portátiles PEMS. Este trabajo representa un reto regulatorio y técnico, la primera parte apoyada de una revisión exhaustiva de las normas, identificando parámetros clave que pueden ser adaptados a la realidad nacional y asegurarse que estos permitan el mejoramiento continuo de la normativa una vez que los avances tecnológicos lo permitan. El análisis técnico estará apoyado por el desarrollo del proyecto FONDEF código ID18I10297 que busca diseñar e implementar un sistema de medición de emisiones vehiculares en ruta de bajo costo, capaz de registrar emisiones de gases y partículas, esto mediante la integración de analizadores y medidores comerciales que cumplan con las condiciones técnicas y económicas requeridas a nivel nacional, acompañado de un protocolo de procesamiento de datos y reporte de resultados acorde a normativas internacionales adaptadas a Chile.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la aplicabilidad a nivel técnico y regulatorio de normativas internacionales referente a la homologación de vehículos al implementar sistemas de monitoreo de emisiones portátiles en Chile.

Objetivos Específicos

- Identificar la aplicabilidad de las normativas internacionales en Chile en relación con el monitoreo en ruta con PEMS.
- Proponer un protocolo para la medición de emisiones en ruta mediante el sistema PEMS.
- Realizar mediciones experimentales que permitan validar en terreno el protocolo propuesto mediante mediciones con PEMS.
- Analizar el acondicionamiento del sistema PEMS para gases y material particulado.

1. Estado del Arte

En el siguiente capítulo se analizan las mediciones de emisiones en ruta y las exigencias propias del proceso de homologación vehicular.

El capítulo inicia con una revisión detallada de la normativa internacional vigente referente a las emisiones vehiculares, haciendo hincapié en aquella referente a los vehículos motorizados livianos. En cuanto al origen de esta se restringe a las normativas provenientes de la Unión Europea (norma EURO) y aquella proveniente de Estados Unidos de América (EPA & CARB). Este enfoque es clave ya que son estas las que lideran a nivel internacional, cuentan con la metodología más moderna de medición y presentan las mayores exigencias, como es el caso de las emisiones en condiciones reales de operación o RDE (*“Real Driving Emissions”*).

Luego se procede con la revisión de la normativa nacional, la cual se encuentra estructurada de tal forma que combina métodos de las diferentes normativas internacionales revisadas, realizando los ajustes necesarios para adaptarla a la realidad nacional. Se revisan los valores actuales y aquellos que entraran en vigor en un futuro cercano.

Finalmente, se analizan los equipos utilizados en las mediciones en ruta denominados PEMS o *“Portable Emissions Measurement System”*, que integran diferentes sistemas de medición o módulos que finalmente se utilizan para obtener el valor de emisiones en una unidad representativa como los son los gramos por kilómetro. Además, se presenta información de foros internacionales centrados en el desarrollo de estos equipos y como son implementados fuera del RDE con fines de homologación.

1.1. Normativa Internacional

1.1.1. Norma Europea

En el marco de la Unión Europea (UE), la homologación de vehículos se basa en el sistema de aprobar por completo la construcción del vehículo donde se analizan factores de seguridad y emisiones por un servicio técnico tercerizado, normalmente designado por las autoridades del país en que se realice la homologación. La UE, al ser una unión de diversos países, cuenta con que el sistema de aprobación vehicular establecido sea efectivo y estandarizado entre las naciones, esto a su vez permite que los fabricantes puedan realizar la homologación del vehículo en cualquier país (perteneciente a la UE) y pueda comercializarlo al interior de la UE sin mayores inconvenientes. Solo se requiere que las autoridades de certificación nacional envíen una copia de los resultados a los diferentes centros de homologación.

Antes de ahondar en los valores permitidos de contaminantes, se deben determinar las familias de ensayo o las categorías de vehículos que considera la norma, por ello se determina que los vehículos ligeros son aquellos cuya masa de referencia no excede los 2.610 [kg], pudiendo ampliar el umbral a petición del fabricante, pero no superando los 2.840 [kg]. La masa de referencia (MR) se determina como la masa del vehículo en condiciones de conducción, menos la masa de un conductor estándar (75 [kg]) e incrementada en 100 [kg]; la masa del vehículo en condiciones de conducción se considera como la masa del vehículo en seco más todos los fluidos correspondientes a su nivel de operación, el estanque de combustible al 90% de su capacidad, el equipamiento base que el fabricante estime en el modelo comercial y la masa del conductor. Dentro de la categoría de vehículos ligeros se desprenden los vehículos de pasajeros (M) y los vehículos comerciales (N), existiendo subdivisiones al interior de cada familia. Lo anterior se especifica en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1: Valores de masa para vehículos ligeros. Norma europea.

Categoría	Condición	Masa de referencia [kg]
M1	Conductor + 8 pasajeros	MR < 2.610
M2	Más de 8 pasajeros	
N1 – Clase I	Masa máxima < 3.500 [kg]	MR < 1.305
N1 – Clase II		1.305 < MR < 1.760
N1 – Clase III		MR > 1.760
N2	Masa máxima entre 3.500 [kg] y 12.000 [kg]	MR < 2.610

Cabe destacar que la normativa europea analizada únicamente considera las emisiones provenientes de vehículos ligeros, existiendo un set completamente diferente para vehículos pesados (MR > 2.610 [kg]). [1]

Las familias presentadas en la Tabla 1.1 han perdurado en el tiempo a través de la evolución de las normas EURO (1 al 6), a excepción de la categoría M2, que a partir de la norma EURO 1 se consideran como vehículos comerciales N1. [2]

El proceso de homologación puede ser resumido en tres fases, siendo la primera de ellas una prueba inicial de tipo aprobativa denominada TA (*type approval*) donde se revisan las emisiones de contaminantes emitidas en el tubo de escape en diferentes condiciones de temperatura y carga, además de comprobar la correcta regeneración de los sistemas de postratamiento de gases (e.g. el sistema de reducción catalítica selectiva o SCR). Se revisan las emisiones evaporativas y las emisiones provenientes del block del motor. Se realiza una revisión al sistema OBD y al desempeño de los sistemas de control de emisiones, a estos últimos además se le realizan test de durabilidad. Las mediciones en el tubo de escape tienen como finalidad primaria medir los gases de efecto invernadero

(e.g. CO₂), como secundaria la medición de contaminantes de tipo local (e.g. NO_x y PM), y finalmente, se utilizan los valores para determinar el consumo de combustible. [1]

La segunda fase de la homologación se define como las pruebas de conformidad de producción o CoP (*conformity of production*), en ellas se realizan pruebas periódicas en la línea de producción y ensamblaje con el fin de verificar el cumplimiento de los requisitos informados en el paso anterior (TA). [1]

Finalmente, se realizan revisiones a vehículos que se encuentren en funcionamiento en condiciones reales, con esta prueba de conformidad en operación ISC (*in service conformity*) se busca determinar que los distintos dispositivos (mecánicos, eléctricos, etc.) cumplan su funcionamiento a través de la vida útil del vehículo. [1]

Para corroborar que las emisiones de contaminantes se encuentran dentro de lo dictado por la norma, se deben definir los contaminantes y los valores límites. Para ello la norma europea realiza la diferenciación entre vehículos de encendido por chispa (Gasolina) y aquellos de encendido por compresión (Diésel), además se tiene una segunda diferenciación entre vehículos ligeros y pesados, asignando números arábigos a las normas pertinentes a vehículos ligeros y números romanos a aquellos pesados. A continuación, se muestran los valores de la normativa vigente (EURO 6), recordar que estos valores son válidos únicamente para los vehículos pertenecientes a las familias presentadas en la Tabla 1.1.

Tabla 1.2: Estándares de emisión de la norma EURO 6 para vehículos ligeros, para pruebas en dinámometro de chasis. Modificada de [2].

Categoría	Fecha mm/aaaa	CO	HC	HC + NO _x	NO _x	PM	PN
		[gr/km]					[#/km]
Gasolina (Euro 6)							
M1	09/2014	1,0	0,10	-	0,06	0,005	6,0 x 10 ¹¹
N1 – Clase I	09/2014	1,0	0,10	-	0,06		
N1 – Clase II	09/2015	1,81	0,13	-	0,075		
N1 – Clase III	09/2015	2,27	0,16	-	0,082		
N2	09/2015	2,27	0,16	-	0,082		
Diésel (Euro 6)							
M1	09/2014	0,50	-	0,17	0,08	0,005	6,0 x 10 ¹¹
N1 – Clase I	09/2014	0,50	-	0,17	0,08		
N1 – Clase II	09/2015	0,63	-	0,195	0,105		
N1 – Clase III	09/2015	0,74	-	0,215	0,125		
N2	09/2015	0,74	-	0,215	0,125		

Los valores presentados en la Tabla 1.2 deben ser controlados mediante ciclos de prueba, en el caso de la homologación del vehículo, estas pruebas actualmente incorporan 2 procedimientos, el primero de ellos es el que determina si se acepta o no el vehículo para su libre comercialización al interior de

la UE. Este consta de una revisión en dinamómetro de chasis al interior de un laboratorio y siguiendo el procedimiento de prueba de vehículos ligeros armonizado a nivel mundial o WLTP (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure*), el cual cuenta además con su propio ciclo de pruebas denominado WLTC (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle*). El segundo procedimiento involucra la medición de emisiones en condiciones reales de operación o RDE (*Real Driving Emissions*). Ambos procedimientos se están aplicando en tres fases, para el WLTP la primera fase permitía la comercialización de vehículos homologados mediante el ciclo de prueba obsoleto NEDC desde septiembre de 2017 a septiembre de 2018, pero vehículos nuevos que se introduzcan al mercado en ese periodo deben ser aprobados por el nuevo ciclo de pruebas WLTP. La segunda fase, de septiembre de 2018 a enero de 2019, decreta que todos los vehículos deben ser certificados mediante el nuevo ciclo de pruebas. Finalmente, la tercera fase indica que todos los vehículos en concesionarios deben mostrar cifras de CO₂ obtenidas a partir del ciclo WLTP.

En cuanto a las emisiones en condiciones reales de operación, sus fases de implementación consideran otro enfoque, la primera correspondía a una fase de monitorización donde se realizarían mediciones, pero sin aplicar los factores de conformidad, esto les permite a los fabricantes adecuar sus sistemas de control de emisiones para que en las fases siguientes (a partir de septiembre de 2017) los vehículos pudiesen ser homologados sin mayores inconvenientes. En la segunda fase se incorporan los factores de conformidad para NO_x y PN (*Particle Number*), estos factores cumplen la función de multiplicar los resultados obtenidos de la medición de emisiones mediante pruebas en laboratorio (NEDC y WLTC) y determina el valor a no exceder (NTE). Finalmente, en la tercera fase se busca incorporar la medición RDE para las pruebas conformidad en operación (ISC). [3]

El WLTC, como ciclo de pruebas, presenta una duración de 1.800 segundos, trabaja con cambios de velocidad (o perfiles de conducción) más dinámicos que el obsoleto NEDC, pero manteniendo las cuatro fases de velocidad (velocidad baja, media, alta y muy alta). Además, como prueba recorre una mayor distancia que el ciclo anterior, disminuyendo el impacto de las partidas en frío en las emisiones de CO₂. Al separar el nuevo ciclo en las acciones que están ocurriendo se observa que un 84% del tiempo el vehículo está acelerando o desacelerando, un 12% del tiempo se encuentra en ralentí y un 4% se encuentra viajando a una velocidad constante [4]. Este comportamiento se puede apreciar en la siguiente figura:

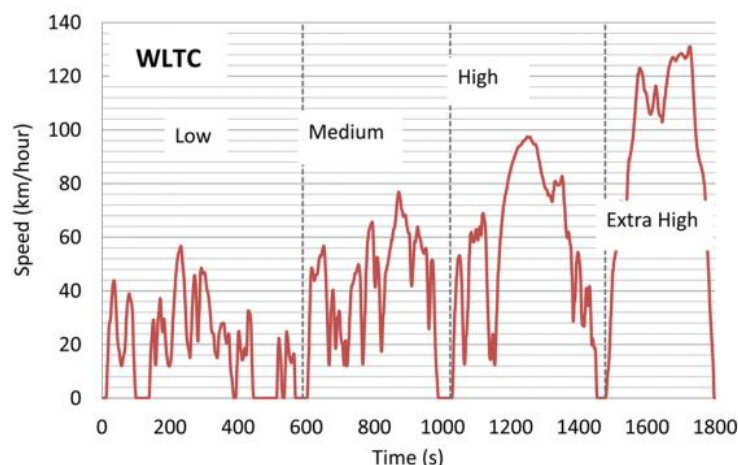


Figura 1.1: Gráfica de velocidades del ciclo de prueba WLTC a través del tiempo. Extraído de [4].

Los parámetros generales del nuevo ciclo de pruebas WLTP comparados con los valores del antiguo ciclo NEDC, se pueden observar en la Tabla 1.3:

Tabla 1.3: Parámetros clave al comparar el ciclo NEDC con el WLTP. Modificado de [4].

Parámetros	NEDC	WLTP
Duración [s]	1.180	1.800
Distancia [km]	11,03	23,27
Velocidad media [km/h]	33,6	46,5
Velocidad máxima [km/h]	120,0	131,3
Duración de detenciones [%]	23,7	12,6
Velocidad constante [%]	40,3	3,7
Aceleraciones [%]	20,9	43,8
Desaceleraciones [%]	15,1	39,9

En cuanto a la medición de emisiones en condiciones reales de operación para efectos de homologación, la Unión Europea estipula bajo su normativa EURO diversos artículos y anexos que hacen referencia a este proceso. En especial el reglamento (UE) 2016/427 que modifica el reglamento (CE) N° 692/2008 [5]. En esta modificación se incorpora el anexo III a la normativa vigente además de realizar modificaciones que instalen la medición real de emisiones (RDE) junto al sistema portátil de medición de emisiones (PEMS). Estas modificaciones son expuestas y explicadas a continuación.

Dado que la tecnología a aplicar es nueva a nivel de la región, no se posee una base de datos en cuanto a la cantidad de emisiones permitidas, tampoco se sabe cuánto es realmente la desviación que presenta este nuevo método de medición en comparación a la evaluación en laboratorios con dinamo de vehículos bajo ya obsoleto NEDC (New European Driving Cycle). Bajo esta situación se establece, dentro de la modificación al reglamento, la existencia de valores a no sobrepasar (NTE).

El anexo III letra A presenta las bases de la verificación de las emisiones en condiciones reales de conducción, dentro de él se describe el procedimiento para verificar el rendimiento en cuanto a emisiones. Aquí se establece que el valor NTE es calculado como el producto entre el factor de conformidad del contaminante ($FC_{pollutant}$) y el límite de emisiones estipulado por la normativa Euro. Se observa que existen factores de conformidad para los óxidos de nitrógeno y material particulado, dejando los valores reales medidos para la masa de monóxido de carbono e hidrocarburos totales.

También se establece como debe existir un acuerdo de mutuo soporte entre los estados miembros y los fabricantes, donde los primeros deben velar por que los vehículos puedan ser sometidos a ensayos PEMS en vías públicas (en conformidad con los procedimientos establecidos a nivel nacional, respetando la normativa y los requisitos de seguridad local). Los segundos deben asegurar que un tercero pueda realizar las labores de monitoreo sin mayores inconvenientes proporcionándoles, de ser necesario, adaptadores para tubo de escape, señales de conexión a las ECU del vehículo o adoptando medidas administrativas que corresponda.

En tanto al ensayo en condiciones reales de manejo (RDE) se lleva a cabo sometiendo los vehículos a estrategias de conducción y aplicando cargas que sean acordes a la naturaleza del vehículo, es decir, que el rendimiento del ensayo estará condicionado a los patrones de conducción propios de la familia del vehículo y a la carga normal para la que fue diseñado. Quedará a responsabilidad del fabricante demostrar que el vehículo elegido, los patrones de conducción, las condiciones y las cargas aplicadas son representativas de la familia de vehículos a homologar. Mientras que recae en la autoridad proponer un trazado para llevar a cabo la prueba, este debe contemplar 3 zonas de conducción urbana, rural y en autopista.

Como punto importante, para los vehículos que cuenten con un sistema trampa (Cheating device) que recoja datos de la ECU y que afecte el rendimiento del vehículo o las emisiones de este, se considerara como no conforme toda la familia de ensayos PEMS que se realicen con dicho vehículo.

En cuanto a las condiciones límites de operación y desarrollo de la prueba se identifican tres parámetros clave, el primero relacionado a la carga útil del vehículo y la masa del vehículo. El segundo parámetro incluye las condiciones ambientales, específicamente los rangos de temperatura y altitud de operación. En tercer lugar, se establecen las condiciones dinámicas de la prueba, estas incluyen el efecto de la pendiente, del viento de frente, la dinámica de la conducción, el consumo de los sistemas auxiliares del vehículo, etc.

La carga útil de ensayo está compuesta por el conductor, testigo del ensayo (de existir) y el equipo de testeo incluyendo los dispositivos de montaje. Se puede añadir una carga artificial en la prueba para efectos de ensayo.

Las condiciones ambientales se encuentran definidas en dos parámetros, temperatura y altura, además se clasifican en condiciones moderadas o ampliadas. Para efectos de ensayo, la temperatura ambiente debe encontrarse entre 0 [°C] y 30 [°C] para ser consideradas como moderadas o normales, mientras que el rango ampliado extiende en 7 [°C] y 5[°C] para las temperaturas mínimas y máximas respectivamente. Por otra parte, la altura juega un rol fundamental en el desempeño del vehículo, por ello la condición normal de operación es bajo los 700 [m.s.n.m] y la condición ampliada comprende desde los 700 [m.s.n.m] hasta los 1.300 [m.s.n.m].

El trayecto a efectuar por el vehículo debe contener las tres zonas requeridas por el ensayo (urbana, rural y autopista), estas serán clasificadas por la velocidad instantánea registrada por la unidad GPS o VAM. Es de suma importancia que el funcionamiento en cada zona no debe ser ininterrumpido, salvo en casos específicos de corta duración (e.g. zona urbana entre zona rural). Las velocidades que caracterizan cada tramo de conducción quedan especificadas en la Tabla 1.4:

Tabla 1.4: Velocidades de ensayo RDE.

Zona Urbana	Hasta 60 [km/h]
Zona Rural	Entre 60 [km/h] y 90 [km/h]
Autopista	Más de 90 [km/h]

La prueba divide equitativamente el trayecto, dejando una leve preferencia a la conducción en zona urbana, es decir, será un 34% de conducción urbana, un 33% rural y un 33% en autopistas. Cabe destacar que el porcentaje de conducción urbana no deberá bajar del 29%, ya que es en este ambiente donde el vehículo se desempeñara peor en términos de emisiones, por ello es la prueba más representativa. En términos de duración, la prueba deberá durar entre 90 y 120 minutos. En términos de distancia recorrida, en cada zona se deberá recorrer como mínimo 16 [km].

El montaje del equipo PEMS, tanto en su conexión física al vehículo como el suministro eléctrico, deberá hacerse de tal forma que influya mínimamente en las emisiones del vehículo y en su rendimiento. Para ello se procurará reducir el máximo posible la masa del equipo de medición y se evaluará la incorporación de elementos aerodinámicos de ser necesario. También, la alimentación eléctrica del sistema de medición no podrá proceder directa o indirectamente del motor del vehículo de ensayo.

1.1.2. Norma Estadounidense (EPA y CARB)

La normativa estadounidense se ve fuertemente dividida respecto a legislaciones del tipo ambiental entre los estados más exigentes y aquellos estados que optan por la normativa impuesta por el gobierno federal a través de la Agencia de Protección Ambiental o EPA. Dentro de los estados más comprometidos con el cuidado del medio ambiente sobresale el estado de California que, a través de su Consejo de Recursos Atmosféricos (ARB por sus siglas en inglés), destaca por su alta exigencia al crear legislaciones, además de ser el estado líder en adoptar nuevos métodos de medición y control.

En la actualidad sigue existiendo una diferencia interna al tratarse de normas de emisión y homologación de vehículos, a nivel país se trabajan los estándares de emisión nivel 3 (*Tier 3*), los cuales operan desde el año 2017 y regirán hasta el año 2025.

Por otro lado, los estándares aplicados por el estado de California se denominan LEV (*“Low emission vehicle”*), en la actualidad se encuentra vigente el estándar LEV III, que considera los vehículos producidos a partir del año 2015 hasta el año 2025.

Dentro de la normativa norteamericana se definen diferentes categorías de vehículos, diferenciándose principalmente por el peso bruto del vehículo. La categoría que nos compete para este desarrollo corresponde a la de vehículo ligero LDV (*“light duty vehicle”*) cuyo peso bruto no debe superar las 8.500 libras o 3.855,5 [kg]. Dentro de esta categoría se incluyen los vehículos de pasajeros (hasta 12 personas) y las camionetas livianas LDT (*“light duty truck”*): minivans, camioneta pick-up, SUV, etc. Los vehículos medianos de pasajeros MDPV (*“Medium Duty Passenger Vehicle”*) corresponden a aquellos vehículos de uso personal únicamente destinados al transporte de pasajeros, no deben superar las 10.000 libras o 4535,9 [kg], estos se homologan bajo los mismos estándares de emisión que los LDV. [6]

El programa de conformidad o proceso de homologación vehicular cuenta con 3 etapas definidas, la primera de ellas trata de pruebas de emisión, calidad y durabilidad durante el proceso productivo, con esto se busca encontrar representatividad de la producción del vehículo. Luego, la Agencia de Protección Ambiental emite un certificado de conformidad, el cual permite la comercialización en el estado donde se realizaron las pruebas y en aquellos estados que reconozcan ese certificado de conformidad. El fabricante puede crear grupos de prueba, donde se agrupan vehículos o motores de similares características como cilindrada, número de pistones, geometría, tipo de cámara de combustión, etc. El fabricante debe seleccionar el vehículo cuyas emisiones, en papel, sean las de mayor magnitud, además de contar con el peor desempeño en cuanto a los sistemas de abatimiento de emisiones instalados. En la segunda etapa se realizan verificaciones a vehículos con bajo

kilometraje (≈ 16.000 [km]) y a vehículos de alto kilometraje (≈ 80.000 [km]). Finalmente, se realiza una prueba de conformidad al final de la vida útil del vehículo (≈ 193.000 [km]), con el fin de entregar un certificado de durabilidad de los elementos del sistema de abatimiento de emisiones. Dentro de estas tres fases descritas, existe un accionar conjunto entre la agencia de protección ambiental EPA y el fabricante de automóviles, donde en la primera etapa se ve fuertemente involucrada la primera entidad, mientras que en las siguientes etapas es el fabricante el protagonista de los programas de verificación [7]. Lo anterior se ve descrito en la Figura 1.2.

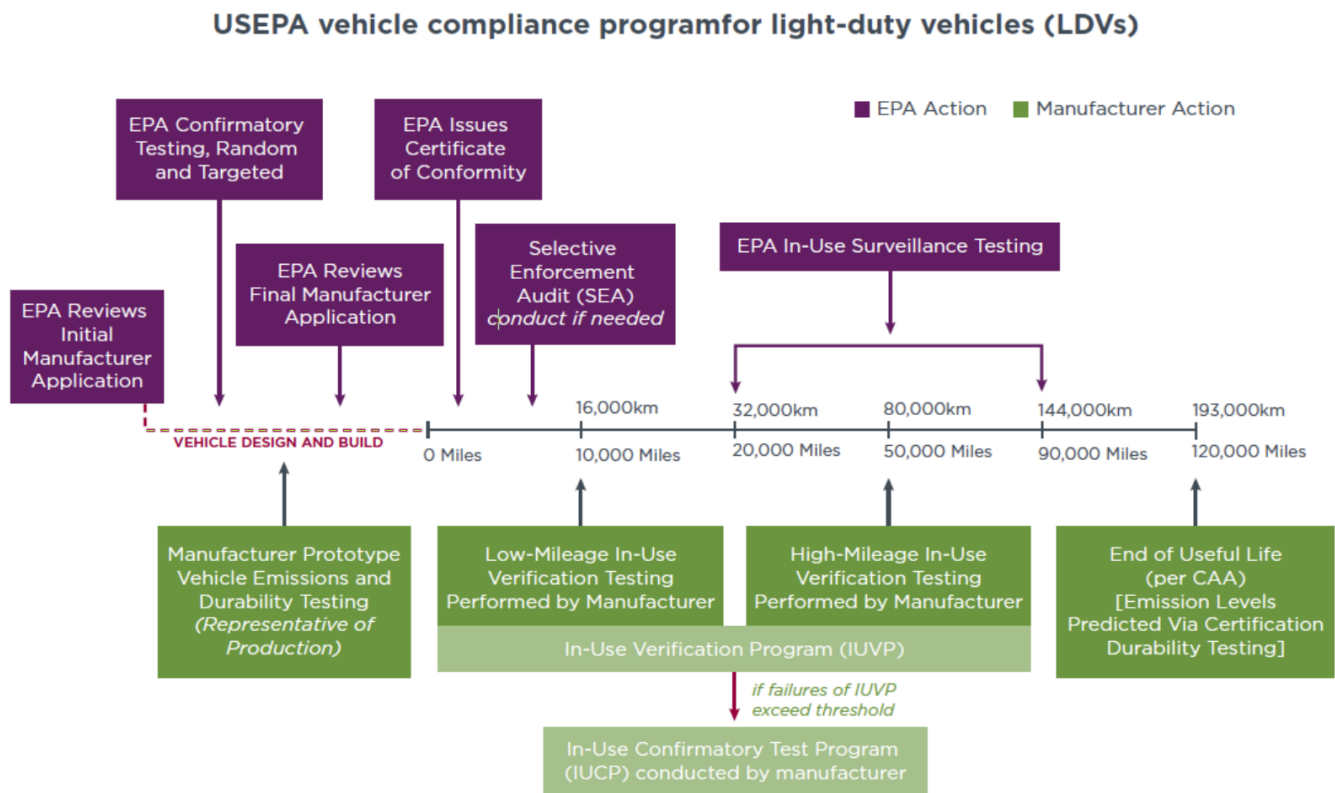


Figura 1.2: Programa de conformidad USEPA. Extraído de [7].

Los estándares nivel 3 (Tier III) acorde a las pruebas y procedimientos federales (FTP o “*Federal test procedure*”) presentan los siguientes límites de emisión de contaminantes, que deben cumplir bajo la prueba federal FTP, además de la prueba HWFET de economía de combustible en autopista. Los estándares de certificación de emisión se clasifican en Bins, que determinan el valor máximo permitido [8]. Las categorías de emisión determinadas por el estado de California (LEV) [9] presentan los mismos límites de emisión que las presentadas a nivel federal por la EPA, esto con el fin de armonizar la certificación entre estados. A continuación, se muestran en la Tabla 1.5 los valores aplicables, cabe destacar que la norma norteamericana no realiza diferencia según el combustible o tipo de encendido.

Tabla 1.5: Niveles de emisión permitidos por los estándares Tier 3 y LEV III. Modificada de [8].

LEV III	Tier 3 Bin	NMOG + NO _x	PM Tier 3	PM LEV III	CO	HCHO
		[mg/mi]	[mg/mi]	[mg/mi]	[g/mi]	[mg/mi]
LEV 160	Bin 160	160	3	10	4,2	4
ULEV 125	Bin 125	125	3	10	2,1	4
ULEV 70	Bin 70	70	3	10	1,7	4
ULEV 50	Bin 50	50	3	10	1,7	4
SULEV 30	Bin 30	30	3	10	1,0	4
SULEV 20	Bin 20	20	3	10	1,0	4
ZEV	Bin 0	0	0	0	0	0

Donde NMOG corresponde a las emisiones de gases orgánicos menos el metano y HCHO a las emisiones de formaldehído. Cabe destacar que los límites de material particulado (PM) se encuentran en un proceso de cambio, donde la fase 2017 – 2021 va a presentar un límite de 3 [mg/mi], mientras que la fase 2025 – 2028 estableció un límite de 1 [mg/mi], donde para el final de cada periodo los vehículos fabricados y homologados deberán emitir como límite el valor estipulado, requiriendo que año a año (al interior de cada fase) se cumpla con un porcentaje de vehículos que cumplan con el nuevo valor de emisión [9]. Los valores descritos para PM en la Tabla 1.5 son aplicables para aquellos vehículos que no hayan ingresado a la fase anteriormente descrita en su etapa de concepción, es decir, se encuentren en uso.

Como se mencionó anteriormente, en los Estados Unidos existen tres fases de prueba, la primera de preproducción, donde se busca asegurar que se cumplen todos los estándares antes de otorgar el certificado de conformidad. Luego viene la fase de evaluación de producción, donde se asegura que el fabricante mantiene los estándares de producción para cada vehículo comercializado, siendo similar en desempeño a aquel probado durante el proceso de homologación (tanto en calidad de componentes como emisiones contaminantes). Finalmente, se realizan las pruebas en uso del vehículo, para asegurar que la vida útil de este fue la señalada por el fabricante, principalmente aquella que tiene relación con los equipos de abatimiento de emisiones. Para llevar a cabo estas pruebas y lograr que los resultados sean repetibles y representativos se crearon diferentes procedimientos de prueba sobre dinamómetro de chasis. A nivel federal se utiliza el FTP-75 (*“Federal test procedure”*) el cual busca reflejar el estilo de conducción típico del usuario norteamericano. Los valores de duración, distancia recorrida, velocidad máxima y promedio, entre otros, se muestran en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6: Parámetros clave del régimen de prueba FTP. Modificado de [10].

Parámetros	FTP
Duración total [s]	1.877
Distancia [mi] ([km])	11,04 (17,78)
Velocidad media [mph] ([km/h])	21,2 (34,1)
Velocidad máxima [mph] ([km/h])	56,7 (91,2)
Duración etapas de la prueba	[s]
Partida en frío (transitorio)	505
Fase estabilizada	866
Detención en caliente	Entre 540 a 660
Partida en caliente (transitorio)	505

El comportamiento descrito en la Tabla 1.6 se puede visualizar en el siguiente gráfico:

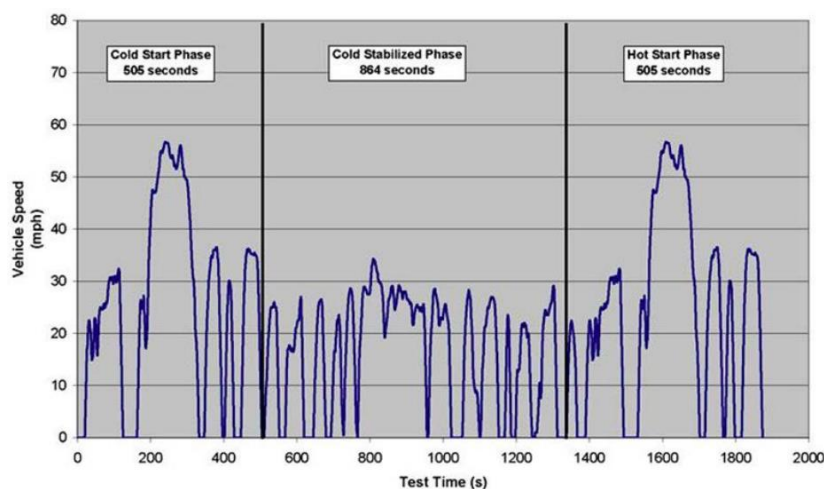


Figura 1.3: Distribución de las etapas del FTP-75, velocidad en función del tiempo. Extraído de [11].

Pese a que el régimen de prueba establecido a nivel federal (FTP) es bastante completo, incluyendo fases en frío y caliente, además de aceleraciones y detenciones constantes, la prueba es deficiente en algunos aspectos ya que se basa en el comportamiento idóneo del ciudadano. Para superar estas falencias, se diseñan pruebas suplementarias a nivel federal denominadas SFTP (*“Supplemental federal test procedure”*). Las pruebas SFTP introducen dos ciclos de prueba adicionales, el primero busca representar el comportamiento agresivo y conducción a alta velocidad que se puede encontrar en las carreteras norteamericanas, denominado US06. El segundo ciclo, denominado SC03, utiliza el sistema de aire acondicionado, este sistema es conocido por impactar negativamente en el desempeño de los vehículos y por ello no puede ser obviado.

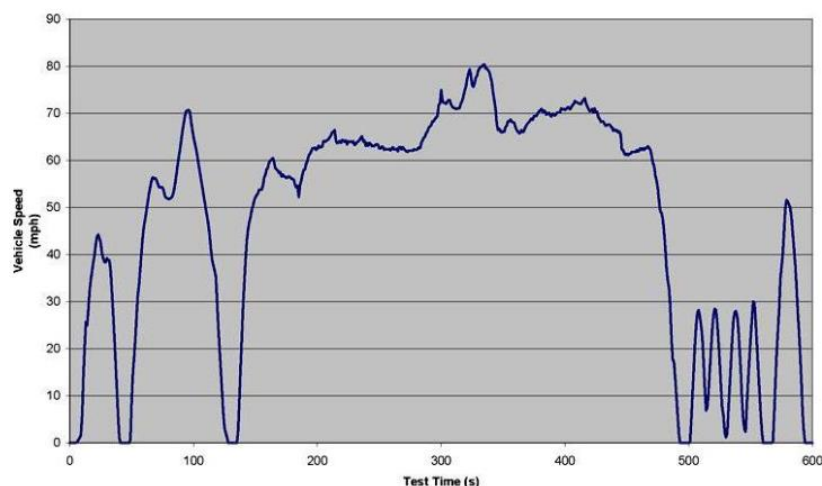


Figura 1.4: Ciclo suplementario US06, conducción agresiva y a alta velocidad. Duración 596 [s], velocidad máxima 80 [mph] (128,8 [km/h]). Extraído de [12].

De este régimen suplementario de pruebas se puede observar que presenta una sección central donde se mantiene una velocidad elevada (sobre el límite legal en las autopistas norteamericanas), además de presentar áreas de aceleraciones abruptas, algunas desde la detención hasta velocidades altas (observado en la primera sección de la Figura 1.4), y aceleraciones consecutivas acompañadas de detenciones (similar a un esquema de conducción agresiva). A continuación, en la Figura 1.5 se muestra el desarrollo del ciclo SC03.

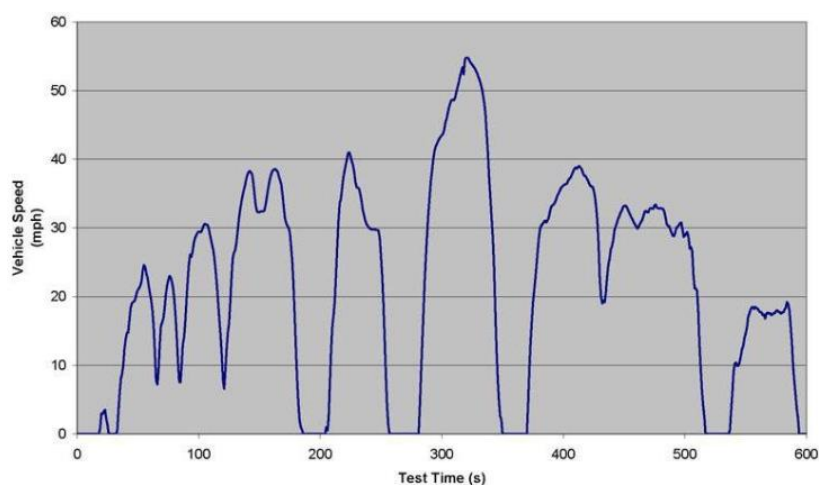


Figura 1.5: Ciclo suplementario SC03, impacto del sistema de aire acondicionado. Duración 596 [s], distancia recorrida 3,58 [mi] (5,56 [km]). Extraído de [13].

Del régimen suplementario SC03 se busca cuantificar el impacto del sistema de acondicionamiento de aire que muchos vehículos incorporan como equipamiento base en la actualidad, para ello se identifica que la situación más desfavorable para el vehículo son los periodos de detención y aceleración, en el primer caso el motor debe mantener el ralentí bajo la carga del sistema pero sin la refrigeración natural del aire que circula al interior del compartimiento del motor cuando se mueve el vehículo, debiendo activar el elemento que fuerza la circulación del aire a través del radiador (normalmente un ventilador eléctrico). En el segundo caso, durante aceleraciones el motor debe ser capaz de propulsar el vehículo además de mover el compresor del aire acondicionado, transformándose en una especie de freno. En ambos casos disminuye la eficiencia del motor, aumentando el consumo y las emisiones de contaminantes.

Existe un cuarto ciclo de conducción cuya única finalidad es determinar el consumo de combustible en autopista, denominado HWFET (*“Highway fuel economy test”*), es un test sobre dinamómetro de chasis (al igual que los otros ciclos descritos), tiene una duración de 765 [s], recorre una distancia de 10,26 [mi] (16,45 [km]) a una velocidad promedio de 48,3 [mph] (77,7 [km/h]) [14]. Lo anterior se representa en la Figura 1.6.

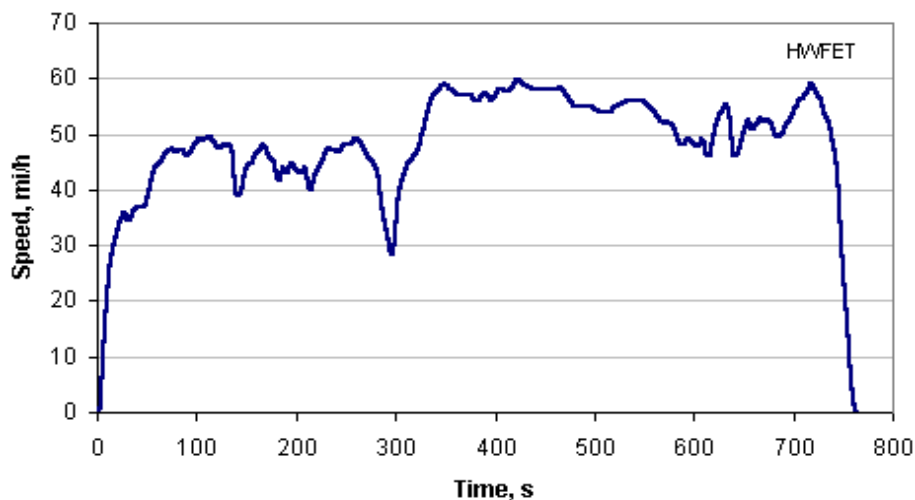


Figura 1.6: Ciclo de prueba HWFET, economía de combustible en autopista. Duración 765 [s], distancia recorrida 10,26 [mi] (16,45 [km]). Extraído de [14].

Muchas de las normativas desarrolladas a través del tiempo nacen del Acta del Aire Limpio o CAA por sus siglas en inglés (*“Clean Air Act”*), es un acta desarrollada por el congreso de los Estados Unidos, establecida en 1970, cuya misión es proteger a la población de diferentes tipos de contaminación atmosférica que pueda afectar su bienestar. El CAA ha sido modificado durante revisiones los años 1977 y 1990, donde se actualizó la librería de contaminantes y se estableció un estándar de la calidad de aire ambiental a nivel nacional (desarrollo a cargo de la EPA) el cual ha sido

modificado a medida que la tecnología evoluciona. El acta fue diseñada para minimizar los incrementos en la contaminación producto de fuentes estacionarias y de fuentes móviles (aumento significativo en el número de automóviles en circulación). [15]

1.2. Normativa Nacional

La normativa Chilena respecto a emisiones de vehículos motorizados livianos queda definida, tanto en estructura como en valores a fiscalizar, en el decreto 211 – 1991 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (DTO – 211/1991 MTT [16]). En el primer artículo del decreto se definen los conceptos clave a considerar, dentro de ellos destaca: Vehículo motorizado liviano, que corresponde a todos aquellos vehículos con un peso bruto menor a 2.700 [kg] que posean 4 o más ruedas; pueden diferenciarse en su funcionalidad siendo de pasajeros (diseñados principalmente para el transporte de personas o derivados) y comerciales (diseñados principalmente para el transporte de carga o derivados). La norma nacional se ve fuertemente influenciada por las normas descritas en los apartados anteriores (Europea y Estadounidense), esto se puede apreciar en la definición de los vehículos comerciales livianos donde de las cinco categorías existentes, 3 provienen de la definición europea (Clase 1, 2 y 3) y dos de la definición norteamericana (Tipo 1 y 2). Lo anterior se puede apreciar en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7: Clasificación de vehículo comercial liviano según DTO - 211/1991 MTT [16].

Clasificación vehículo comercial liviano (VCL)	Masa de Referencia [kg]
Tipo 1	≤ 1.700
Tipo 2	> 1.700
Clase I	≤ 1.305
Clase II	$1.305 < \text{PNM} \leq 1.760$
Clase III	> 1.760

Mientras que los vehículos livianos de pasajeros (VLP) no se encuentran divididos en subclases, por ello su masa de referencia corresponde a todo el rango posible, es decir, peso bruto vehicular menor a 2.700 [kg].

La normativa de emisión vigente a aplicar durante el proceso de homologación se encuentra en el Decreto 211 – 1991 del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (DTO – 211/1991 MTT [16]). Actualizada mediante el Decreto 29 – 2012 del Ministerio del Medio Ambiente (DTO– 29/2012 MMA [17]), incorporando el artículo 4 sexties. Los valores aplicables a los vehículos livianos de encendido por chispa (Gasolina) se presentan a continuación en las Tabla 1.8 y Tabla 1.9, estos valores se encuentran vigentes desde el primero de septiembre de 2014.

Tabla 1.8: Límites de emisión estipulados en DTO– 29/2012 MMA , EPA. Modificado de [17].

Norma Fabricante: EPA / Gasolina, Bioetanol, GLP o GNC							
Categoría	Peso Bruto Vehicular [kg]	Peso Neto de Marcha* [kg]	Durabilidad [mi]	Emisiones de escape [g/km]			HCHO [mg/km]
				CO	NO _x	NMOG	
VLP	Hasta 12 pasajeros	-	50.000	2,11	0,031	0,047	9,32
			120.000	2,61	0,044	0,056	11,19
VCL Tipo 1	< 2.700	≤ 1.700	50.000	2,11	0,031	0,047	9,32
			120.000	2,61	0,044	0,056	11,19
VCL Tipo 2		> 1.700	50.000	2,11	0,031	0,047	9,32
			120.000	2,61	0,044	0,056	11,19

* Peso en vacío + 136 [kg]

Tabla 1.9: Límites de emisión estipulados en DTO– 29/2012 MMA, EURO. Modificado de [17].

Norma Fabricante: EURO / Gasolina						
Categoría	Peso Bruto Vehicular [kg]	Peso Neto de Marcha* [kg]	Emisiones de escape [mg/km]			
			CO	HCT	HCNM	NO _x
VLP	< 2.700	Todas	1.000	100	68	60
VCL Clase I		≤ 1.305	1.000	100	68	60
VCL Clase II		1.305 < PNM ≤ 1.760	1.810	130	90	75
VCL Clase III		> 1.760	2.270	160	108	82

* Peso en vacío + 100 [kg]

Los vehículos deben acreditar el cumplimiento de estos valores para una durabilidad de 160.000 [km]

En cuanto a los vehículos livianos cuyo combustible sea Diesel (ignición por compresión), el decreto 29/2012 MMA establece los límites de emisión, estos valores además se encuentran en el DTO – 211/1991 MTT, artículo 4 octies. Estos valores se presentan en las Tabla 1.10 y Tabla 1.11.

Tabla 1.10: Límites de emisión estipulados en DTO– 29/2012 MMA, EPA. Modificado de [17].

Norma Fabricante: EPA / Diesel								
Categoría	Peso Bruto Vehicular [kg]	Peso Neto de Marcha* [kg]	Durabilidad [mi]	Emisiones de escape [g/km]				HCHO [mg/km]
				CO	NO _x	NMOG	MP	
VLP	Hasta 12 pasajeros	-	50.000	2,11	0,031	0,047	-	9,32
			120.000	2,61	0,044	0,056	0,0062	11,19
VCL Tipo 1	< 2.700	≤ 1.700	50.000	2,11	0,031	0,047	-	9,32
			120.000	2,61	0,044	0,056	0,0062	11,19
VCL Tipo 2		> 1.700	50.000	2,11	0,031	0,047	-	9,32
			120.000	2,61	0,044	0,056	0,0062	11,19

* Peso en vacío + 136 [kg]

Tabla 1.11: Límites de emisión estipulados en DTO– 29/2012 MMA, EURO. Modificado de [17].

Norma Fabricante: EURO / Diesel						
Categoría	Peso Bruto Vehicular [kg]	Peso Neto de Marcha* [kg]	Emisiones de escape [mg/km]			
			CO	NO _x	HCT + NO _x	MP
VLP	< 2.700	Todas	500	180	230	5
VCL Clase I		≤ 1.305	500	180	230	5
VCL Clase II		1.305 < PNM ≤ 1.760	630	235	295	5
VCL Clase III		> 1.760	740	280	350	5

* Peso en vacío + 100 [kg]

Los vehículos deben acreditar el cumplimiento de estos valores para una durabilidad de 160.000 [km]

El Decreto 211 – 1991 del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (DTO – 211/1991 MTT [16]), recibió una actualización mediante la resolución N° 114 exenta emitida el 13 de febrero del 2019 [18], donde se aprueba el anteproyecto de revisión de las normas de emisión aplicables a vehículos motorizados livianos. En el artículo N° 4 decies del DTO – 211/1991 MTT se entregan los valores aplicables a los vehículos livianos durante el proceso de homologación. Los valores que se presentan entrarán en vigor una vez se publique en el diario oficial el nuevo decreto de emisiones. A continuación, en la Tabla 1.12 se muestran los valores aplicables a vehículos de encendido por chispa, tanto bajo la normativa Euro 6b y Euro 6c.

Tabla 1.12: Límites de emisión estipulados en DTO – 211/1991 MTT, Euro 6b y Euro 6c, Peso Bruto Vehicular < 2.700 [kg]. Modificado de [16].

Categoría	Peso Neto de Marcha* [kg]	CO	NO _x	HCT	HCNM	MP**	NP**
		[mg/km]					[#/km]
VLP	Todas	1.000	60	100	68	4,5	6,0 x 10 ¹¹
VCL Clase I	≤ 1.305	1.000	60	130	68		
VCL Clase II	1.305 < PNM ≤ 1.760	1.810	75	130	90		
VCL Clase III	> 1.760	2.270	82	160	108		

* Peso en Vacío + 100 [kg]

** MP y NP aplicará únicamente en vehículos equipados con inyección directa

En cuanto a los vehículos cuyo combustible sea Diesel, el Decreto 211/1991 MTT establece los límites de emisión expuestos en la Tabla 1.13.

Tabla 1.13: Límites de emisión estipulados en DTO – 211/1991 MTT, Euro 6b y Euro 6c, Peso Bruto Vehicular < 2.700 [kg]. Modificado de [16].

Categoría	Peso Neto de Marcha* [kg]	CO	NO _x	HCT + NO _x	MP	NP
		[mg/km]				[#/km]
VLP	Todas	500	80	170	4,5	6,0 x 10 ¹¹
VCL Clase I	≤ 1.305	500	80	170		
VCL Clase II	1.305 < PNM ≤ 1.760	630	105	195		
VCL Clase III	> 1.760	740	125	215		

* Peso en Vacío + 100 [kg]

Los límites presentados en las tablas Tabla 1.12 y Tabla 1.13 deben ser garantizados por el fabricante para una durabilidad de 160.000 [km] de uso.

Estos límites de emisión serán exigibles a partir de septiembre del 2020, esto se determina en el artículo N° 16 del Decreto 31/2016 del Ministerio del Medio Ambiente (DTO – 31/2016 MMA) [19]. Para su implementación se establecen dos fases, la primera de ella abarca los primeros 12 meses desde la publicación en el diario oficial para todos los nuevos modelos que se incorporen y 24 meses, contados de la misma forma, para todos los modelos de vehículos nuevos que realicen su primera inscripción en el registro de vehículos motorizados del Servicio de Registro Civil e Identificación, donde solo podrán circular por el territorio nacional aquellos vehículos nuevos que cumplan con los valores de emisión estipulados en la normativa Euro 6b bajo el ciclo NEDC. La segunda fase contempla los 36 meses desde la publicación en el diario oficial para todos los nuevos modelos que se incorporen y 48 meses, contados de la misma forma, para todos los modelos de vehículos nuevos que realicen su primera inscripción en el registro de vehículos motorizados del Servicio de Registro Civil e Identificación, donde solo podrán circular por el territorio nacional aquellos vehículos nuevos que cumplan con los valores de emisión estipulados en la normativa Euro 6c bajo el ciclo WLTP. Dentro de la paleta de contaminantes a medir se incorpora la medición de número de partículas (NP), este valor es relevante en los vehículos modernos equipados con motores de baja contaminación que cuentan con filtros de partículas de gran tamaño (DPF) y cuya la fracción volátil en los gases de escape (VOC) disminuye considerablemente, estos factores limitan la formación de partículas de gran tamaño, disminuyendo así el valor de masa de partículas (MP) pero manteniendo una emisión de partículas de menor tamaño y masa que permanecen en suspensión por más tiempo (denominados MP 2,5 y MP 1,0 por su diámetro medio de la partícula).

Bajo el artículo N° 4 decies se exponen los nuevos límites de emisión a aplicar para vehículos homologados bajo normativa Estadounidense EPA, estos valores se presentan en la Tabla 1.14.

Tabla 1.14: Límites de emisión estipulados en DTO – 211/1991 MTT, USEPA, Peso Bruto Vehicular < 2.700 [kg]. Modificado de [16].

Categoría	NMOG + NO _x	PM	CO	HCHO
	[mg/mi] (mg/km)	[mg/mi] (mg/km)	[g/mi] (g/km)	[mg/mi] (mg/km)
Bin 125	125 (77,67)	3 (1,86)	2,1 (1,30)	4 (2,49)
Bin 70	70 (43,50)	3 (1,86)	1,7 (1,30)	4 (2,49)

Al igual que con la implementación de la normativa europea presentada en el anteproyecto, se considerarán 2 fases a partir de septiembre del 2020 [19], manteniendo las fechas de aplicación de 12 y 24 meses para la primera fase, y 36 y 48 meses para la segunda fase. La forma de aplicación difiere ya que cada fase contiene límites diferentes, la primera aplicando el Bin 125 y la segunda el Bin 70.

Ambas normativas exigen que para iniciar la segunda fase se requiere que a nivel nacional exista un suministro de combustible con un contenido de azufre menor a 10 ppm. De no darse dicha condición, se extiende el plazo en 12 meses. La verificación del combustible corresponderá al Ministerio de Energía.

Las mediciones se efectuarán conforme a la norma que el fabricante, armador, importador o sus representantes soliciten al momento de realizar la homologación. Estos procesos fueron extensamente explicados en la sección 1.1. A modo de recapitulación, las condiciones para las pruebas basadas en la agencia de protección ambiental EPA estarán estipuladas en el Código de Regulación Federal, título 40 [20] (CFR 40) y se realizarán las pruebas en dinamómetro de chasis siguiendo el régimen FTP. Por otro parte, las condiciones para las pruebas basadas en el reglamento de la Unión Europea (Norma EURO) se regirán por la directiva 70/220 CEE [21] y su modificación con las directivas 98/96 CE [22] y 2002/80 CE [23], ambas de la comunidad económica europea [16].

Recapitulando, en la sección 1.1 se revisaron aspectos claves de la normativa internacional vigente, enfocándose en aquellos países o conjuntos de naciones que lideran en esta materia, como lo son los Estados Unidos de América y la Unión Europea con las normativas US EPA y CARB para el primero, y las normas Euro para el segundo. Aquí se sientan las bases de lo que nosotros conocemos como normativa nacional, ya que a nivel país se permite la homologación vehicular por una modificación de dichas normas, dejando al importador o comercializador directo de la marca decidir el camino a seguir. Esta modificación de normas internacionales primero fue realizada por el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, pero a medida que la problemática ambiental toma un rol fundamental en la forma de legislar, el Ministerio del Medio Ambiente tomó un rol protagónico en la adaptación de estas normativas. En la sección 1.2 se revisaron los aspectos de la normativa nacional vigente, que como se mencionó anteriormente, se crea de una derivación de normas internacionales, adoptando diferentes aspectos de cada una y creando una normativa doble, que permite homologar tanto bajo el régimen Estadounidense o Europeo. Cabe destacar que estas derivaciones de las normas no contemplan parámetros de control o pruebas clave que se estipulan originalmente, por ello pierden efectividad a la hora de controlar las emisiones de vehículos que ingresan al parque nacional.

1.3. Sistema PEMS

Los sistemas de medición de emisiones portátiles, PEMS, son laboratorios portátiles utilizados para medir y caracterizar las emisiones de fuentes móviles, generalmente utilizados a efectos de certificación vehicular y análisis de emisiones en condiciones reales de operación. Una de sus características es que permiten obtener resultados similares a los de laboratorio, lo cual es clave para la implementación de la nueva normativa referente a emisiones vehiculares. Adicionalmente, se diseñan para ser poco intrusivos y livianos, así no interfieren con la masa total del vehículo, no afectan la maniobrabilidad, visibilidad ni otros parámetros que alteren la forma de conducción.

1.3.1. Consideraciones de los equipos

Dada la naturaleza de cada instrumento incorporado en el equipo PEMS se debe trabajar con tiempos de respuesta (o retraso) diferentes, estos tiempos deben ser conocidos por el equipo analizador y considerados para la posterior revisión de los datos. La sincronización de los valores medidos con la carga del motor, la velocidad y aceleración del vehículo es sumamente importante, ya que si estos no se correlacionan correctamente se estará trabajando bajo supuestos erróneos, invalidando la medición.

Al analizar la utilización de estos equipos se debe considerar la sensibilidad de los instrumentos referente al contaminante deseado y factores externos que puedan alterar la medición. Dentro de los agentes externos se encuentra el calor, la humedad ambiente, vibraciones e irregularidades en el camino que pueden afectar en gran medida los resultados de la prueba, invalidando la medición. Es por ello que ciertos instrumentos altamente sensibles a estímulos externos son relegados a labores de laboratorio donde existe un ambiente controlado. Mientras que, otros equipos menos susceptibles a las condiciones ambientales son preferidos para operaciones en ruta.

La aplicabilidad de estos sistemas de medición viene dado por la normativa americana 40 CFR parte 1065, subparte J [24], aquí se especifican pruebas en terreno y en laboratorio, además de determinar que ciertos equipos PEMS pueden ser utilizados para pruebas en laboratorio siempre que estos cumplan con todos los requerimientos para dichas pruebas. También se menciona los métodos de calibración y verificación, las preparaciones para pruebas y la secuencia de prueba de emisiones en terreno, elementos generales de los equipos PEMS, cálculos de emisiones según potencia entre otros.

Los PEMS se construyen en base a cuatro subsistemas de medición, el primero de ellos considera los analizadores de gas y material particulado, aquí se incluye el sistema de muestreo y acondicionamiento de ser requerido. El segundo subsistema considera las mediciones de caudal, tanto en la admisión como en el escape del vehículo, junto a la relación aire combustible resultan

imprescindibles para determinar el consumo de combustible. Las mediciones de este segundo subsistema permiten el correcto desarrollo de los balances químicos y la determinación de las cantidades molares de los contaminantes. El tercer subsistema considera variables del motor y ambientales que afectan las emisiones, es decir, condiciones de funcionamiento como el régimen de giro, temperaturas (admisión, aceite y agua de refrigeración), posición de los pedales, velocidad instantánea, aceleración (en los tres ejes), etc. En las variables ambientales a medir se considera la temperatura, humedad y presión atmosférica. Además, se consideran factores como la pendiente geográfica, ya que esta influye en la carga a la que se somete el vehículo. Finalmente, el último subsistema considera la adquisición, registro y post procesamiento de los datos, aquí se incluyen las técnicas de tratamiento de señales utilizadas para la sincronización, filtrado y corrección de curvas, así como los cálculos requeridos para la obtención de los factores de emisión [25].

Los contaminantes por controlar principalmente son el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), hidrocarburos totales (THC), número de partículas (PN) y masa de las partículas (PM), metano (CH₄) y amoníaco (NH₃). Estos representan los gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera, contaminantes locales y precursores de smog fotoquímico. El amoníaco se presenta como un contaminante nuevo no considerado ya que genera contaminación cruzada con los sensores de óxido de nitrógeno que se encuentran actualmente equipados en los sistemas PEMS, alterando el resultado de la medición invalidando la prueba.

Para las mediciones de CO y CO₂ se utilizan sensores infrarrojos no dispersivos (NDIR) los cuales constan de una lámpara infrarroja y un sensor que detecta las longitudes de onda absorbidas en el espectro infrarrojo, denominado método espectroscópicos. Este tipo de sensor es bastante sensible en las mediciones de gases cuando se presentan bajas concentraciones como es el caso de los óxidos de nitrógeno, además de tener una sensibilidad cruzada con las moléculas de agua. Se desarrolla la tecnología h-NDIR la cual permite medir CO y CO₂ en gases húmedos, esta tecnología utiliza líneas y cámaras calefaccionadas además de incorporar 4 detectores en el sensor (referencia, CO, CO₂ y H₂O), que mediante algoritmos permite corregir y obtener medidas de concentración directamente en base húmeda [26].

La concentración de CO₂ se encuentra directamente relacionada con la relación aire combustible (normalmente conocida como factor λ), por ello esta se puede determinar de forma indirecta mediante el consumo de combustible y la estequiometría de la combustión. Cabe mencionar que para desarrollar este método se debe conocer la composición química del combustible, la humedad presente en el aire y la cantidad de aire que ingresa al motor. Además, se deben realizar balances para las diferentes mezclas (rica, estequiométrica y pobre).

Para las mediciones de NO y NO₂ se emplean sensores de zirconio, detectores ultravioletas no dispersivos (NDUV) y detectores de quimioluminiscencia (CLD). Según la norma americana 40CFR 1065 se recomiendan los NDUV y CLD para la medición de este contaminante [26], dejando de lado los sensores de zirconio. El sensor NDUV es similar al sensor NDIR, varían en la luz aplicada (ultravioleta en lugar de infrarroja). Al igual que el sensor NDIR, este presenta interferencia positiva con los hidrocarburos no quemados (HC) y con la humedad en la muestra, teniendo que aplicar algoritmos de compensación en base a las medidas de H₂O y HC presentes.

En cuanto a las emisiones de hidrocarburos existen dos clasificaciones de contaminantes que tienen cierta relación entre ellos, los hidrocarburos totales no quemados (THC) y los compuestos orgánicos volátiles (VOC). Los THC corresponden a cadenas de hidrocarburos normalmente derivados del petróleo (combustibles fósiles) que no fueron quemados durante la etapa de la combustión al interior del motor, estos compuestos únicamente se forman de Carbono e Hidrogeno y dependiendo del largo de la cadena es su relativa volatilidad. Por otro lado, los VOC incluyen todos los compuestos químicos que tienden a formar sustancias gaseosas con relativa facilidad dada su alta volatilidad y por ello poseen un alto poder de contaminación en un ambiente cerrado, al ser compuestos orgánicos en su cadena central debe existir Carbono elemental. Estos últimos son compuestos extremadamente variados, tanto en complejidad como en toxicidad, es por ello que son fuertemente controlados por las autoridades. De las emisiones provenientes de un vehículo liviano se toma el valor de THC como el total, encontrando VOC en aquellos hidrocarburos distintos del metano [27].

Los hidrocarburos totales no quemados (THC) se dividen en dos categorías: metano (CH₄) e hidrocarburos distintos del metano (NMHC). Esta diferenciación se realiza principalmente debido a la toxicidad que presentan los NMHC por sobre el metano, y al efecto que presenta el metano en el calentamiento global (gas con un alto efecto invernadero) por sobre los otros hidrocarburos no quemados. Dentro de los NMHC sobresalen el tolueno, xileno y compuestos aromáticos del benceno, esto dada su elevada toxicidad. Para determinar la concentración total de hidrocarburos se utiliza un detector de ionización de flama (FID) o un detector calentado de ionización de flama (HFID). Si se desea conocer la concentración de metano se debe emplear en la cromatografía de gases un filtro que oxide todos los hidrocarburos diferentes al metano (“nonmethane cutter”) [26]. Los FID fundamentan su medición en la formación de iones de carbono generados cuando el hidrocarburo entra en combustión con una llama de hidrogeno, estos iones de carbono se mueven a un colector eléctrico de polaridad negativa, generándose una pequeña corriente proporcional al número de iones en el gas. Debido a su principio de funcionamiento, este tipo de analizadores no distingue el hidrocarburo que

está proporcionando el ion de carbono, por ello resulta primordial incorporar un filtro previo al analizador.

El material particulado presente en el escape corresponde a una mezcla compleja de diferentes sustancias cuya composición final depende fuertemente de variables ambientales, especialmente de la temperatura a la cual se analizan. Esta mezcla se reconoce como una sustancia que cambia en el tiempo dado su alto contenido de sustancias volátiles, donde se dan transformaciones de tipo evaporativas, nucleación o coagulación de partículas y/o condensación de compuestos individuales. Es por ello que la metodología empleada para las mediciones de esta sustancia es crítica, ya que fallas en los procedimientos o métodos utilizados pueden resultar en mediciones erróneas, las cuales deben ser descartadas dada su nula representatividad del vehículo. Dichas sustancias volátiles resultan significativas cuando el vehículo analizado es relativamente moderno y cuenta con sistemas de abatimiento de emisiones (SCR, DPF, etc.), mientras que la fracción no volátil se compone principalmente de carbono elemental. [28]

Producto de la incorporación de diferentes sistemas de abatimiento de emisiones, la medición de masa en el caso del material particulado deja de ser representativa dada la disminución en la fracción no volátil (carbono elemental) que servía como base para la condensación de las sustancias volátiles, es decir, existía un fenómeno de crecimiento de grano en torno a las partículas de carbono elemental. Al incorporar estos sistemas se retira gran parte de esta fracción no volátil potenciándose otros fenómenos como la nucleación y la formación de nuevas partículas a cargo de la fracción volátil, naciendo así la medición del número de partículas. Aquí se diferencian los fenómenos de condensación o acumulación y nucleación, el primero opera entre los 80 – 100 [nm] de diámetro, mientras que el segundo cercano a los 20 [nm] de diámetro [28]. Los métodos de medición se diferencian en como abordan el problema de la fracción volátil, existiendo mediciones secas y húmedas. Las mediciones secas se caracterizan por eliminar la posibilidad de saturar el ambiente de medición, para ello utilizan una tasa de dilución elevada que permite disminuir la posibilidad de condensación, por otro lado, las mediciones húmedas permiten que exista este fenómeno de condensación y nucleación al aplicar diferentes métodos (enfriar el gas de muestreo previo a la dilución, utilizar una tasa de dilución menor que favorezca la saturación de la muestra, etc.), resultando en una medición más realista.

Los instrumentos utilizados varían entre balanzas (gravimétrica e inercial) que miden la cantidad total en masa de partículas emitidas durante un ensayo mediante el pesaje final de filtros que retienen dichas partículas, y otros instrumentos de medición que dependen del tamaño de la partícula, ya sea mediante anillos de descarga y la subsecuente medición de la carga eléctrica que abandona la

recamara, o por fotometría de dispersión, donde las partículas presentes crean el efecto de dispersión que es medido por el analizador, estos métodos permiten la lectura en tiempo real del material particulado, además de poder entregar la distribución del tamaño de las partículas.

Los sensores involucrados en los sistemas PEMS deben ser capaces de asegurar una deriva admisible en los datos, es decir, luego de realizar una prueba en ruta, el analizador al ser muestreado con gases patrones no debe presentar una desviación mayor a cierto porcentaje. Esta revisión de la deriva se debe realizar tanto para la respuesta a cero como para el valor de rango, normalmente realizando este procedimiento al finalizar la medición durante el procedimiento de auditoria. Este valor máximo admisible se encuentra en el Reglamento (UE) 2016/427 [5], a continuación, en la Tabla 1.15, se muestran los valores máximos permisibles del analizador durante un ensayo PEMS.

Tabla 1.15: Deriva admisible del analizador durante ensayo PEMS. Extraído de [5].

Contaminante	Deriva de la respuesta cero	Deriva de la respuesta rango *
CO ₂	≤ 2.000 ppm por ensayo	≤ 2 % del valor indicado o ≤ 2.000 ppm por ensayo, si esta es superior
CO	≤ 75 ppm por ensayo	≤ 2 % del valor indicado o ≤ 75 ppm por ensayo, si esta es superior
NO ₂	≤ 5 ppm por ensayo	≤ 2 % del valor indicado o ≤ 5 ppm por ensayo, si esta es superior
NO / NO _x	≤ 5 ppm por ensayo	≤ 2 % del valor indicado o ≤ 5 ppm por ensayo, si esta es superior
CH ₄	≤ 10 ppm por ensayo	≤ 2 % del valor indicado o ≤ 10 ppm por ensayo, si esta es superior
THC	≤ 10 ppm por ensayo	≤ 2 % del valor indicado o ≤ 10 ppm por ensayo, si esta es superior

* Si la deriva de la respuesta a cero se encuentra dentro del margen admisible, es aceptable calibrar el cero del analizador antes de verificar la deriva del rango.

La revisión de estos equipos que componen los analizadores de emisiones portátiles forma parte de los pilares centrales de este trabajo, sin el entendimiento del funcionamiento y las limitaciones no se puede formar un protocolo robusto y acorde a los requerimientos. Si bien la tecnología de estos analizadores cambia constantemente, la esencia permanece la misma, integrar diferentes equipos que permitan caracterizar las emisiones provenientes de una fuente de forma precisa e instantánea. Los avances de mayor relevancia son aquellos que apuntan a una disminución en el tamaño del equipo, pero apoyándose en volumen de medición, es decir, aumentar el número de equipos PEMS disponibles al público, esta idea se desarrolla en el apartado 1.3.2 de discusión internacional, donde se presentan tres ideas de desarrollo en esta materia.

1.3.2. Discusión internacional

Durante la tercera semana de marzo del 2019 se realizaron dos conferencias relacionadas a la implementación de sistemas portátiles para la medición de emisiones PEMS. La conferencia organizada por el Consejo Coordinador de Investigaciones o CRC dado su nombre en inglés, llamada la “29th CRC Real World Emissions Workshop”, se enmarca en la cooperación y el traspaso libre de información sobre la condición actual de las investigaciones referente a las emisiones en condiciones reales de operación, se trabajan tanto vehículos livianos como maquinaria pesada (fuentes móviles y estacionarias) siendo los principales tópicos el modelamiento de emisiones, mejorar los inventarios de emisiones existentes, análisis de las emisiones de material particulado, mejorar y analizar nuevas técnicas de medición, análisis de los contaminantes no regulados, inspección/mantenimiento y diagnósticos a bordo del vehículo (OBD), efectos del combustible en las emisiones y emisiones fuera de ruta (Off-Road) [29].

La segunda conferencia organizada por el Centro para la Investigación y Tecnología Ambiental o CE-CERT de la Universidad de California Riverside (UCR), llamada la “9th Annual International PEMS Conference”, donde se reunieron actores clave de la industria e investigadores, ambos coinciden en la utilización de una forma de PEMS, ya sea como un sistema totalmente compatible con la regulación 1065 [26] y sistemas portátiles de menor tamaño, como lo son los micro PEMS, nano PEMS, los sensores in situ, mediciones de actividad (PAMS), sistema REAL o evaluación y registro de emisiones reales a sistemas simples de medición de emisiones (SEMS) [30].

Dentro de todas las exposiciones, tres de ellas resultan sumamente interesantes para el desarrollo de este proyecto. La primera a cargo de David Miller, fundador y director ejecutivo de 3DATX corp. [31], habla sobre la democratización de las pruebas en vehículos, donde el concepto de mini PEMS y la armonización o uniformidad de estándares internacionales cobra suma importancia, ya que, de equipos de menor tamaño y costo con baja desviación en sus mediciones acompañado de pruebas compatibles y replicables a nivel internacional, se logra hacer más atractivo la medición de las emisiones automotrices, lo que permite generar protocolos y leyes puramente enfocadas en la protección de la atmosfera. La segunda presentación, dirigida por Erin Shields, habla sobre los desafíos que conlleva las mediciones de emisiones en condiciones reales de operación (RDE), trata como las condiciones ambientales, los cambios de altitud y las vibraciones externas pueden afectar a las mediciones de forma significativa, también presenta como ellos afrontaron dichos obstáculos en las mediciones, principalmente sobresale la fabricación de cajas climatizadas para que los equipos de medición no sufran los efectos de cambios abruptos en temperatura, presión (e.g. momentos previos a tormentas se pueden sentir variaciones en la presión ambiente que afecta considerablemente los

equipos de medición), etc. Mientras que para mitigar los efectos de las vibraciones se basaron en el análisis de sensibilidad de cada equipo mientras circula aire limpio por el tubo de muestreo, descartando así aquellos equipos que presentaban comportamientos anómalos en forma de picos en sus gráficas al encontrarse con caminos mal acondicionados. Finalmente, la tercera presentación de interés a cargo de David Kittelson, profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Minnesota [32], presenta los desarrollos de investigaciones en curso como lo son las mediciones espacio temporales de emisiones de un vehículo a la vez, también la determinación de puntos críticos donde las emisiones se concentran en los denominados “*hotspots*” o puntos calientes, principalmente enfocados en flotas vehiculares a nivel local, y finalmente la medición de contaminantes de buses en sus rutas de operación mediante estaciones de monitoreo externas. El sr. Kittelson recalca lo limitado que es la cobertura de las estaciones de monitoreo estacionarias que se encuentran esparcidas por el territorio, por ello centra su investigación en el desarrollo de sensores de menor tamaño a un coste reducido, pero manteniendo cierto nivel de precisión apoyándose en calibraciones periódicas en terreno para así corregir las correlaciones existentes entre la medición de contaminantes, la temperatura y humedad ambiente. Esto con la finalidad de examinar las concentraciones de contaminantes en terreno e identificar los denominados puntos calientes especialmente en aquellas zonas de riesgo (sectores de escasos recursos socioeconómicos).

Recapitulando, en la sección 1.3 se revisa la información pertinente a los equipos de medición empleados en las mediciones de contaminantes en ruta, cabe destacar que esta clasificación sumamente importante dado que considera una serie de factores medioambientales que alteran la medición de forma significativa, es por lo que estos equipos se equipan con sensores diseñados para minimizar esta interacción negativa. La normativa estadounidense 40 CFR parte 1065, subparte J [24] establece los requerimientos de dichos equipos y los procedimientos de muestreo, calibración, verificación, cálculo de emisiones y secuencias de prueba para los vehículos. Al revisar lo que se está discutiendo actualmente en esta materia se aprecia que los recursos están siendo destinados a mejorar la tecnología, crear elementos de medición más compactos y de menor costo con el fin de democratizar las mediciones de emisiones de fuentes móviles. Similarmente se está cambiando el paradigma de las mediciones, enfocándose en los efectos espaciotemporales que esta conlleva por sobre que el valor que emite un vehículo en particular, esto se aprecia con los denominados puntos calientes (“*hotspots*”), los cuales de encontrarse plenamente identificados pueden dar paso a interacciones positivas con otras iniciativas en el control medioambiental como es el geofencing o establecer límites virtuales en un área geográfica donde se encuentren estos hotspots de contaminantes, tomando acciones correctivas inmediatas y disminuyendo así la tasa de emisiones en la zona. Esta interacción solo se logra una vez que la problemática se encuentra totalmente

identificada y es por ello que las mediciones en ruta de contaminantes son tan importantes, dado que sienta las bases de lo que serán legislaciones más restrictivas y a su vez más protectoras del medio ambiente.

2. Metodología

2.1. Fases e hitos por objetivo

Se plantea un sistema de hitos y resultados para manejar el avance de los objetivos específicos. Para ello cada objetivo se separa en fases, cada una de ellas teniendo su propio hito que puede ser controlado y que permite tener un seguimiento del avance.

Al trabajar el primer objetivo específico **“Identificar la aplicabilidad de las normativas internacionales en Chile con el monitoreo en ruta con PEMS”**, se plantean las siguientes cinco fases:

- Realizar una revisión bibliográfica extensa de la normativa Europea (EURO) y norteamericana (EPA & CARB).
- Realizar una revisión bibliográfica de la normativa nacional haciendo énfasis en similitudes que existan con su par internacional.
- Identificar aquellos valores que pueden ser aplicados sin grandes modificaciones a nivel nacional.
- Identificar y modificar aquellos valores que no se adapten a la realidad nacional.

Las primeras dos fases contemplan una revisión bibliográfica de las normativas nacionales e internacionales, aquí se busca encontrar parámetros claves que caractericen la aplicación de PEMS a nivel nacional. En las últimas dos fases se seleccionan aquellos parámetros clave y se comienza a trabajar en función de ellos, adaptando ciertos valores para presentarlos de mejor forma y manteniendo otros dada su simpleza o potencial que presenten. Este primer objetivo responde a la sección del estado del arte, donde se muestra como otras naciones aprovechan esta tecnología, permite identificar falencias y remediarlas.

El segundo objetivo específico **“Proponer un protocolo para la medición de emisiones en ruta mediante el sistema PEMS”** contempla las siguientes seis fases:

- Analizar procedimientos existentes de medición con PEMS a nivel nacional.
- Realizar una revisión técnica del equipamiento disponible, tomando en consideración parámetros como: tiempo de respuesta, tipo de funcionamiento, mediciones en base húmeda o seca.
- Confeccionar un primer borrador.
- Modificar dicho borrador y apoyarse en las observaciones.
- Crear un protocolo base que permita realizar mediciones.

Las primeras tres fases contemplan una revisión en tres niveles distintos, la primera a nivel internacional donde se enfoca en el análisis de otras naciones, como ellas realizan sus mediciones y como muestran los resultados, también se indaga como organismos privados realizan las mediciones, esto con el fin de recopilar la mayor cantidad de antecedentes. El segundo nivel se enfoca en analizar protocolos formados a nivel nacional. El tercer nivel busca acotar el desarrollo del protocolo a valores que se esperaran con los equipos disponibles, cabe destacar que este equipamiento es único a nivel nacional. La combinación de estos tres niveles y el posterior desarrollo de los datos permite crear un borrador, que luego es analizado en conjunto a personal calificado y se aplican las correcciones pertinentes, culminando con un protocolo base.

El tercer objetivo específico **“Realizar mediciones experimentales que permitan validar en terreno el protocolo propuesto mediante mediciones con PEMS”** se presenta directamente como resultado de la creación del protocolo y contempla 4 fases:

- Realizar una selección de la población a medir (vehículos particulares, flota de buses públicos, flota de camiones, etc.).
- Realizar las mediciones de emisiones.
- Exportar los resultados y analizar las curvas de emisión.
- Comprobar los resultados obtenidos con inventarios internacionales de emisiones, validando así las mediciones realizadas.
- Analizar las mediciones desde el punto de vista del protocolo y aplicar observaciones válidas para futuras mediciones.

Este objetivo busca utilizar el protocolo propuesto en un ambiente controlado, permitiendo realizar modificaciones en terreno con la finalidad de mejorarlo. La selección de una población representativa permite generalizar correctamente los valores obtenidos mediante las mediciones. Estos resultados posteriormente son analizados y aplicando correcciones según corresponda, realizando correcciones al protocolo base a medida que surjan nuevos antecedentes.

Finalmente, el cuarto objetivo específico **“Analizar el acondicionamiento del sistema PEMS para gases y material particulado”** se escapa de la formulación del protocolo y se centra en la factibilidad de combinar equipos diferentes para formar un único sistema de medición de emisiones PEMS que considere gases y material particulado (masa y número). Este objetivo considera 5 fases:

- Realizar una revisión bibliográfica de los equipos PEMS comerciales.
- Analizar la aplicabilidad de Sensores, mini y micro PEMS para estos efectos.

- Identificar aquellos sistemas que no incorporen los sensores de material particulado (masa y numero), realizar lo mismo para gases.
- Identificar la forma de acondicionar diferentes equipos (e.g. Pegasor PPS-M) para utilizarlo en paralelo a PEMS.

Este último objetivo se centra en la integración de diferentes sistemas de medición en una única plataforma como lo es el PEMS, permitiendo obtener mediciones de diversos contaminantes que usualmente requieren de una versión mucho más costosa o no existente en la línea del fabricante.

Dada la naturaleza de este trabajo, se define realizar la revisión bibliográfica como una única fase independiente del objetivo específico al que responda. Gran parte de este trabajo investigativo se presenta en la sección 1, dejando detalles a ser desarrollados en los apartados siguientes. Por otra parte, la confección del protocolo mencionado se apoya en memorias y tesis existentes [25], recalcando el hecho de que este protocolo debe ser adaptado a la realidad Chilena y que este quedará abierto a modificaciones posteriores una vez cambie la legislación vigente.

2.2. Equipos utilizados

Durante la etapa de medición y validación del protocolo se utilizan equipos portátiles de medición de emisiones (PEMS) comerciales del fabricante SENSORS Inc. [33] en sus modelos SEMTECH – D y SEMTECH – G, dicha diferenciación viene dada por el combustible que utiliza el vehículo analizado, siendo D para vehículos diesel y G para aquellos que utilicen gasolina. Estos sistemas de medición presentan fallas en algunos de los analizadores internos, producto de aquello se emplean de forma paralela si se desea obtener el set completo de emisiones gaseosas provenientes de un vehículo, utilizando el analizador de NO del SEMTECH – G junto a los analizadores de CO, CO₂ y THC del SEMTECH – D. Las características principales de dichos equipos se presentan a continuación en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Especificaciones equipos SEMTECH – D y G. Modificado de [34] y [35]. Los valores propios de cada equipo se presentan con su distintivo característico.

Especificaciones generales del sistema		
Requerimientos de alimentación eléctrica	60 [A] a 12 [V] DC durante calentamiento / 30 [A] en condición estacionaria	
Temperatura de operación	0 a 45 [°C]	
Dimensiones generales	355 x 432 x 549 [mm]	
Peso de la unidad	SEMTECH – D 35,4 [kg]	SEMTECH – G 40,0 [kg]
Tiempo de calentamiento	60 [min]	
Resolución en tiempo	1 [ms]	
Frecuencia de muestreo	1 [Hz]	
Especificaciones THC – FID Calentado (SEMTECH – D)		

Rango de medición (a selección del usuario)	0 a 100 [ppmC]	0 a 1.000 [ppmC]	0 a 10.000 [ppmC]	
Exactitud	± 2,0 % en lectura o ± 5 [ppmC], lo que sea mayor		± 2,0 % en lectura o ± 25 [ppmC], lo que sea mayor	
Resolución	0,1 [ppmC]	1,0 [ppmC]	1,0 [ppmC]	
Linealidad	± 1,0 % en lectura o ± 3 [ppmC], lo que sea mayor		± 1,0 % en lectura o ± 10 [ppmC], lo que sea mayor	
Repetibilidad	± 1,0 % en lectura o ± 2 [ppmC], lo que sea mayor		± 1,0 % en lectura o ± 10 [ppmC], lo que sea mayor	
Ruido	± 2 [ppmC]		± 10 [ppmC]	
Deriva del valor SPAM (en más de 8 horas)	± 1,0 % en lectura o ± 3 [ppmC], lo que sea mayor		± 1,0 % en lectura o ± 15 [ppmC], lo que sea mayor	
Deriva del valor ZERO (en más de 2 horas)	± 5 [ppmC]		± 10 [ppmC]	
Tiempo de calentamiento	60 [min]			
Tiempo de respuesta	T90 ≤ 2 [s]			
Flujo volumétrico	2 [lpm]			
Frecuencia de muestreo	Hasta 4 [Hz], configurable			
Temperatura de operación	191 [°C]			
Especificaciones THC – FID Calentado (SEMTECH – G)				
Rango de medición (a selección del usuario)	0 a 100 [ppmC]	0 a 1.000 [ppmC]	0 a 10.000 [ppmC]	0 a 40.000 [ppmC]
Exactitud	± 2,0 % en lectura o ± 5 [ppmC], lo que sea mayor		± 2,0 % en lectura o ± 25 [ppmC], lo que sea mayor	± 2,0 % en lectura o ± 100 [ppmC], lo que sea mayor
Resolución	0,1 [ppmC]	1,0 [ppmC]	1,0 [ppmC]	10,0 [ppmC]
Linealidad	± 1,0 % en lectura o ± 3 [ppmC], lo que sea mayor		± 1,0 % en lectura o ± 10 [ppmC], lo que sea mayor	± 1,0 % en lectura o ± 40 [ppmC], lo que sea mayor
Repetibilidad	± 1,0 % en lectura o ± 2 [ppmC], lo que sea mayor		± 1,0 % en lectura o ± 10 [ppmC], lo que sea mayor	± 1,0 % en lectura o ± 40 [ppmC], lo que sea mayor
Ruido	± 2 [ppmC]		± 10 [ppmC]	± 40 [ppmC]
Deriva del valor SPAM (en más de 8 horas)	± 1,0 % en lectura o ± 3 [ppmC], lo que sea mayor		± 1,0 % en lectura o ± 15 [ppmC], lo que sea mayor	± 1,0 % en lectura o ± 60 [ppmC], lo que sea mayor
Deriva del valor ZERO (en más de 2 horas)	± 5 [ppmC]		± 10 [ppmC]	± 20 [ppmC]
Tiempo de calentamiento	60 [min]			
Tiempo de respuesta	T90 ≤ 2 [s]			
Flujo volumétrico	2 [lpm]			
Frecuencia de muestreo	Hasta 4 [Hz], configurable			
Temperatura de operación	191 [°C]			
Especificaciones CO, CO2 y HC – NDIR				
Gas	CO	CO2	HC	
Rango de medición	0 a 8 %	0 a 20 %	0 a 2.000 [ppm] hexano	

			0 a 4.000 [ppm] propano
Exactitud	± 3 % en lectura o 50 [ppm], lo que sea mayor	± 3 % en lectura o ± 0,1 %, lo que sea mayor	± 3 % en lectura o 4,0 [ppmC6], lo que sea mayor
Resolución	10 [ppm]	0,01 %	1 [ppmC6]
Linealidad	± 2 % en lectura o 20 [ppm], lo que sea mayor	± 2 % en lectura o ± 0,05 %, lo que sea mayor	± 2 % en lectura o 2,0 [ppmC6], lo que sea mayor
Repetibilidad	± 2 % en lectura o 20 [ppm], lo que sea mayor	± 2 % en lectura o ± 0,05 %, lo que sea mayor	± 2 % en lectura o 2,0 [ppmC6], lo que sea mayor
Ruido	± 20 [ppm]	± 0,02 %	± 1 [ppmC6]
Deriva del valor SPAM (en más de 8 horas)	± 2 % en lectura o 20 [ppm], lo que sea mayor	± 2 % en lectura o 0,1 %, lo que sea mayor	± 2 % en lectura o 2,0 [ppmC6], lo que sea mayor
Deriva del valor ZERO (en más de 2 horas)	± 0,005 % (50 [ppm])	± 0,1 %	± 4 [ppmC6]
Tiempo de calentamiento	45 [min]		
Tiempo de respuesta	T90 ≤ 3 [s]		
Frecuencia de muestreo	0,833 [Hz]		
Flujo volumétrico	2 [lpm]		
Especificaciones NO y NO ₂ – NDUV (SEMTECH – D)			
Gas	NO		NO ₂
Rango de medición	0 a 2.500 [ppm]		0 a 500 [ppm]
Exactitud	± 3 % en lectura o 15 [ppm], lo que sea mayor		± 3 % en lectura o 10 [ppm], lo que sea mayor
Resolución	1 [ppm]		
Linealidad	± 2 % en lectura o 5 [ppm], lo que sea mayor		
Repetibilidad	± 2 % en lectura o 5 [ppm], lo que sea mayor		
Ruido	± 2 [ppm]		
Deriva del valor SPAM (en más de 8 horas)	± 2 % en lectura o 20 [ppm], lo que sea mayor		± 10 [ppm]
Deriva del valor ZERO (en más de 2 horas)	± 10 [ppm]		
Tiempo de calentamiento	45 [min]		
Tiempo de respuesta	T90 ≤ 2 [s]		
Frecuencia de muestreo	Hasta 4 [Hz], configurable		
Flujo volumétrico	3 [lpm]		
Especificaciones NO – NDUV (SEMTECH – G)			
Rango de medición	0 a 4.000 [ppm]		
Exactitud	± 3 % en lectura o 15 [ppm], lo que sea mayor		
Resolución	1 [ppm]		
Linealidad	± 2 % en lectura o 5 [ppm], lo que sea mayor		
Repetibilidad	± 2 % en lectura o 5 [ppm], lo que sea mayor		

Ruido	± 2 [ppm]		
Deriva del valor SPAM (en más de 8 horas)	± 2 % en lectura o 20 [ppm], lo que sea mayor		
Deriva del valor ZERO (en más de 2 horas)	± 10 [ppm]		
Tiempo de calentamiento	45 [min]		
Tiempo de respuesta	T90 ≤ 2 [s]		
Frecuencia de muestreo	Hasta 4 [Hz], configurable		
Flujo volumétrico	3 [lpm]		
Especificaciones analizador ambiente (Temperatura, Presión y Humedad)			
Sensor	Temperatura	Humedad relativa	Presión ambiente
Rango de medición	- 39 [°C] a 60 [°C]	0,8 % a 100 %	15 a 115 [kPa]
Exactitud	± 0,2 [°C]	± 2 % de 0,0 a 90 % ± 3 % de 90 a 100 %	± 1,5 % de 0 a 85 [°C]
Tiempo de respuesta	-	T90 ≤ 10 [s] a 20 [°C]	T90 ≤ 4 [s]
Herramientas computacionales			
Software utilizado	SENSOR Tech – PC		

Los gases de calibración y auditoria corresponden a mezclas calibradas cuyo gas base es nitrógeno molecular (N_2). Los valores utilizados durante las mediciones se presentan en la Tabla 2.2, mientras que los valores recomendados por SENSORS Inc. [33] en el manual del usuario [34] [35] se presentan entre paréntesis a la derecha del valor utilizado.

Tabla 2.2: Concentraciones de gases utilizadas durante el proceso de calibración y auditoria. Se adjunta el valor recomendado por el fabricante entre paréntesis a la derecha del valor utilizado. Modificado de [34] y [35].

Gas	Concentración – Auditoria	Concentración – SPAM y Calibración
N_2	Grado 5,0 – 99,999 %	Grado 5,0 – 99,999 %
CO_2	12 % (4 a 6 %)	12 % (12 a 14 %)
CO	1.300 [ppm] (200 a 400 [ppm])	1.300 [ppm] (1.200 a 1.400 [ppm])
NO	295 [ppm] (200 a 400 [ppm])	295 [ppm] (1.500 a 2.000 [ppm])
THC (Propano)	220 [ppm] (30 a 50 [ppmC3])	220 [ppm] (200 a 300 [ppmC3])

La medición de material particulado fino se realiza mediante el equipo DEKATI MASS MONITOR DMM – 230 [36], el cual mediante la tecnología de detección eléctrica de las partículas permite monitorear la concentración de partículas volátiles como no volátiles presentes en el flujo de escape, obteniéndose valores totales de concentración en masa y número. Las características principales de dicho equipo se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Especificaciones generales del equipo DEKATI DMM - 230. Modificado de [36].

Parámetro	Valor o Rango
Rango de detección de partículas	0 – 1,5 [μm]
Número de etapas	1 Canal de difusión + 6 impactadores
Flujo volumétrico	10 [lpm] (Nominal)
Presión mínima absoluta	100 [mbar]
Temperatura de operación	15 – 30 [°C]

Humedad relativa de operación	0 – 70 %
Tiempo de respuesta	< 5 [s] con rango de medición de 400.000 [fA] ≈ 15 [s] con rango de medición de 10.000 [fA]
Frecuencia de muestreo	1 [Hz]
Concentración de muestreo	1 a 1000 [µg/m ³]
Dimensiones generales	450 x 266 x 400 [mm]
Peso de la unidad	40 [kg]
Accesorios requeridos	Bomba de vacío, Sistema de condicionamiento de la muestra o unidad de dilución (Dilutor), Computador portátil.
Requerimientos de la bomba	7 [m ³ /hr] a 100 [mbar]
Alimentación eléctrica	100 – 240 [V] AC / 50 – 60 [Hz]
Software utilizado	Dekati Mass Monitor Software – DMMvi

Las mediciones de actividad vehicular se realizan a partir de una integración de sensores y microcontroladores denominado VAM o “*Vehicle Activity Monitor*”. Los sensores que componen dicho equipo se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Resumen de las características generales de la unidad VAM utilizada.

Parte	Característica		
Placa – 1	TTGO T1 con microcontrolador ESP32 / Soporte Arduino		
Placa – 2	GY – 88 / Contiene Barómetro, Acelerómetro y Giroscopio		
Memoria	Micro – SD de 16 [Gb]		
Batería (autonomía)	3,7 [V] y 2.500 [mAh] (10 [hr] de autonomía)		
Sensor	Código	Característica	Unidad de medición
GPS	UBLOX LEA 6S	Módulo individual	Grados
Barómetro	BMP280	Integrado en Placa – 2	[hPa]
Termostato	BMP280		[°C]
Acelerómetro	MPU6050		No aplica
Giroscopio	MPU6050		No aplica

Cada equipo mencionado utiliza una interfaz gráfica tipo software instalada en un equipo portátil (laptop) lo cual permite monitorear de forma instantánea y remota los valores registrados por cada equipo. El software permite configurar cada equipo, realizar calibraciones, iniciar y detener la prueba, realizar pruebas de control y resolución de advertencias de funcionamiento. A nivel de análisis de los valores registrados, se procede con herramientas para hojas de cálculo tipo Microsoft Excel. Además, se utiliza la página GPS Visualizer [37] para combinar las mediciones de emisiones con las obtenidas a partir de las unidades de monitoreo vehicular VAM, visualizando gráficamente esta información mediante el software Google Earth [38].

Finalmente, las mediciones se realizan en las dependencias de la Universidad Tecnológica Metropolitana, Campus Macul, ubicada en Av. José Pedro Alessandri 1242, Ñuñoa, Región Metropolitana [39]. Esta determinación se toma dado que el equipamiento mencionado se encuentra en pruebas constantes por personal de dicha institución, presentándose como un valor agregado ya que el personal tiene experiencia en mediciones y resolución de problemas que puedan presentarse

durante las pruebas en ruta. Además, cuentan con los materiales necesarios para realizar las calibraciones, reparaciones y acondicionamientos de los PEMS a diferentes vehículos. Finalmente, dicho campus posee una ubicación privilegiada donde se pueden diseñar diferentes rutas, desde conducción urbana con tráfico denso hasta conducción en alta velocidad.

Esta metodología se formula a partir de hitos a cumplir, los cuales son clave para un correcto desarrollo, tanto en las mediciones a realizar como en el desarrollo de esta memoria de título. En esta sección se presentan de forma concisa las actividades más relevantes, junto al equipamiento empleado durante las actividades experimentales (mediciones en ruta de contaminantes) y las herramientas tecnológicas que permiten el análisis de los datos medidos.

3. Protocolo de medición PEMS

En esta sección se abordan todos los aspectos necesarios para la realización de pruebas en ruta con condiciones de tráfico real o RDE (*“Real Driving Emissions”*), caracterizando así las emisiones de contaminantes provenientes de vehículos ligeros y comparándola con la normativa ambiental vigente. Para ello se establece una metodología que engloba todo el proceso que va desde el diseño del ensayo, preparación y realización de este, seguido del post procesamiento de los datos y su análisis final, cada uno de estos puntos es abordado en detalle y se revisan los efectos de factores externos e internos a la prueba.

Dada la naturaleza de la prueba RDE, existe un factor de aleatoriedad propio asociado a la conducción en situaciones reales, donde innumerables variables quedan a merced de distintos factores que terminan impactando los resultados de la prueba, ya sea positiva o negativamente. Debido a esto, normalmente las pruebas de homologación vehicular se realizan en un ambiente controlado, donde la repetibilidad de los resultados es crucial, lamentablemente esta metodología permite la incorporación de dispositivos trampa o *“Defeat Devices”* cuya única finalidad es simular una condición de operación cuando el vehículo se somete a estas pruebas al interior de un laboratorio, manteniendo otras prestaciones cuando se somete a una conducción en tráfico real.

Producto del denominado Escandalo Volkswagen, diversas naciones han adoptado diferentes metodologías que permiten mantener, pero controlar en cierta medida la variable aleatoria inherente a la conducción en tráfico real, la Unión Europea sobresale gracias a la implementación de mediciones en conducción real como una prueba obligatoria para la homologación vehicular (presente desde la normativa Euro 6).

El protocolo propuesto se compone de dos partes, la primera responde a los pasos previos a la realización de la prueba, incluida esta, y todas las variables asociadas a ella, mientras que la segunda trata el post procesamiento de los datos y su posterior análisis, esto se visualiza de mejor manera en la Figura 3.1 y la versión compacta puede ser revisada en el anexo de este documento.

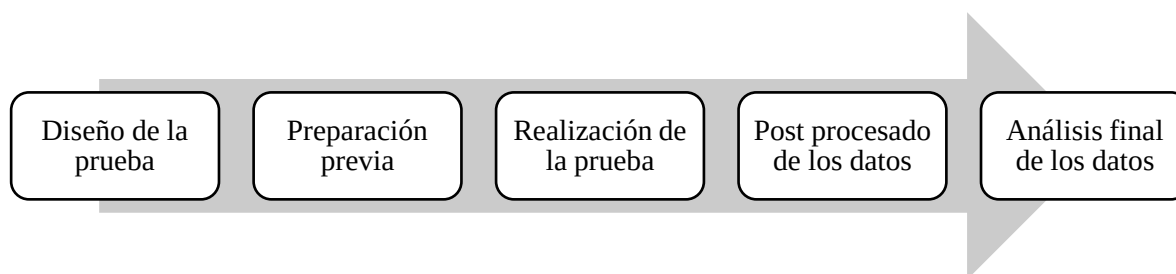


Figura 3.1: Metodología general aplicada en ensayos de emisiones en ruta RDE.

3.1. Diseño de la prueba

En esta primera etapa, previo a la definición de las variables básicas y relativamente constantes en las pruebas de emisiones vehiculares, se debe determinar el objetivo general del estudio que se llevará a cabo, es decir, se debe definir cuáles serán los parámetros por controlar, cuál será el enfoque que se le dará al análisis final de los datos procesados y que hipótesis comandará al estudio durante toda la duración de este. Como se mencionó anteriormente, el diseño de la prueba debe permitir la repetibilidad y asegurar la aleatoriedad de los resultados presentados.

En primer lugar, se debe definir cuál será el objetivo de las pruebas, encontrar este valor es primordial para las etapas siguientes ya que define los contaminantes a medir, la selección del equipamiento, la población objetivo de la medición, la ruta y el conductor encargado de llevar a cabo la prueba. Este objetivo general debe ser respondido posteriormente en las etapas de análisis de los datos. En esta etapa se deben revisar todos los requerimientos previos que se creen para cumplir con el objetivo, se deben hacer las revisiones bibliográficas correspondientes y capacitaciones para el personal. Se debe enfocar en responder todas las preguntas teóricas que puedan existir antes de proseguir a la siguiente fase. Se debe destacar que junto al objetivo general debe existir el resultado esperado de la experiencia, esto ayudará a corroborar en terreno los resultados obtenidos e identificar comportamientos anómalos, los cuales deben ser registrados en la bitácora de la prueba para ser abordados en la etapa de post procesamiento y validación.

Una vez identificado y acotado el objetivo general, se debe hacer la selección de las variables de estudio, cuya función es caracterizar el fenómeno que se busca identificar y corroborar con las pruebas. La prueba de emisiones se basa en la medición de ciertos contaminantes, los cuales dependen directamente del fenómeno que se busque corroborar, además de apoyarse con otras mediciones auxiliares que han resultado útiles en experiencias anteriores. Entre estos dos conjuntos se deben seleccionar el menor número de variables independientes que logre describir el fenómeno en cuestión, apoyándose en elementos estadísticos para determinar la correlación entre las variables y así seleccionar las más representativas. Para efectos de homologación vehicular, los parámetros de ensayo requeridos por Unión Europea a través de su normativa Euro 6 [5] se presentan a continuación, en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Variables de estudio en pruebas de conducción en ruta RDE. Extraído de [5].

Parámetro	Unidad	Fuente ⁽⁸⁾
Concentración Dióxido de Carbono (CO ₂) ⁽¹⁾	ppm	Analizador
Concentración Monóxido de Carbono (CO) ^{(1) (4)}	ppm	Analizador
Concentración Óxidos de Nitrógeno (NO _x) ^{(1) (4)}	ppm	Analizador
Concentración Hidrocarburos totales (THC) ^{(1) (4)}	ppm	Analizador
Concentración Metano (CH ₄) ^{(1) (4)}	ppm	Analizador
Concentración Hidrocarburos no metánicos (NMHC) ^{(1) (4)}	ppm	Analizador ⁽⁶⁾
Concentración Material particulado (PM)	ppm	Analizador
Concentración Número de partículas (PN) ⁽⁴⁾	#/m ³	Analizador
Caudal másico de escape	kg/s	EFM
Humedad ambiente	%	Sensor
Temperatura ambiente	K	Sensor
Presión ambiente	kPa	Sensor
Velocidad del vehículo	km/h	Sensor, GPS o ECU ⁽³⁾
Latitud del vehículo	grados	GPS
Longitud del vehículo	grados	GPS
Altitud del vehículo ^{(5) (9)}	m	GPS o Sensor
Temperatura gases de escape ⁽⁵⁾	K	Sensor
Temperatura refrigerante motor ⁽⁵⁾	K	Sensor o ECU
Velocidad del motor ⁽⁵⁾	rpm	Sensor o ECU
Par motor ⁽⁵⁾	Nm	Sensor o ECU
Par del eje motor ⁽⁵⁾	Nm	Medidor de par
Posición del pedal ⁽⁵⁾	%	Sensor o ECU
Caudal de combustible del motor ⁽²⁾	g/s	Sensor o ECU
Caudal aire de admisión del motor ⁽²⁾	g/s	Sensor o ECU
Situación de fallo ⁽⁵⁾	-	ECU
Temperatura aire de admisión	K	Sensor o ECU
Situación de regeneración ⁽⁵⁾	-	ECU
Temperatura aceite del motor ⁽⁵⁾	K	Sensor o ECU
Marcha real ⁽⁵⁾	#	ECU
Marcha deseada ⁽⁵⁾	#	ECU
Otros datos ⁽⁵⁾	-	ECU

⁽¹⁾ Deben medirse en base húmeda o realizar la corrección correspondiente.

⁽²⁾ Deben determinarse solo si se utilizan métodos indirectos para determinar el caudal másico de escape.

⁽³⁾ Debe utilizarse al menos uno de estos elementos. La medición por sensor y ECU no puede desviarse más de un 4% de la distancia de referencia.

⁽⁴⁾ Parámetro de medición obligatoria en ensayos RDE y que aplique NTE.

⁽⁵⁾ Deben determinarse solo para verificar la situación del vehículo y su funcionamiento.

⁽⁶⁾ Puede calcularse en base a las mediciones de THC y CH₄.

⁽⁷⁾ Puede calcularse en base a las mediciones de NO y NO₂.

⁽⁸⁾ Puede utilizarse múltiples fuentes de parámetros.

⁽⁹⁾ Se prefiere la fuente en función de la presión atmosférica.

Luego de haber determinado las variables o parámetros de estudio, se debe hacer la selección del circuito, los vehículos y el conductor designado. La selección del circuito debe considerar múltiples factores, entre ellos el tipo de vía, la distribución geográfica de esta, la señalética del tránsito fija y cíclica, trabajos que se puedan estar efectuando, la hora y el tráfico asociado a ella, número de vías

de circulación, existencia de corredores de transporte público, velocidad máxima permitida, velocidad promedio con tráfico, ocupación diaria, etc. Es decir, todos los factores que influyen en la realización misma de la prueba junto a aquellos factores que influyen en la repetibilidad y aleatoriedad de la prueba.

Dependiendo del estudio que se quiera realizar, la selección del tipo de vía que formará el circuito de conducción resulta crítico, ya que deja de ser representativo cuando la conducción únicamente se realiza en pasajes poco transitados y de baja velocidad, o cuando únicamente se realizan pruebas en carreteras de alta velocidad sin tráfico. Por ello y basándose en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (O.U.G.C) en su título 2, capítulo 3, artículo 2.3.2 [40], se establecen la siguiente clasificación para las vías de circulación vehicular:

- **Vía Expresa:** Interconecta diferentes comunas a nivel regional, tiene una velocidad de diseño de 80 a 100 [km/h], con gran capacidad de desplazamiento vehicular con flujos superiores a los 4.000 [vehículos/hora] considerando ambos sentidos de circulación.
- **Vía Troncal:** Interconecta diferentes zonas urbanas de una intercomuna, tiene una velocidad de diseño de 50 a 80 [km/h], alta capacidad de desplazamiento vehicular con flujos superiores a 2.000 [vehículos/hora] considerando ambos sentidos de circulación.
- **Vía Colectora:** Esta vía cumple el rol de corredor de distribución entre la residencia, empleos y servicios, tiene una velocidad de diseño de 40 a 50 [km/h], una capacidad vehicular de 1.500 [vehículos/hora] considerando ambos sentidos de circulación.
- **Vía de Servicio:** Ubicadas en centros o subcentros urbanos, tiene como finalidad permitir la accesibilidad a los servicios y al comercio, presenta una velocidad de diseño de 30 a 40 [km/h], una capacidad vehicular de 600 [vehículos/hora] considerando toda su calzada.
- **Vía Local:** Establecen relaciones entre las vías troncales, colectoras y de servicios, además del acceso a la vivienda. Presenta una velocidad de diseño de 20 a 30 [km/h] y una capacidad vehicular baja.

La identificación de estas vías permite planificar correctamente la selección de la ruta y prever diferentes contratiempos que puedan surgir durante el desarrollo de la prueba. Independiente de la planificación teórica de la ruta, se deben hacer rondas de reconocimiento por parte del equipo con el fin de identificar las condiciones actuales, tiempo medio del recorrido, variabilidad del tráfico, trabajos en la ruta y otros imprevistos que puedan surgir.

La selección del vehículo de estudio dependerá únicamente de la finalidad de la prueba, se debe investigar sobre el año del vehículo, la normativa bajo la cual se homologó originalmente, la

normativa bajo la cual se diseñó, la periodicidad de los mantenimientos realizados, el estado de los sistemas de abatimiento de emisiones entre otros componentes mecánicos ya que estos factores pueden afectar negativamente la realización de la prueba. Por otro lado, el conductor designado deberá contar con experiencia bajo el volante, deberá ser capaz de mantener constante el estilo de conducción durante las pruebas, con el fin de disminuir la variabilidad característica de la componente humana.

Dependiendo de la prueba que se quiera llevar a cabo (homologación, control de emisiones, deterioro de los sistemas de abatimiento de emisiones, análisis científico, etc.) se debe definir el número de ensayos a realizar para garantizar que los datos obtenidos tengan validez estadística. En el caso de la normativa Euro 6, las mediciones en RDE vienen como apoyo a la certificación mediante el ciclo de pruebas bajo dinamómetro de chasis (actualmente utilizando el WLTP), por ello requiere de una única prueba RDE cuya duración varía entre 90 a 120 minutos y se realiza para ratificar lo obtenido al interior del laboratorio. Tomando en consideración dicho antecedente y recordando que estas pruebas requieren de una gran cantidad de tiempo y de los recursos disponibles, se recomienda la realización de 3 pruebas independientes de 40 a 60 minutos, manteniendo el vehículo, la ruta y el conductor, disminuyendo así la variabilidad que puede sufrir el ensayo producto del tráfico cambiante, condiciones ambientales y estilos de conducción entre otros.

Una vez identificadas todas las variables de medición, la selección de la ruta, los vehículos de estudio y el conductor, se deben programar las mediciones a realizar, tomando en consideración el tráfico y su relación con la hora. Se deben considerar las limitantes propias de los equipos de medición como lo son la duración de las baterías, los tiempos de calibración y validación. Las baterías utilizadas proporcionan una duración fija en la cual el equipo puede operar sin problemas, normalmente modulares lo que permite reemplazarlas sin afectar el funcionamiento del PEMS, tomando en consideración las veces que debe realizarse dicha tarea y la duración que implica. La calibración del equipo se debe realizar al comienzo de la jornada de medición, empleando señal cero y rango para fijar los límites de linealidad que posee el equipo, luego de cada medición se deben validar los datos (audit), donde se corrobora el estado de la calibración mediante la señal rango, todas las validaciones deben quedar registradas para ser utilizadas durante el post procesado de los datos. La denominación de señal cero corresponde al límite inferior de la escala del analizador, si es un analizador de gas se introduce nitrógeno puro (N_2). Mientras que, la señal rango, corresponde a un gas patrón que contiene una cantidad conocida de contaminante, por ejemplo, la señal rango utilizada en las mediciones de NO_x es una mezcla de NO_2 y N_2 a una concentración conocida.

El diseño de la prueba debe quedar consignado una vez que todas las variables queden definidas, esto plasma los lineamientos que el equipo de trabajo debe seguir a la hora de pasar a las siguientes fases, cualquier desviación del diseño de la prueba debe quedar registrado en la bitácora del experimento independiente de la naturaleza del cambio, ya que estos pueden afectar los resultados de la prueba y debe quedar registro en caso de que se deban hacer modificaciones en la etapa de post procesado de los datos.

3.2. Preparación previa

En esta etapa se realizan todas las etapas previas al inicio de la toma de datos, es decir, incluye la selección del equipamiento acorde a las variables de estudio, la preparación del equipo, seleccionar métodos de anclaje adecuados y formular el plan de instalación del equipo tomando en consideración el peso y volumen de estos (batería incluida), realizar las maniobras de montaje correspondiente, calibrar los sensores y registrar los resultados de este procedimiento.

La correcta realización de esta etapa brinda robustez a las mediciones realizadas posteriormente, la montura de las diversas líneas de muestreo a los sensores debe quedar perfectamente posicionadas cuidando que el calor proveniente del escape del vehículo no las afecte, ni que existan curvas pronunciadas en estas, ya que pueden generar pulsaciones al interior de las líneas y con ello mediciones erráticas. Además, el equipo de trabajo se debe asegurar de purgar las líneas de muestreo para así eliminar el condensado que se forma al almacenar los componentes cuando no se utilizan.



Figura 3.2: Preparación de los sistemas de medición previo al montaje al interior del vehículo, revisión de los analizadores, filtros y calibración.

La línea que redirige el escape del vehículo a la zona de muestreo debe quedar lo más directa posible, evitando la incorporación de múltiples codos y la utilización de líneas demasiado largas que puedan actuar como un intercambiador de calor, enfriando así el flujo de escape y alterando los valores medidos. Esta línea principal corresponde a la única variable que debe ser planificada con anterioridad a la llegada del vehículo previo a la prueba, ya que de necesitar adaptadores dado los diversos modelos que los fabricantes de automóviles implementan en sus vehículos (número de puntas de escape, posición de estas, ángulos de corte, etc.) se dificulta la existencia de un único kit universal. También se debe cuidar de la posición del tubo de muestreo en el vehículo, este normalmente se posiciona en el parabrisas trasero mediante ventosas de succión, la selección de esta depende del tipo del vehículo, la posición y la cantidad de puntas de escape presentes. Se recomienda la instalación de dos ventosas por tubo de muestreo, esto le otorga mayor estabilidad a dicho elemento evitando que rote producto del peso de la línea de escape y posiblemente dañe las líneas de muestreo. Finalmente, se debe cuidar que la línea de muestreo no presente curvas pronunciadas bajo la toma del equipo, dejando un punto mínimo donde se puede formar condensación y detener el muestreo del sistema, por ello se debe procurar que el punto más bajo del sistema, en cuanto a la conexión de la línea de muestreo, sea la toma del equipo.



Figura 3.3: Montaje de los equipos de medición al interior del vehículo junto a las líneas de muestreo, alimentación y conexión. Las baterías (no visibles en la figura) se posicionan en la parte posterior de los equipos.

Una vez instalados todos los equipos y diversas líneas se deben realizar pruebas de estanqueidad en todas las juntas, en la línea principal del escape esto se puede realizar al encender el vehículo y

bloquear el final de la línea, mientras que para las diversas sondas de muestreo esto se puede realizar mediante el controlador de cada equipo, recordando que estas operan bajo una bomba de vacío.

Los equipos PEMS normalmente operan mediante baterías recargables, éstas tienen un tamaño considerable al igual que un peso no menor, además de tener una duración limitada de funcionamiento, lo que se traduce en una cantidad conocida de ensayos, por ello se debe tener preparada una segunda batería en caso de que las mediciones se extiendan por un tiempo mayor al planificado. También se debe considerar la opción de utilizar dos baterías desde el comienzo de la jornada, nuevamente, esto conlleva sus propios contratiempos que deben ser analizados previamente por el equipo de trabajo. En ciertas ocasiones se puede operar el equipo bajo un generador convencional, se recomienda esta configuración cuando las mediciones se realizan en zonas aisladas y/o cuando la jornada de medición será extensa.

Finalmente, la calibración de los sensores se debe realizar acorde al manual de operación de cada equipo, tomando en consideración las directrices existentes en la normativa título 40 CFR parte 1065, subparte D [41], además de considerar que los equipos deben encontrarse en su condición de operación, es decir, en caso de requerir que alcancen cierta temperatura se debe encender el equipo con la debida antelación, para estos efectos se considera el encendido de todos el equipamiento seleccionado al menos una hora antes de que se instalen en el vehículo. La calibración al ser propia y diferente en cada equipo se requerirán de elementos accesorios para llevar a cabo las calibraciones (gases de calibración, generador de partículas, etc.), de no contar acceso inmediato a aquellos elementos se debe procurar tenerlos a disposición al menos cinco días antes de realizar el ensayo, con esto se logran realizar calibraciones o pruebas previas a los equipamientos y en caso de existir un error o descubrir una falla, permite realizar las correcciones pertinentes previo a la prueba y así no afectar el desarrollo de esta. Todos los valores obtenidos durante este procedimiento deben ser registrados en la bitácora de medición ya que serán empleados en la fase de Post procesado de los datos, donde se realizarán los ajustes de linealidad correspondientes, al igual que se deben registrar todos los eventos adversos que surjan. Se recomienda realizar las calibraciones antes de iniciar el proceso de montaje y así utilizar provechosamente el tiempo que se dispone antes de que llegue el vehículo. Una vez calibrados los equipos estos no pueden ser apagados, se corre el riesgo de que se pierdan la calibración e invalide la medición, de ocurrir esto se debe repetir el procedimiento de calibración con el equipo en la posición final al interior del vehículo. Los valores obtenidos al finalizar la calibración deben ser registrados en la bitácora de la prueba.



Figura 3.4: Montaje finalizado, se aprecia la sonda de muestreo en el parabrisas trasero, de donde se alimentan todos los sensores de emisiones con sus respectivas líneas.

Una vez completadas las fases previas al inicio de la prueba se debe realizar una inspección final a todo el vehículo con los sistemas de monitoreo instalados, revisando cada junta, unión, acople, conexión ya sea eléctrica, neumática o mecánica. Esta revisión debe ser realizada por todo el equipo de trabajo, en especial por el conductor del vehículo y los experimentadores principales, ya que, una vez comenzada la prueba, cualquier error en el montaje puede resultar en fallas o accidentes, además de invalidar la medición.

3.3. Realización de la prueba

Ya completada la inspección final al vehículo y calibrado todos los equipos de medición, se debe realizar la conexión a la o las baterías mientras se desconecta el equipo de la alimentación directa de la red eléctrica. Luego, con el vehículo detenido y diez segundos previo al encendido de este se debe iniciar la toma de datos de todos los sensores instalados, este procedimiento marca el inicio de la prueba. Ya iniciada la recolección de datos, se verifica que todos los sensores estén registrando valores válidos y se puede dar encendido al motor, inmediatamente después de esta fase se da inicio al recorrido, esto se debe principalmente a que en la actualidad se deben evaluar las emisiones existentes en la partida en frío, ya que es el tiempo donde los diversos sistemas de abatimiento de emisiones se encuentran fríos y por ende no operativos o con una eficiencia menor. El conductor debe circular al interior del circuito definido con anterioridad, manteniéndose dentro de los márgenes de velocidad y tipo de conducción requeridos por la prueba.

Al finalizar el circuito, se debe detener el vehículo de forma segura en el aparcadero definido, apagar el motor y diez segundos después detener la toma de datos por parte de los sensores. Se deben descargar los archivos correspondientes y almacenarlos en una carpeta única con la identificación del vehículo, la fecha y la hora de inicio de la prueba. En esta carpeta debe existir la información relacionada a la calibración inicial de los sensores y adjuntar el audit que se realiza al final de cada prueba. La auditoría o audit de los sensores se realiza de forma similar a la calibración, la diferencia radica que en esta etapa se busca determinar la deriva o drift de los sensores al exponerse a la misma señal que los calibró.

Las horas de inicio y termino de cada prueba deben quedar registradas en la bitácora de la jornada, además de observaciones generales de cada una. Los datos medidos deben ser constantemente revisados por personal técnico calificado, ya que pueden determinar de forma temprana algún mal funcionamiento de los sensores, lo cual puede ser reparado durante la jornada sin afectar el desarrollo del resto de las pruebas, esto forma parte de una primera verificación de datos que se realiza en terreno.

3.4. Post procesado de datos

El post procesado de datos considera todas las etapas que transforman los datos brutos proveniente de los diferentes sensores en valores útiles y comparables, ya sea mediante herramientas computacionales y tratamientos estadísticos. Además, considera las etapas de sincronización de los datos que permitirá visualizar emisiones, velocidad y recorrido entre otras, de forma gráfica mediante la herramienta GPS visualizer [37], este proceso se explicara en detalle en la sección 3.4.5.

3.4.1. Tratamiento inicial

Esta etapa considera todos los primeros tratamientos que debe recibir la información proveniente de los equipos. Inicia con la recolección de los diferentes ficheros, normalmente un archivo CSV que se caracteriza por separar los valores utilizando comas, este tipo de ficheros permite el trabajo en hojas de cálculo. Se debe asignar un nombre común a todos los ficheros que identifique claramente el vehículo, la fecha, hora de inicio de la prueba y el equipo que lo generó, todos estos ficheros deben almacenarse en una carpeta común para facilitar el acceso a ellos cuyo nombre se especificó en la sección 3.3.

Se declara equipo principal el sistema PEMS, por lo que todos los ficheros deben sincronizarse en función de la primera medición registrada por este equipo. Es sumamente importante trabajar con un formato único que permita realizar el proceso de sincronización de forma expedita.

Los equipos de medición normalmente arrojan todo el set de variables que estos miden, independiente de la funcionalidad final de equipo, es decir, algunos analizadores de gas pueden medir voltajes si se conectan las líneas accesorias correspondientes. Estos valores al no ser medidos se traducen en columnas con datos nulos que deben ser removidas para simplificar los ficheros y facilitar el trabajo con ellos. En un proceso sencillo se procede a eliminar las columnas con valores nulos y/o no relevantes para el estudio, esto se debe realizar apoyándose en el diseño de la prueba, sección 3.1, donde se declaran las variables principales y secundarias a controlar.

3.4.2. Correcciones generales

Estas correcciones se desarrollan en función de los valores obtenidos por las calibraciones y revisiones post medición o auditorias, con ellas se corrigen las desviaciones en la linealidad de los sensores, además de tratar las mediciones anómalas como lo son los valores negativos. Utilizando los registros en la bitácora de medición como guía en las correcciones.

Acorde a los valores registrados durante el proceso de calibración y la auditoria posterior de los analizadores, se debe revisar la desviación de linealidad o deriva que adquirieron durante la medición. Los valores de deriva se deben encontrar dentro del margen admisible establecido por la normativa EURO 6, referente a las pruebas RDE [5], estos valores se presentan en la Tabla 1.15. Si la diferencia entre los resultados de la deriva del cero y del rango antes y después del ensayo es superior a la permitida, se invalidarán todos los resultados obtenidos y se deberá repetir el ensayo. De encontrarse dentro del rango permisible, la corrección debe realizarse en función del valor obtenido durante la auditoria, además de realizar el ajuste en función del tiempo. El procedimiento de corrección inicia al registrar el valor obtenido cuando se expone el sensor a la misma señal utilizada durante la calibración (proceso de auditoria o audit), registrando los datos obtenidos tanto para la señal de cero como para la de spam. Luego, para corregir la deriva de los sensores se debe crear una función que combine la información de la recta original con la recta al finalizar la prueba, además de considerar el efecto del tiempo en dicha corrección. Esto se traduce en un mapa de correcciones a aplicar que dependen del tiempo y de la magnitud del valor medido. Cabe destacar que la deriva a través del tiempo de los sensores puede ser considerada lineal, por ello dicho ajuste suele simplificarse mediante una relación de proporcionalidad directa.

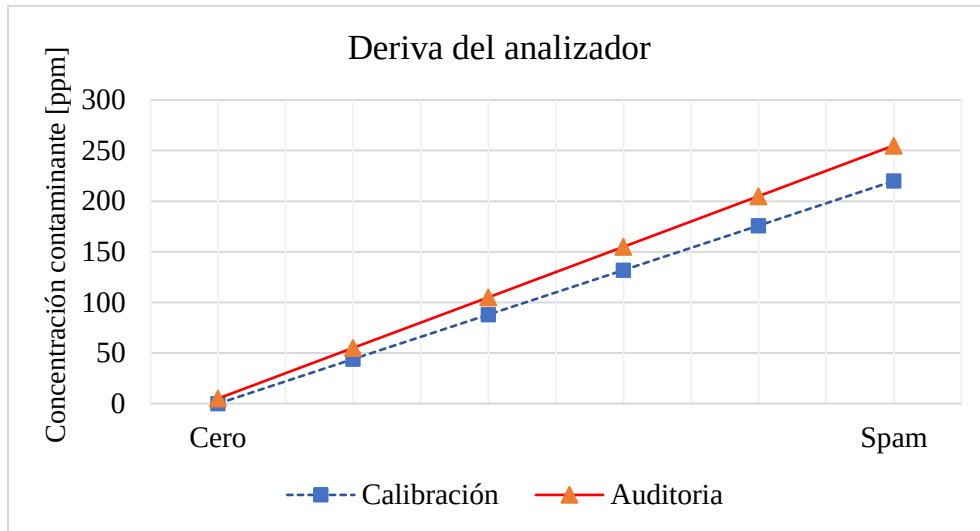


Figura 3.5: Ejemplo comparativo del cambio en la linealidad del analizador al ser muestreado con la misma señal, al inicio y fin de la prueba (calibración y auditoria respectivamente).

La Figura 3.5 muestra un ejemplo de la información obtenida del procedimiento de calibración junto a la auditoria, presentando de forma visual el efecto que tiene la deriva de los sensores. Como se mencionó con anterioridad, la deriva solo se comprueba al finalizar la prueba y se obtiene un valor máximo de desviación respecto a la calibración inicial, pero este comportamiento es gradual en el tiempo. La determinación del comportamiento de los sensores a través del tiempo escapa a los alcances de esta memoria de titulación, pero para efectos de este protocolo se reconoce la experiencia recopilada de múltiples fuentes, estableciendo que el efecto del tiempo es lineal en la deriva de los sensores, en otras palabras, al corregir cada valor se considerarán dos factores, uno dependiente de la magnitud del valor medido (el cual se obtiene de la comparación de las rectas de calibración y auditoria) y el otro factor dependiente del tiempo en el cual se realizó la medición, este último se obtiene de una comparación directa donde cero desviación (0%) ocurre únicamente en el tiempo inicial o cero, y la desviación máxima (100%) ocurre al momento de realizar la auditoria (tiempo final de la prueba). Con estas correcciones se busca trasladar los valores medidos a la base común que es el tiempo cero.

Por otro lado, dependiendo de la naturaleza de los sensores empleados por los equipos estos arrojan valores de concentración en base seca ($x_{i,sec}$) o húmeda ($x_{i,hum}$). Considerando que ciertas mediciones requerirán de la integración de diferentes equipos provenientes de diferentes fabricantes se recomienda la estandarización de los valores a trabajar, es por ello que se determina la utilización de valores en base húmeda, lo cual requerirá de la aplicación de un factor de corrección (K_w) que multiplicará el valor obtenido en base seca. Esto se visualiza en la ecuación (3.1).

$$[]_{hum} = []_{sec} \cdot K_w \quad (3.1)$$

Este factor de corrección dependerá de la humedad absoluta presente en el aire de admisión, en ciertos equipos este factor se entrega de forma automática lo cual facilita la corrección de los valores obtenidos.

El flujo masico de los gases de escape debe recibir su propio factor de corrección, el cual responde a la temperatura ambiente, la humedad relativa y la presión atmosférica. El valor corregido es entregado automáticamente por el programa asociado, además de los valores iniciales, lo que permite corroborar la transformación realizada por el software.

3.4.3. Obtención de emisiones instantáneas

Los analizadores registran las mediciones como valores de concentración de contaminantes, normalmente como porcentaje o partes por millón de un volumen definido (un metro cúbico), si bien este valor es relativamente útil para comparar el desempeño de un mismo vehículo a lo largo del tiempo, al ser dependiente del flujo volumétrico de los gases de escape no nos sirve como valor a comparar entre diferentes vehículos. Producto de aquello se deben generar columnas anexas a las existentes en los ficheros que conviertan estos valores de concentración a valores de emisión másica, ya sea por unidad de tiempo o por distancia recorrida.

La emisión instantánea corresponde a la transformación del valor de concentración en un valor de masa por unidad de tiempo, se recomienda el uso del sistema métrico para ello, resultando en valores de kilogramos por segundo ([kg/s]). La ecuación (3.2) permite obtener valores de emisiones instantáneas en función de la concentración del contaminante seleccionado.

$$\dot{m}_i = \frac{x_{i,hum} \cdot MM_i \cdot \dot{m}_{esc,co}}{MM_{esc}} \quad (3.2)$$

Donde $\dot{m}_i$ corresponde a la emisión instantánea del contaminante en kilogramos por segundo ([kg/s]), $x_{i,hum}$ es la concentración volumétrica del contaminante, en base húmeda, expresada en porcentaje o partes por millón (% o [ppm]), MM_{esc} y MM_i es la masa molar de los gases de escape y la masa molar del contaminante respectivamente en kilogramos por kilomol ([kg/kmol]), finalmente $\dot{m}_{esc,co}$ corresponde al flujo masico corregido de los gases de escape en kilogramos por segundo ([kg/s]).

El cálculo de la masa molar de los gases de escape no es un valor constante y dado que se dispone de diversos sensores en la línea de escape del vehículo, se puede realizar el cálculo y así obtener este valor de forma instantánea, segundo a segundo, acorde a la tasa de medición establecida de 1 [Hz].

La ecuación (3.3) proviene del manual del sistema PEMS de la marca SEMTECH, modelo SEMTECH-D [34]:

$$MM_{esc} = \frac{1}{100} \sum [[CO_2] \cdot 44,01 + [O_2] \cdot 32,0 + [N_2] \cdot 28,013 + [H_2O] \cdot 18,015] \quad (3.3)$$

Cabe mencionar que los valores de concentraciones mostrados corresponden a porcentajes (%) y que asume combustión completa ya que obvia la presencia de contaminantes como NO, NO₂, CO y HC. Las masas molares de los contaminantes a emplear en la ecuación (3.2) para obtener las emisiones instantáneas se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Masas molares de contaminantes comunes. Obtenido de [42].

Contaminante gaseoso	Masa Molar [kg/kmol]
CO ₂	44,01
CO	28,01
NO	30,00
NO ₂	46,00
CH ₄	16,04

En caso de no disponer de la información requerida para hacer uso de la ecuación (3.3), se puede emplear los valores mostrados en la Tabla 3.3, donde se asume una composición fija de los gases de escape para los diferentes combustibles (gasolina y diesel). Emplear esta estrategia resulta en un error a considerar durante el análisis de los resultados.

Tabla 3.3: Aproximación utilizada para obtener la masa molar de los gases de escape cuando no se dispone de la información segundo a segundo. Extraído de [43].

Gasolina		
Especie química	Concentración	MM _{esc} aproximada
N ₂	71 %	28,952 [kg/kmol]
CO ₂	14 %	
H ₂ O	13 %	
HC / NO _x / CO	1 – 2 %	
Diesel		
Especie química	Concentración	MM _{esc} aproximada
N ₂	67 %	30,360 [kg/kmol]
CO ₂	12 %	
H ₂ O	11 %	
O ₂	10 %	
SO ₂ / PM / HC / NO _x / CO	0,3 %	

3.4.4. Caracterización por zonas de emisión

Dependiendo de la prueba realizada, se determinan zonas de emisión que deben completarse a medida que el vehículo circula por las vías, estas zonas corresponden a las explicadas en la Tabla 1.4 y se diferencian por las velocidades de circulación del vehículo. Si la prueba realizada correspondía a un

proceso de homologación vehicular mediante RDE, dichas zonas deben encontrarse distribuidas de forma uniforme y deben ser completadas en un único ensayo.

Las zonas de emisión deben ser definidas manualmente, mientras que el filtrado de los datos se puede realizar de forma automática mediante un software u hoja de datos. Esta diferenciación permite agrupar las emisiones en zonas acordes y no mezclar el análisis de ellas. Cada zona debe contener información como el tiempo total de funcionamiento del motor, tiempo total de detención del vehículo, pendiente media del terreno, aceleración media, emisiones máxicas totales por contaminante [g], distancia recorrida [km], emisiones por distancia recorrida [g/km], velocidad media, temperatura ambiente al inicio y fin de la prueba, entre otras que deben ser definidas en la etapa del diseño de la prueba.

3.4.5. Unificación de datos

Finalmente, se debe organizar un fichero unificado con las señales de los distintos analizadores sincronizada en función del tiempo, el cual debe estar acompañado de diferentes gráficas de emisiones y velocidad en función del tiempo, las cuales servirán como referencia visual de la sincronización exitosa de los valores medidos. Estas gráficas deben ser revisadas por personal técnico calificado, los cuales deben aplicar correcciones correspondientes en caso de que exista un desalineamiento de los datos. Se recomienda la revisión de las emisiones de CO₂ en paralelo a la velocidad instantánea del vehículo, ya que existe una correlación directa entre ambos lo cual facilitará el alineamiento de los datos entre el PEMS y la unidad VAM.

Este fichero debe contar con una pestaña destinada al resumen de la prueba, donde debe figurar información promedio y total de los valores medidos. Además de contar con la información básica del vehículo, conductor, estilo de conducción, notas de la ruta, etc. En esta pestaña se puede adjuntar información de las zonas de emisión explicadas en la sección 0 junto a gráficas de las emisiones instantáneas en función del tiempo. Se debe incluir una pestaña que contenga los valores unificados provenientes de todos los equipos utilizados, recordando que estos valores deben estar filtrados, corregidos y sincronizados; asimismo debe existir una pestaña destinada a los valores agrupados por zonas de emisión con su respectivo análisis.

De forma paralela se debe crear un fichero en formato CSV, el cual debe contener la información clave de la prueba y que permita utilizar herramientas externas para visualizar las emisiones en ruta, entre ellas sobresale GPS Visualizer [37] que permite crear un fichero en formato KMZ y revisar posteriormente el recorrido mediante la aplicación Google Earth. Este fichero debe contener información de la unidad VAM (fecha, hora, latitud, longitud, número de satélites, velocidad

instantánea, elevación por barómetro y GPS) e información procesada de los distintos analizadores de emisiones (emisiones instantáneas en [g/s]), de forma simple y ordenada para no dificultar el proceso.

3.5. Análisis de los datos

Dado que el análisis se encuentra fuertemente ligado a la definición de los objetivos de la prueba y al volumen de la población vehicular estudiado, no se pueden generar lineamientos fijos sobre como analizar cada caso. Pese a ello, existen actividades que permiten analizar los datos obtenidos de forma individual sin estar sesgados a una característica en particular. Dichas actividades consisten en estudios por recorrido, ya sea completo o seccionado en zonas, el primero busca encontrar tendencias en las emisiones vehiculares que sean independientes del tráfico vehicular y sus efectos en las velocidades de circulación. Mientras que el análisis por zonas busca separar el recorrido completo en tramos, ya sea por velocidad, gradiente o perfil de aceleración, principalmente se buscan características comunes que permitan generar tramos lo suficientemente representativos y que sean de interés para el análisis final.

El análisis de los datos debe ser apoyado por herramientas estadísticas que permitan identificar las relaciones entre las variables de estudio, principalmente como las emisiones vehiculares se desarrollan al ser medidas en un ambiente real no controlado y como la aleatoriedad del tráfico en ruta afecta los resultados obtenidos. Una herramienta relativamente nueva se introduce en el reglamento de la Unión Europea 2016/427, Apéndice 5 [5], donde se realiza un análisis de emisiones por ventanas de circulación, el cual consta de obtener valores promedios por ventanas de tiempo con el fin de obtener la curva característica del vehículo. Para mayor detalle se recomienda la revisión de la normativa que lo contiene.

Finalmente, se debe recordar la importancia que tiene el utilizar un protocolo definido y probado a la hora de realizar experimentos, ya que estos representan todas las garantías que tiene el grupo de experimentación a la hora de defender los resultados obtenidos. Este protocolo se forma a partir de la revisión exhaustiva de diferentes ejemplares a nivel internacional, apoyándose con documentos que identifican problemáticas comunes y que las desarrollan hasta alcanzar valores estándar. La medición de emisiones en ruta es un tema ampliamente estudiado a nivel internacional pero que resulta relativamente nuevo a nuestra realidad nacional, por ello como una primera implementación se debe desarrollar profundamente controlando la mayor cantidad de aspectos posibles, una vez alcanzada una madurez en cuanto a las mediciones de este tipo, se podrán realizar ajustes que faciliten el proceso sin comprometer los resultados.

4. Mediciones experimentales

Como parte de esta memoria de titulación se propone la realización de mediciones experimentales que permitan validar en terreno, bajo condiciones reales de operación, el protocolo propuestos en el apartado 3, estas mediciones se realizan mediante 2 sistemas PEMS comerciales (SEMTECH – G y SEMTECH – D), además de incorporar un analizador de material particulado del fabricante DEKATI modelo DMM – 230. La fuente de alimentación de los equipos queda a cargo de dos baterías de ciclo profundo, las cuales otorgan una autonomía de 2 horas y 15 minutos, factor clave a considerar al momento de diseñar la prueba y seleccionar las rutas. El vehículo de ensayo corresponde a un todoterreno diesel proporcionado de forma voluntaria para el ensayo, las características técnicas se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Características técnicas vehículo de prueba, extraído de [44]. Valores de homologación vehicular a cargo del Centro de Control y Certificación Vehicular 3CV [45], extraído de [46].

Características técnicas	
Fabricante	Kia
Modelo	Sorento
Año	2014
Combustible / sistema de inyección	Diesel / CRDI
Cilindrada	2.199 [cc]
Potencia máxima	194 [bhp] a 3800 [rpm]
Torque máximo	421 [Nm] a 1800 – 2500 [rpm]
Peso en vacío (s/conductor)	1.815 [kg]
Transmisión	Mecánica de 6 velocidades
Tracción	4 x 2
Sistemas de abatimiento de emisiones	DPF + Catalizador de oxidación
Homologación Vehicular	
Normativa de homologación	Euro 5a
Fecha de homologación	18 de Julio, 2012
Código informe técnico	KI4696E50612S02-9
Contaminante	Valor [g/km]
CO	0,0773
NO _x	0,1528
HC + NO _x	0,1634
MP	0,0008
CO ₂	177

Se contemplan dos rutas que buscan cubrir los tipos de circulación que se enfrenta el conductor promedio en la ciudad de Santiago. La primera ruta considera conducción en zona urbana con una distancia recorrida de aproximadamente 14 kilómetros a una velocidad máxima permitida de 50 [km/h]. La segunda ruta considera principalmente la conducción en autopista de alta velocidad, con aproximadamente 35 kilómetros de recorrido a velocidades máximas permitidas entre 100 y 120 [km/h]. Las características de cada ruta se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Características generales de las rutas contempladas. El valor de elevación corresponde a altura geo referencial.

Ruta	Urbana	Autopista
Distancia recorrida [km]	14,10	34,80
Duración total [min]	35 – 45	50 – 60
Elevación mínima / máxima [msnm]	714 / 559	568 / 644
Velocidad máxima registrada [km/h]	60	105

4.1. Jornada de medición

Durante el desarrollo de la jornada se presentan inconvenientes relacionados a la alimentación del analizador de material particulado (DEKATI DMM – 230), a la calibración del analizador de óxido nítrico NO (SEMTECH – G) y a las conexiones con la unidad controladora del flujómetro. Respecto al equipo DMM – 230, este requiere de alimentación con corriente alterna (AC) a una tensión de 240 [V] la cual es proporcionada por una unidad inversora de 24 [V] DC, lo cual obligó la utilización de ambas baterías conectadas en paralelo para poder alimentar con la tensión requerida, esta configuración presentó una serie problemas que significó la invalidación de los datos obtenidos por este equipo, pero arrojó nuevos antecedentes que permite la modificación del protocolo propuesto para ajustarlo a la realidad del equipamiento disponible.

En cuanto a la calibración del equipo SEMTECH – G, debido a problemas de coordinación para la compra de gases de calibración el equipo de trabajo se vio obligado a calibrar el sensor de NO con una concentración de 1.240 [ppm], lo cual altera la sensibilidad del sensor y la adecua a concentraciones mayores, el problema radica en que el vehículo analizado no logra emitir en la misma magnitud que espera el equipo, por ello los valores registrados presentan a lo menos un orden de magnitud menos que el valor real, esto se ve reflejado en el comportamiento de la curva del contaminante pero donde los valores registrados no superan el valor declarado durante la homologación. Al finalizar la jornada de medición el equipo fue sometido a una limpieza exhaustiva de sus componentes internos, encontrando que este se encontraba saturado con impurezas que afectaban el buen funcionamiento del analizador. Luego de la limpieza se realiza una prueba de funcionamiento encontrándose que el equipo funciona correctamente con la botella de mayor concentración (1.240 [ppm]). Dado que este fue un problema de coordinación, no requiere de correcciones en el protocolo ya que el equipo funciona correctamente.

Finalmente, la unidad controladora del flujómetro presento un problema intermitente donde dejó de registrar el valor de temperatura de los gases de escape, esto se traduce en que el equipo no puede realizar las correcciones por densidad de los gases, valor extremadamente relevante en el cálculo de emisiones gaseosas. Producto de aquello se invalidan los datos obtenidos por los equipos analizadores de gases (SEMTECH – G y D) ya que ambos comparten dicha información.

Producto de estos inconvenientes, los valores de la mayoría de los contaminantes medidos no son representativos del vehículo. Independiente de aquello, la experiencia cumplió su cometido de poner a prueba el equipamiento disponible y el protocolo propuesto, lo que permite adaptar este último para evitar problemas que pueden afectar considerablemente mediciones futuras. El análisis posterior se realiza en base a las mediciones de CO₂ ya que es el único contaminante que fue registrado exitosamente durante la jornada, pese a requerir información del flujo másico de escape corregido por densidad para obtener las emisiones instantáneas, el comportamiento mostrado es representativo del vehículo. Además, se revisa el comportamiento del NO_x y CO, que pese a presentar mayores anomalías en sus valores en comparación al CO₂, de igual manera permite revisar el protocolo creado e identificar falencias en la etapa de post procesamiento de datos.

Dada las limitaciones en la autonomía de los equipos y los inconvenientes ya descritos, se decide realizar una única prueba en el circuito de autopista en vista de que a la fecha no se han realizado pruebas a alta velocidad y recordando que esta prueba busca identificar falencias en los equipos y en el protocolo propuesto con el fin de aplicar las correcciones pertinentes a medida que el equipo de trabajo las identifique una vez finalizada la jornada de medición.

La utilización de dos analizadores PEMS viene dada por fallas en algunos sensores de cada equipo, específicamente el sensor de NO y NO₂ en el SEMTECH – D y los sensores de CO₂, CO y THC en el SEMTECH – G. Producto de esto se trabaja con ellos de forma paralela para obtener el set completo de emisiones, las cuales se muestran en la Tabla 4.3 junto a las variables auxiliares a medir que fueron seleccionadas para esta experiencia. La tasa de recolección de datos se fija en 1 [Hz] para todos los equipos involucrados.

Tabla 4.3: Variables seleccionadas para controlar durante la prueba. Modificado de la Tabla 3.1.

Variable	Unidad	Equipo de medición
Concentración Dióxido de Carbono (CO ₂)	ppm	Analizador
Concentración Monóxido de Carbono (CO)	ppm	Analizador
Concentración Óxido Nítrico (NO)	ppm	Analizador
Concentración Hidrocarburos totales (THC)	ppm	Analizador
Concentración Material particulado (PM)	ppm	Analizador
Caudal másico de escape	kg/s	EFM
Temperatura gases de escape	°C	EFM
Humedad relativa gases de escape	%	EFM
Humedad relativa ambiente	%	Sensor
Humedad absoluta ambiente	g/kg aire seco	Sensor
Temperatura ambiente	°C	Sensor
Presión ambiente	kPa	Sensor
Velocidad del vehículo	km/h	GPS
Latitud del vehículo	grados	GPS

Longitud del vehículo	grados	GPS
Altitud del vehículo	m	GPS y Sensor

La ruta realizada corresponde mayoritariamente a conducción a alta velocidad con 17,2 [km] en la autopista Vespucio Sur, 8,6 [km] en la autopista Acceso Sur y 9,0 [km] dedicados a conducción en zona urbana que considera el acercamiento a la autopista y las conexiones entre ellas, recorriendo en total una distancia de 34,8 [km]. Esta ruta se puede apreciar en la Figura 4.1. El vehículo de prueba se cita al laboratorio de la Universidad Tecnológica Metropolitana a las 09:00 horas, con el fin de disponer del vehículo el mayor tiempo posible antes del inicio agendado entre las 12:00 horas y 13:00 horas, esta ventana es utilizada para realizar el calentamiento de los equipos, preparar el vehículo, montar los accesorios, calibrar de los sistemas de medición y dejar un margen de tiempo disponible para solucionar inconvenientes no presupuestados y así no alterar el desarrollo de la prueba.

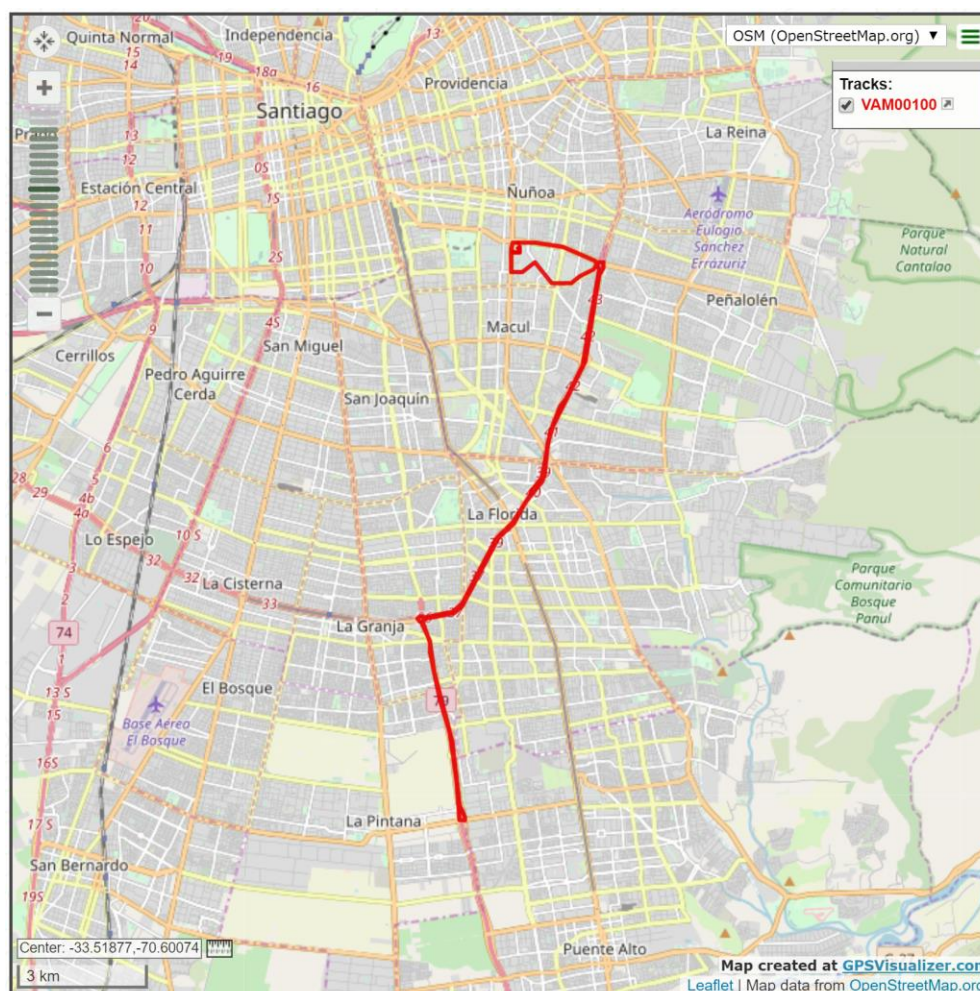


Figura 4.1: Trayecto completo de prueba de conducción a alta velocidad. Creado mediante GPS Visualizer [37].

4.2. Análisis de resultados

Un primer análisis al revisar los datos obtenidos de la VAM corresponde a la distribución teórica del perfil de velocidades, donde se aprecia que un 74,13 % de esta corresponde a alta velocidad (sobre 50 [km/hr]) mientras que el 25,86 % restante a conducción en zona urbana (bajo 50 [km/hr]), esto se logra al utilizar la distancia recorrida al interior de las autopistas como indicador para diferenciar las velocidades de circulación teóricas. Por otro lado, la distribución real de velocidades que se logra apreciar en la Figura 4.2, se tiene un 62,09 % que corresponde a conducción sobre 50 [km/h] y un 37,91 % a conducción bajo 50 [km/hr]. Esta primera diferencia entre el valor teórico y el valor real nos muestra la variabilidad que presenta este tipo de pruebas, donde las condiciones reales del tráfico afectan al desarrollo y se transforman en una variable importante a considerar.

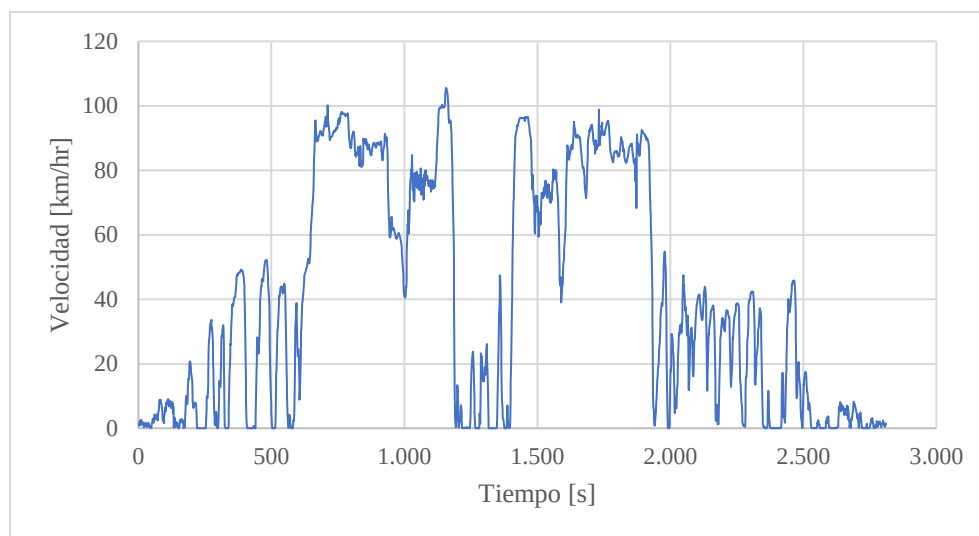


Figura 4.2: Distribución real de velocidad de circulación en función de la distancia recorrida durante la prueba.

Pese a los inconvenientes presentados durante la prueba, primero se logra rescatar el valor medido de CO_2 el cual nos permite encontrar ciertas relaciones entre las emisiones gaseosas y la carga aplicada al vehículo. Cabe destacar el dato por presentar no es representativo del vehículo en magnitud, pero si es representativo de la actividad vehicular. Se inicia el post procesado de los datos al emplear el procedimiento descrito en las secciones 3.4.1, 3.4.2 y 3.4.3 para aplicar las correcciones generales que se requieren, transformando la concentración de base seca a húmeda, corrigiendo la deriva del analizador con los datos obtenidos durante la auditoria y transformando los valores de concentración a emisiones en masa por unidad de tiempo [g/s]. Obteniéndose el perfil mostrado en la Figura 4.3, correspondiente a la emisión instantánea y acumulada de CO_2 .

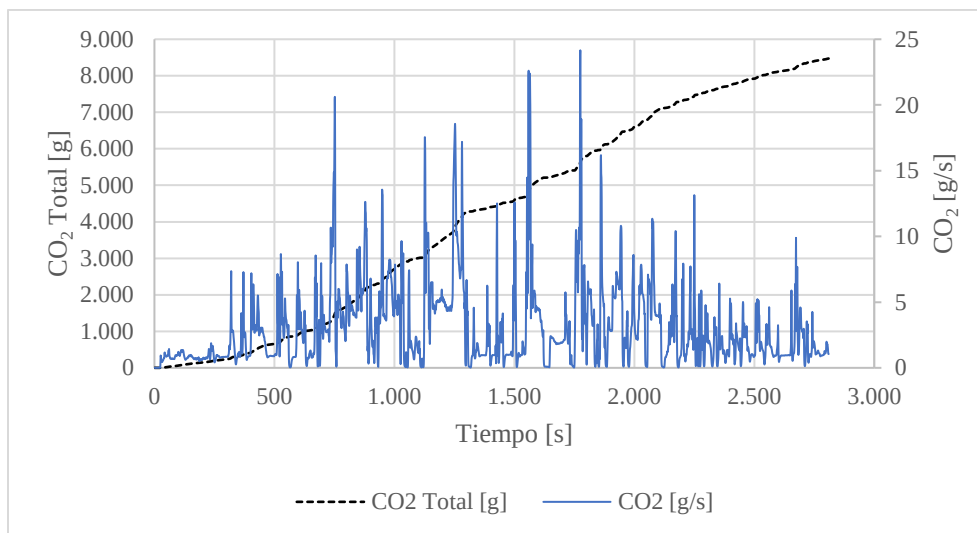


Figura 4.3: Emisión instantánea y acumulada (total) de CO_2 registrado durante la jornada. Se presentan los valores corregidos por la deriva del analizador.

Luego, acorde al procedimiento descrito en la sección 3.4.5, se realiza la unificación de los datos provenientes del PEMS con la información proveniente de la unidad VAM, recordando que el equipo principal es la unidad analizadora de emisiones y es esta la que posee la estampilla de tiempo utilizada para sincronizar los datos. En la Figura 4.4 se muestra el comportamiento de la emisión de CO_2 en función de la velocidad de circulación, iniciando el análisis en RDE.

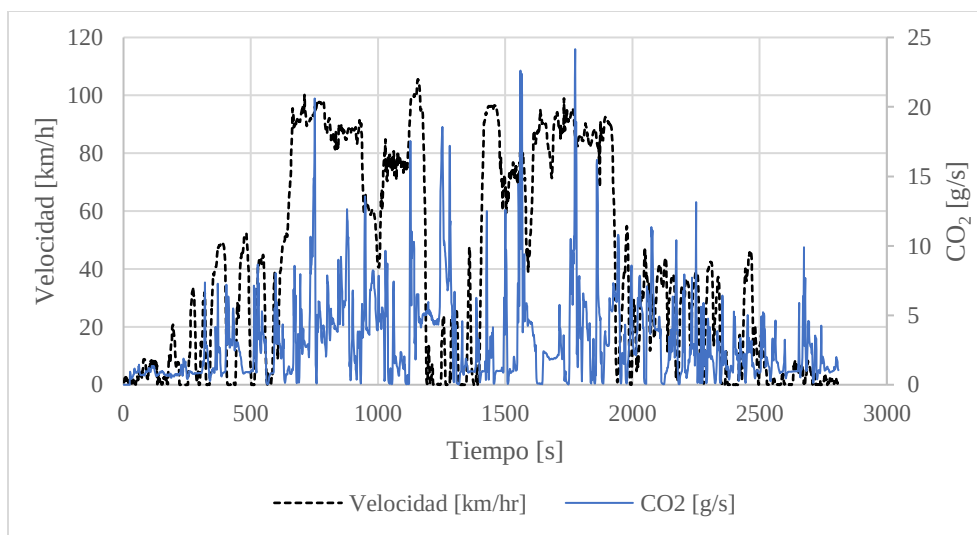


Figura 4.4: Emisión instantánea de CO_2 en función de la velocidad de circulación del vehículo.

Esta primera gráfica que combina emisiones con comportamiento vehicular real permite identificar patrones de emisión característicos de la conducción a alta velocidad (normalmente emisiones bajas y con un patrón relativamente estable dada la velocidad de circulación sostenida sin muchas detenciones o aceleraciones bruscas).

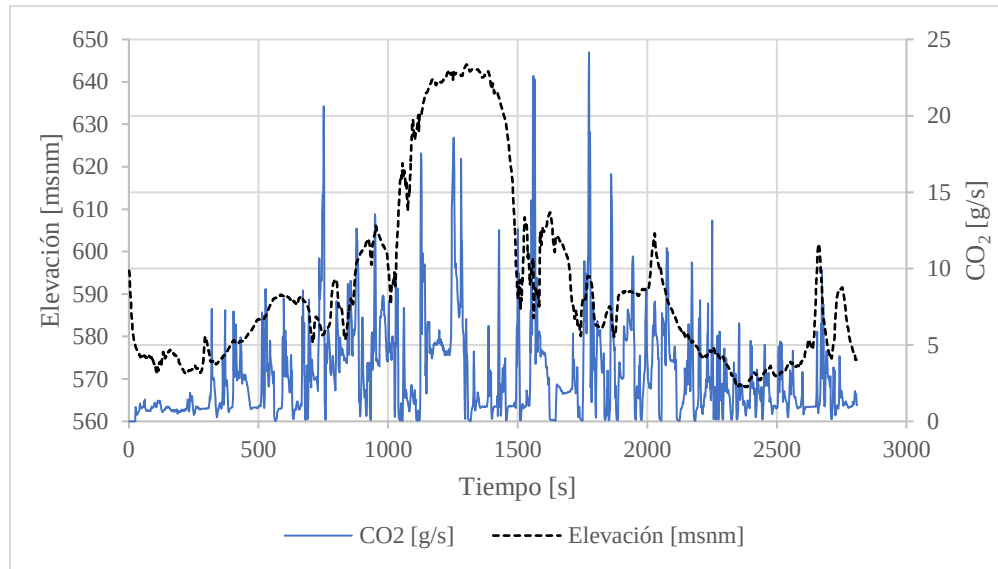


Figura 4.5: Emisión instantánea de CO_2 en función de la elevación georreferencial del vehículo.

Dado que la unidad VAM registra la actividad vehicular, de ella se puede desprender múltiples relaciones entre las variables que afecten las emisiones. Caso de ello es la Figura 4.5 que muestra la relación entre los cambios de elevación y la emisión de CO_2 , recordando que los cambios de elevación o gradiente del terreno significan una carga extra sobre el vehículo. La suma de los cambios de velocidad y elevación (entre otros) explican el comportamiento de las emisiones durante la prueba en condiciones reales, mientras que revisar el efecto de una única variable sesgará el análisis de forma errónea.

La visualización de las emisiones con elementos geográficos reales permite identificar como atributos del terreno afectan el comportamiento medido, es por ello que se recurren a herramientas computacionales como GPS Visualizer [37] y Google Earth [38] para apoyar al análisis de RDE, estas herramientas permiten mezclar la información de la ruta junto a las emisiones calculadas. En la Figura 4.6 y Figura 4.7 se muestra el trayecto dividido en dos partes producto de que se utilizó la misma ruta de ida como de vuelta al laboratorio de la UTEM [39], esta separación permite ver el comportamiento dependiente del sentido de circulación, además se incorpora como relieve en 3D la emisión instantánea de CO_2 calculada, donde el valor máximo registrado fue de 24,00 [g/s] y el valor mínimo fue de 0,00 [g/s].



Figura 4.6: Ruta de ida al punto de retorno ubicado en la salida Gabriela de la autopista Acceso Sur, comuna de La Pintana. Generado por GPS Visualizer [37], obtenido de Google Earth [38].



Figura 4.7: Ruta de regreso al laboratorio de la UTEM, ubicado en la comuna de Ñuñoa. Generado por GPS Visualizer [37], obtenido de Google Earth [38].

De la Figura 4.6 y la Figura 4.7 se corrobora el patrón característico de emisiones al conducir a alta velocidad, con puntos máximos de emisión bastante aislados y claramente identificables con las características del terreno, e.g. en la Figura 4.7 se observa un punto alto de emisión de CO_2 en la intersección entre las autopistas Acceso Sur y Vespucio Sur, en este punto existe una zona de

desaceleración para acceder a la salida a la autopista Vespucio Sur donde dicha salida cuenta con un desnivel bastante pronunciado en conjunto a una curva cerrada hacia la derecha, además se debe considerar que es un punto propenso a generar atochamientos dado que el acceso a la autopista Vespucio Sur es de baja velocidad (dado las condiciones ya descritas). Estos factores contribuyen a la existencia de puntos calientes o *hot spots* de emisiones contaminantes, en el cual el efecto acumulado de múltiples vehículos enfrentados a la misma zona puede elevar a niveles alarmantes los valores de contaminantes locales, como lo son los óxidos de nitrógeno.

De la Figura 4.3 se observa que el vehículo emitió en total 8472,44 [g] de CO₂, al dividir este valor por la distancia total recorrida de 34,80 [km] se obtiene el valor de emisión por kilómetro recorrido promedio, el cual resulta 243,46 [g/km]. Este valor puede ser comparado directamente con aquel presentado en la Tabla 4.1 de 177 [g/km], existiendo una diferencia de 66,46 [g/km] de CO₂. Recordando que la emisión de dióxido de carbono se encuentra directamente relacionada al proceso de combustión y por ende no se considera un contaminante, este valor queda como referencia del rendimiento del vehículo, en otras palabras, mientras menor sea la emisión de CO₂ por kilómetro recorrido, menor será el consumo de combustible en dicho trayecto.

Los contaminantes locales como el NO_x y CO fueron registrados por los equipos, pero presentaron inconsistencias en sus valores. El caso crítico es el del NO_x, donde no registra valores hasta ya pasados aproximadamente 500 [s] de la prueba, lo cual se traduce en una pérdida de información relevante que invalida la medición. Además de aquello, la magnitud del valor medido no tiene relación con lo observado a nivel internacional, donde las mediciones en ruta presentan valores considerablemente mayores a los registrado durante el proceso de homologación vehicular. A continuación, en la Figura 4.8 y Figura 4.9 se muestran las gráficas obtenidas tanto para la emisión instantánea como para la acumulada durante el trayecto.

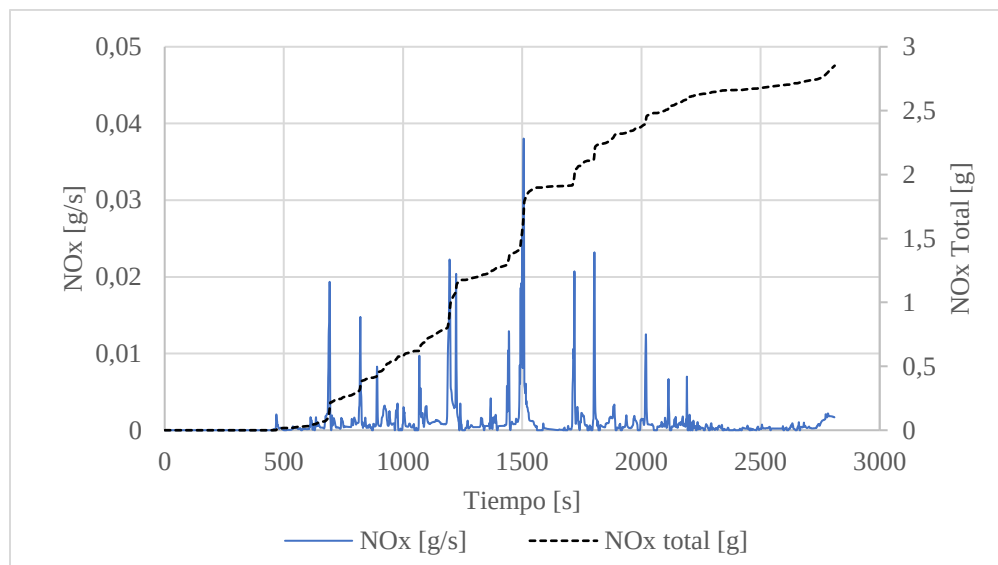


Figura 4.8: Gráfica de la emisión instantánea y acumulada de NO_x en función del tiempo.

El valor de NO_x total [g] presente en la Figura 4.8 muestra como los primeros 500 segundos no logra registrar las emisiones del vehículo, pese a encontrarse en circulación. Mientras que los valores peak de emisión pueden asociarse directamente a cambios de velocidad cuando el vehículo se encuentra a un régimen mayor de velocidad (conducción en autopista), esto se puede apreciar en la Figura 4.10.

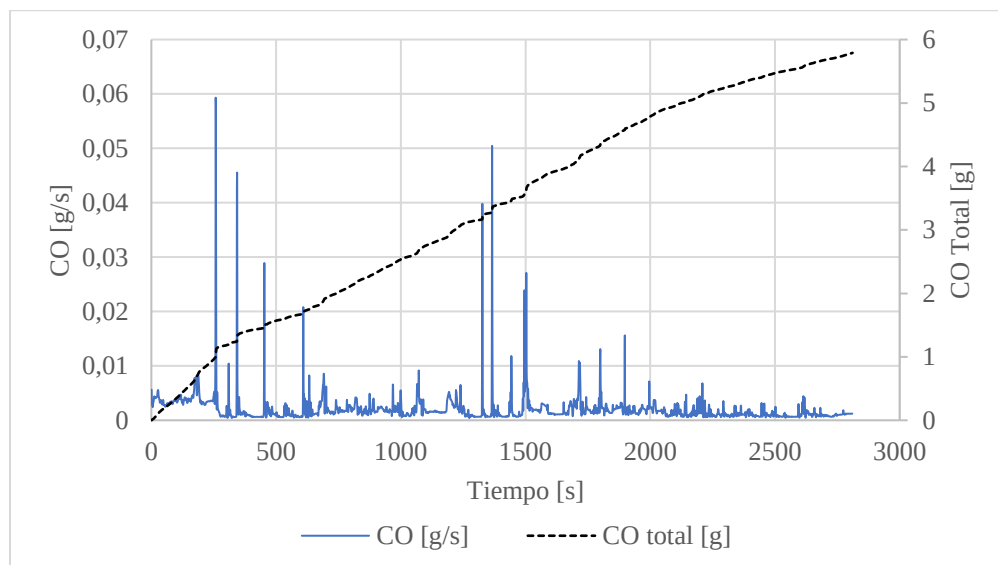


Figura 4.9: Gráfica de la emisión instantánea y acumulada de CO en función del tiempo.

Los valores de CO presentados en la Figura 4.9 son bastante representativos de la situación a la cual se sometió el vehículo de pruebas, existiendo una mayor emisión a bajas velocidades y cuando el vehículo se encuentra bajo la temperatura de operación óptima (partida en frío). De esta figura se puede obtener que se emitieron 5,7901 [g] de CO, al dividir este valor en la distancia recorrida se obtiene una emisión de 0,1664 [g/km]. Al igual que el valor de CO₂, este puede ser comparado

directamente con el valor presentado en la Tabla 4.1, existiendo una diferencia de 0,0891 [g/km] o un 115,3% extra por sobre el valor obtenido durante el proceso de homologación. La relación entre los contaminantes locales como el CO, NO_x y la velocidad de circulación se pueden apreciar de mejor manera en la Figura 4.10.

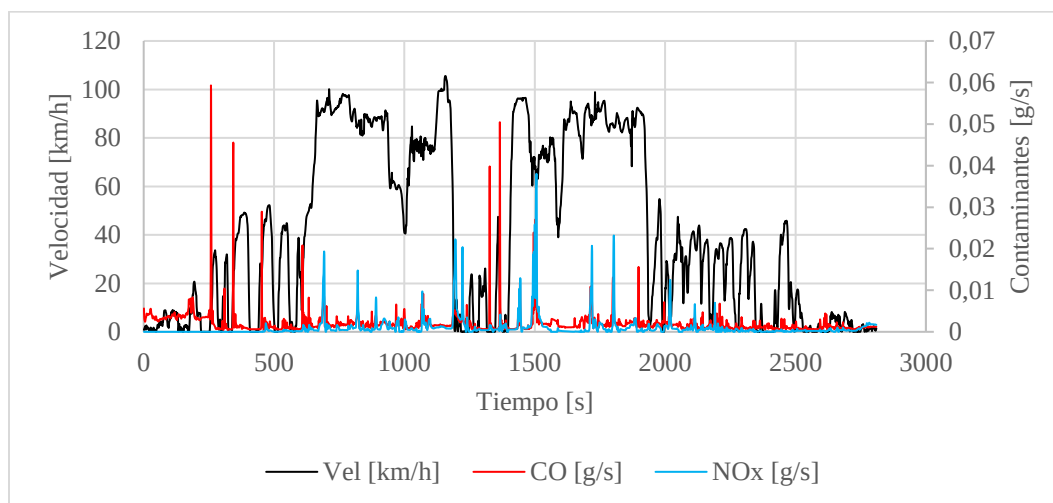


Figura 4.10: Emisiones de contaminantes locales en función de la velocidad de circulación.

Dicha diferencia entre los valores medidos y los declarados corrobora el hecho de que las pruebas realizadas en laboratorios no son representativas del vehículo ni de la conducción a la cual va a estar sometido una vez se apruebe su circulación por territorio nacional. Esto se puede apreciar en la Figura 4.11, donde se adjuntan los valores obtenidos por el vehículo durante el proceso de homologación bajo la normativa Euro 5a, los límites de emisión de dicha normativa y los valores registrados durante la prueba en conducción real RDE Chile.

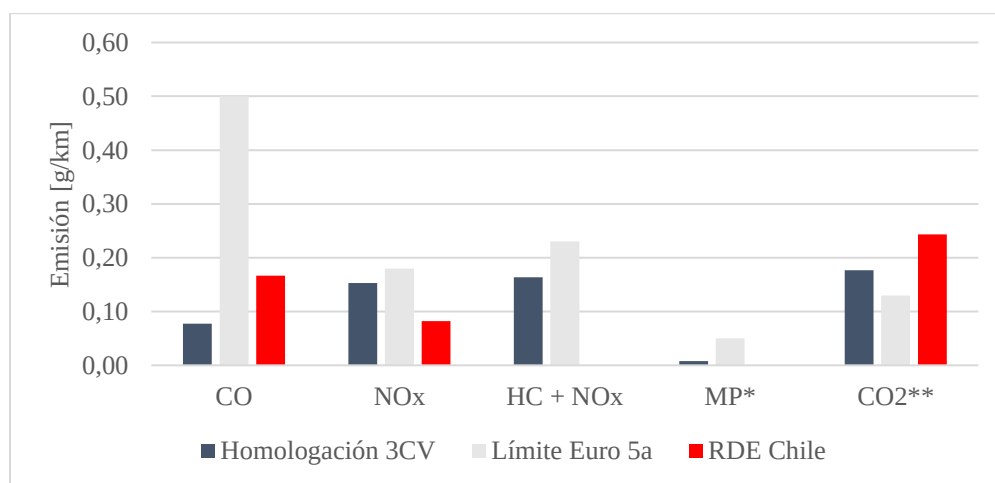


Figura 4.11: Gráfica comparativa entre los valores de emisiones declarados durante la homologación en el 3CV, los valores máximos permitidos por la normativa Euro 5a y los valores registrados durante la prueba de conducción real RDE Chile. * los valores de MP presentan un factor 10x; ** los valores de CO₂ presentan un factor 0,001x.

De la Figura 4.11 se aprecia el comportamiento anómalo de la emisión de NO_x , donde se registra un valor menor al declarado durante la homologación vehicular bajo un ciclo de conducción significativamente menos exigente que la conducción en condiciones reales de operación, recalcando la necesidad de realizar revisiones periódicas a los analizadores con el fin de evitar estos inconvenientes a la hora de realizar pruebas en ruta. De esta figura también se desprende el valor máximo de emisión tolerado para el CO_2 , el cual es un valor acordado por las diferentes asociaciones de automóviles con la finalidad de aumentar la eficiencia de los vehículos presentes en las flotas vehiculares. Si bien este valor no se considera como un factor que repruebe el vehículo durante la homologación, naciones como Inglaterra han asignado un impuesto proporcional a la emisión de CO_2 , favoreciendo aquellos vehículos que sean más eficientes dentro de su categoría.

Finalmente, durante la jornada de medición se desarrollaron múltiples inconvenientes de los cuales varios fueron abordados oportuna y exitosamente por el equipo de trabajo, lamentablemente otros no pudieron ser resueltos concluyendo en la pérdida de datos dada la invalidación de estos. Independiente de aquello, se logra rescatar la medición de anhídrido carbónico o CO_2 , Monóxido de carbono o CO y Óxidos de Nitrógeno o NO_x , permitiendo desarrollar el post procesamiento de los datos y posterior análisis, ambos presentados en el protocolo propuesto en la sección 3 del presente documento. Dado que la etapa de post procesamiento de datos es invariante respecto al contaminante, se puede declarar dicha etapa como válida para efectos del protocolo al comparar los valores calculados con aquellos entregados directamente por el equipo de medición SEMTECH – D. Asimismo, la etapa de análisis depende directamente de la hipótesis planteada durante el diseño de la prueba y como esta desee trabajar los datos, en este caso se corrobora que la medición en condiciones reales de operación presenta una diferencia considerable respecto al valor medido durante la homologación vehicular, recalcando la importancia de la implementación de dicha metodología. Es por ello que se declara la etapa de análisis como válida para efectos de este protocolo.

Las herramientas presentadas en este trabajo permiten fortalecer el proceso de homologación vehicular vigente en Chile, además de contribuir como una herramienta científica para el análisis de emisiones que no son consideradas actualmente en la legislación (metano, carbono negro y amoníaco entre otros) y para el análisis de los efectos a nivel local de las emisiones (emisiones en flotas vehiculares, determinación de puntos calientes de emisión o *hot spots*, optimización de tráfico, etc.). Igualmente se debe destacar la integración de herramientas computacionales como GPS Visualizer y Google Earth que facilitan enormemente la visualización de la información, tanto con fines técnicos (encontrar irregularidades en los datos) como con fines de divulgación.

5. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo fue guiado por la metodología descrita en la sección 2, donde en conjunto al objetivo general y específicos se crea un plan de trabajo, el cual se llevó a cabo y cumplió su cometido principal de plasmar los procedimientos existentes, actualizarlos acorde a normativas vigentes y probar en terreno mediante mediciones en ruta de emisiones vehiculares. Además, este trabajo se ha apoyado con el desarrollo del proyecto FONDEF código ID18I10297, aportando información clave en el estado del arte referente a normativas internacionales y la implementación de los denominados PEMS en el proceso de homologación vehicular, mientras que el proyecto ha aportado con instancias para revisar el protocolo propuesto e implementarlo en mediciones con conducción en tráfico vehicular real, instancias que son coordinadas con personal de la Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM) que se encuentra calificado técnicamente en la utilización de estos equipos.

En los apartados 5.1 y 5.2 se da respuesta al objetivo general y objetivos específicos respectivamente, concluyendo así el trabajo realizado y dejando recomendaciones de trabajos futuros en el apartado 5.3, los cuales pueden ser desarrollados en el marco de este proyecto FONDEF o apuntar a una mirada global de lo que implican estos sistemas.

5.1. Conclusiones Generales

Para dar respuesta al objetivo general de **Evaluar la aplicabilidad a nivel técnico y regulatorio de normativas internacionales referente a la homologación vehicular al implementar el sistema PEMS en Chile**, primero se tuvo que investigar tres aristas relacionado a las normativas aplicables, estas son: normativas que utilizan el termino de emisiones en conducción real, normativas que certifican la utilización de sistemas de monitoreo de emisiones portátiles y normativas vigentes a nivel nacional en cuanto a la homologación vehicular, estas se encuentran desarrolladas en los apartados 1.1 y 1.2, dando respuesta al análisis regulatorio. Por otro lado, el análisis técnico se desarrolla en el apartado 1.3 sobre los sistemas PEMS, aquí se da respuesta al estado actual de estos analizadores y se muestra la versatilidad que poseen. En los capítulos 3 y 4 se evalúa la técnica a utilizar para llevar a cabo las mediciones con el equipamiento disponible, creándose un protocolo de medición de emisiones basado en antecedentes nacionales e internacionales, posteriormente poniéndose a prueba dicho protocolo con una jornada de medición en condiciones reales de conducción. Los resultados de la aplicación durante la jornada permiten concluir que el método es viable y que Chile posee las capacidades técnicas y tecnológicas para su aplicación.

La combinación del análisis técnico y regulatorio junto al diseño y prueba de un protocolo de medición de emisiones en condiciones reales de operación permite responder afirmativamente al objetivo general, donde es aplicable la implementación de PEMS en Chile.

5.2. Conclusiones Específicas

El primer objetivo específico de **Identificar la aplicabilidad de las normativas internacionales en Chile en relación con el monitoreo en ruta con PEMS** se desarrolla principalmente junto a la revisión bibliográfica que conforma el Estado del Arte presentado en el capítulo 1, donde se discuten las normativas internacionales vigentes (Norteamericana y Europea), como estas se conforman y las dificultades que se tiene para la aplicación directa de estas. También se discute la normativa nacional, como esta nace de la mezcla entre la normativa Norteamericana y Europea, siendo actualizadas de forma tardía en comparación a las normas originales.

Estas normativas incluyen parámetros relevantes al momento de seleccionar el equipo analizador de emisiones adecuado, es por ello que se incluye un apartado exclusivo para estos sistemas discutiendo las tecnológicas existentes de medición, los contaminantes relevantes a medir y se da una visión actual en forma de la Discusión Internacional presenciada en Marzo del 2019, donde se asiste a dos seminarios de trabajo en torno a los sistemas PEMS.

La suma de estas investigaciones permite identificar la aplicabilidad de las normativas internacionales en Chile, concluyendo que es posible hacer la actualización requerida en lo que respecta la técnica utilizada en el proceso de homologación de vehículos livianos. Se observa que en una primera instancia son las universidades e institutos técnicos los encargados de generar el conocimiento técnico necesario para desarrollar esto, viendo que la Universidad Técnica Federico Santa María y la Universidad Tecnológica Metropolitana se encuentran en camino de eso, con proyectos que involucren la utilización de los PEMS en condiciones reales, en apoyo de diferentes organismos, tanto privados como estatales.

El segundo objetivo específico de **Proponer un protocolo para la medición de emisiones en ruta mediante el sistema PEMS** se desarrolla en el capítulo 3. Allí se plantea las bases de un protocolo de medición con equipos portátiles iniciando con el diseño de la prueba donde se analizan todas las componentes teóricas de la medición a realizar, seguido de la preparación previa donde se preparan todos los sistemas involucrados con el debido tiempo, lo que permite solucionar problemáticas que surjan. A continuación, se lleva a cabo la prueba en ruta, es esta etapa se presentan ciertos lineamientos que debe seguir el equipo de trabajo con el fin de aumentar las posibilidades de tener una jornada de medición exitosa, producto de la aleatoriedad que poseen las mediciones en ruta se

generan innumerables instancias que podrían invalidar los datos obtenidos. Una vez finalizada la prueba se realizan los procedimientos de post procesado de datos donde se filtran, corrigen, transforman y unifican los valores en un único fichero que permite la revisión de forma compacta, facilitando la última etapa que es el análisis de los valores, esta etapa está fuertemente ligada al diseño de la prueba, donde se busca corroborar la hipótesis planteada y compararla con los resultados esperados.

Este protocolo se confecciona con información obtenida de la normativa EURO 6 presentada en el capítulo 1 referente a las Emisiones en Conducción Real (RDE), apoyándose con memorias y tesis ya confeccionadas y la retroalimentación constante del equipo de medición de la UTEM. Ciertos valores son adaptados a la realidad nacional pero el protocolo debe ser alimentado con nuevas mediciones y modificado a medida que nuevas normativas entren en vigor en Chile.

El tercer objetivo específico de **Realizar mediciones experimentales que permitan validar en terreno el protocolo propuesto mediante mediciones con PEMS** es desarrollado a completitud en el capítulo 3 donde se equipa un vehículo particular con todos los analizadores disponibles al momento, esto considera dos sistemas portátiles PEMS, un analizador de material particulado, una unidad de monitoreo de actividad vehicular, el sistema de alimentación eléctrico y los equipos accesorios necesarios. Este procedimiento sirvió para identificar las falencias del protocolo y del equipo de trabajo, ya que se solicita una medición con todo el set de contaminantes. Durante la jornada surgen una serie de problemáticas que invalidan gran parte de los datos obtenidos, logrando rescatar la medición de dióxido de carbono (CO_2), gran parte de la medición de monóxido de carbono (CO) y una fracción de la medición de óxidos de nitrógeno (NO_x), validando así el post procesado de datos y el análisis de estos, ambos presentados en el protocolo propuesto. Se debe recordar que la finalidad de la jornada de medición es validar el protocolo, lo cual se cumple y por ello este queda validado de momento, quedando abierto a posteriores modificaciones que se requieran para adaptarlo a nuevos equipos y pruebas que se incorporen. De la medición se puede observar que existe una diferencia entre los valores reales de emisión y aquellos obtenidos a la hora de la homologación vehicular, donde el vehículo de pruebas emitió 243,46 [g/km] de CO_2 , superando en 66,46 [g/km] de CO_2 o un 37,55% extra al valor obtenido mediante el ciclo NEDC, además de emitir 0,1664 [g/km] de CO o un 115,3% extra al valor obtenido durante el proceso de homologación. Por otro lado, la emisión de NO_x sigue el comportamiento esperado con la actividad vehicular presenciada, no así la magnitud de dicho valor ya que durante la prueba se presentan problemas con los sistemas que resulta en una alteración en este valor. Lo visto demuestra que el ciclo de pruebas NEDC como herramienta se encuentra obsoleta,

valorando la creación del nuevo ciclo WLTP y los PEMS, que logran identificar inconsistencias entre los valores declarados y aquellos que realmente son emitidos al ambiente.

Finalmente, el cuarto objetivo específico de **Analizar el acondicionamiento del sistema PEMS para gases y material particulado** se desarrolla en parte en el apartado 1.3 sobre sistemas PEMS, el apartado 3.4 del protocolo propuesto (post procesado de datos), además se ve apoyado con las técnicas evaluadas en el capítulo 4 de mediciones experimentales, donde se instala todo el equipamiento disponible a la fecha dentro de los cuales figura el analizador de material particulado DEKATI DMM – 230. Durante esta aplicación surgen problemas con dicho equipo que no pudieron ser resueltos en el tiempo disponible, pero en el marco del proyecto FONDEF código ID18I10297 se genera la solución con la compra de nuevos analizadores dedicados a la medición y caracterización del material particulado. En dicho proyecto FONDEF se diseña y fabrica una unidad de dilución variable que permite la integración de diversos analizadores a una misma línea de muestreo, destacando la medición de Black Carbon o Carbono elemental, que son partículas en suspensión de este elemento producto de la combustión al interior de los motores y posee un alto impacto en el calentamiento global. Dentro del proyecto se desarrolla un software capaz de recopilar las hojas de datos obtenidas de todos los equipos de medición y las integra en una única hoja de datos, similar al procedimiento descrito en la sección 3.4.5.

Este último objetivo demuestra lo versátil que son estos sistemas de medición, permitiendo la integración de componentes a un menor costo que si se comprase directamente del fabricante, requiriendo solamente una unidad común de alimentación como lo es la unidad de dilución variable y un software que recopile y sincronice los datos obtenidos, generando un fichero único que facilite el análisis rápido de los datos.

Es así como se da respuesta a todos los objetivos planteados, concluyendo que los sistemas PEMS son herramientas versátiles que pueden ser adaptadas exitosamente para su uso a nivel nacional en lo que refiere al proceso de homologación vehicular, pero recalcando que la normativa vigente debe ser actualizada para incorporar dicho sistema como lo han hecho otras naciones y realizar dicho proceso de forma más rápida, lo que mantendrá a Chile dentro de la región como uno de los países más desarrollados en lo que respecta a las emisiones vehiculares. Además, se debe velar por incorporar equipos modernos al set disponible con el fin de robustecer y agilizar las mediciones, ya que con el equipamiento actual los tiempos de acción son extremadamente largos presentándose inestabilidades propias de la edad de los componentes.

5.3. Recomendaciones

Se recomienda alimentar el protocolo de medición con múltiples instancias de medición, con nuevos equipos, diferentes hipótesis a corroborar y un set mucho más amplio y completo de vehículos, para ello se recomienda realizar una campaña de medición extensa donde se revise el set completo de emisiones a diferentes categorías de vehículos (livianos, pesados, buses de transporte público, comerciales, etc.).

Se debe complementar dicho trabajo con una caracterización detallada de las emisiones en las categorías descritas, donde la unidad de monitoreo vehicular jugará un rol protagónico al diferenciar las emisiones en las respectivas zonas, esto se acompaña con un análisis detallado logrando encontrar relaciones entre las variables de conducción y los contaminantes registrados.

Alejándose del análisis particular de vehículo a vehículo, se propone implementar metodologías de medición indirectas como lo es el VSP o la potencia específica vehicular, donde las mediciones de la actividad vehicular se encuentran calibradas con valores de emisiones de ciertos contaminantes, logrando transformar actividad (aceleraciones, velocidad, gradiente, carga, etc.) en valores de emisiones lo que permite monitorear un gran número de vehículos pertenecientes a una misma familia (e.g. flota de camiones, buses interurbanos, buses de transporte público). Si bien esta metodología requiere de una calibración constante en un dinamómetro de chasis con un vehículo modelo para actualizar los valores de las emisiones, permite crear un inventario de forma rápida lo que facilita la toma de decisiones respecto a normativas medioambientales.

Finalmente, complementando los trabajos recomendados, se debe investigar en micro y nano PEMS, analizando su factibilidad técnica y económica. Estos sensores, de bajo costo, permiten monitorear múltiples vehículos en ruta al sacrificar precisión y confiabilidad, ambos parámetros que pueden ser sobrellevados al acompañar dicha implementación con un protocolo acorde a los requerimientos de dichos sensores. También se debe considerar que esta tecnología se encuentra en desarrollo, por ende, las problemáticas pueden disminuir abruptamente una vez la tecnología se consolide.

Estos desarrollos deben ser complementados con herramientas gráficas que faciliten la visualización de la información, con el fin de disminuir el nivel técnico requerido para entender los datos y que estos puedan ser masificados. Generando múltiples instancias de discusión lo que favorecerá el desarrollo de proyectos futuros al mantenerse relevante en la discusión.

Referencias

- [1] Continental - automotive, «Worlwide Emission Standards ans Related Regulations. Passenger Cars / Light and Medium Duty Vehicles». sep-2017.
- [2] «Emission Standards, Europe, Cars and Light Trucks». [En línea]. Disponible en: <https://www.dieseln.net.com/standards/eu/ld.php>. [Accedido: 01-nov-2018].
- [3] A. Colsa, «Comparative study on the differences between the EU and US legislation on emissions in the automotive sector», p. 100.
- [4] A. Marotta, J. Pavlovic, B. Ciuffo, S. Serra, y G. Fontaras, «Gaseous Emissions from Light-Duty Vehicles: Moving from NEDC to the New WLTP Test Procedure», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, n.º 14, pp. 8315-8322, jul. 2015.
- [5] «REGLAMENTO (UE) 2016/ 427 DE LA COMISIÓN - de 10 de marzo de 2016 - por el que se modifica el Reglamento (CE) n.º 692/ 2008 en lo que concierne a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 6)», p. 98.
- [6] O. US EPA, «Basic Information about the Emission Standards Reference Guide for On-road and Nonroad Vehicles and Engines», *US EPA*, 21-ene-2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/basic-information-about-emission-standards-reference-guide-road>. [Accedido: 15-dic-2018].
- [7] P. Mock y J. German, «The future of vehicle emissions testing and compliance: How to align regulatory requirements, customer expectations, and environmental performance in the European Union», p. 36.
- [8] «Emission Standards: USA: Cars and Light-Duty Trucks—Tier 3». [En línea]. Disponible en: https://www.dieseln.net.com/standards/us/ld_t3.php. [Accedido: 15-dic-2018].
- [9] «Emission Standards: USA: Cars and Light-Duty Trucks—California». [En línea]. Disponible en: https://www.dieseln.net.com/standards/us/ld_ca.php#leviii. [Accedido: 15-dic-2018].
- [10] «CFR, 2012. US Code of Federal Regulations, Title 40, Part 86, Appendix I, Revised as of July 1, 2012, 543-610.», *Off. Fed. Regist. Natl. Arch. Rec. Adm. Spec. Ed. Fed. Regist.*, p. 683.
- [11] O. US EPA, «EPA Federal Test Procedure (FTP)», *US EPA*, 22-dic-2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-federal-test-procedure-ftp>. [Accedido: 16-dic-2018].
- [12] O. US EPA, «EPA US06 or Supplemental Federal Test Procedure (SFTP)», *US EPA*, 17-mar-2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-us06-or-supplemental-federal-test-procedure-sftp>. [Accedido: 16-dic-2018].
- [13] O. US EPA, «EPA SC03 Supplemental Federal Test Procedure (SFTP) with Air Conditioning», *US EPA*, 22-dic-2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-sc03-supplemental-federal-test-procedure-sftp-air>. [Accedido: 16-dic-2018].
- [14] «Emission Test Cycles: EPA Highway Fuel Economy Test Cycle». [En línea]. Disponible en: <https://www.dieseln.net.com/standards/cycles/hwfet.php>. [Accedido: 16-dic-2018].
- [15] O. US EPA, «Clean Air Act Requirements and History», *US EPA*, 27-may-2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/clean-air-act-requirements-and-history>. [Accedido: 16-dic-2018].

- [16] M. D. T. Y. TELECOMUNICACIONES, «DTO-211 11-DIC-1991 MINISTERIO DE TRANSPORTES Y TELECOMUNICACIONES», *Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional*, 11-dic-1991. [En línea]. Disponible en: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=11031&idParte=&idVersion=>. [Accedido: 24-may-2019].
- [17] M. D. M. AMBIENTE, «DTO-29 29-SEP-2012 MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE», *Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional*, 29-sep-2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1044230&idParte=9298916&idVersion=2012-09-29>. [Accedido: 24-may-2019].
- [18] M. D. M. AMBIENTE, «RES-114 EXENTA 21-MAR-2019 MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE», *Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional*, 21-mar-2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1129868&buscar=euro+6>. [Accedido: 24-may-2019].
- [19] M. D. M. AMBIENTE, «DTO-31 24-NOV-2017 MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE», *Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional*, 24-nov-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1111283>. [Accedido: 06-jun-2019].
- [20] «40 CFR Part 86 - CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE HIGHWAY VEHICLES AND ENGINES», *LII / Legal Information Institute*. [En línea]. Disponible en: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-86>. [Accedido: 16-dic-2018].
- [21] *Directiva 70/220/CEE del Consejo, de 20 de marzo de 1970, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros en materia de medidas que deben adoptarse contra la contaminación del aire causada por los gases procedentes de los motores de explosión con los que están equipados los vehículos a motor*, vol. DD. 1970.
- [22] *Directiva 98/69/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 1998 relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor y por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE del Consejo*, vol. OJ L. 1998.
- [23] *Directiva 2002/80/CE de la Comisión, de 3 de octubre de 2002, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 70/220/CEE del Consejo relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor (Texto pertinente a efectos del EEE.)*, vol. OJ L. 2002.
- [24] «40 CFR Subpart J - Field Testing and Portable Emission Measurement Systems», *LII / Legal Information Institute*. [En línea]. Disponible en: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-1065/subpart-J>. [Accedido: 01-may-2019].
- [25] «Aspectos de la medición dinámica instantánea de emisiones de motores. Aplicación al desarrollo de un equipo portátil y una metodología para estudios de contaminación de vehículos en tráfico real.» .
- [26] «40 CFR Subpart C - Measurement Instruments», *LII / Legal Information Institute*. [En línea]. Disponible en: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-1065/subpart-C>. [Accedido: 01-may-2019].
- [27] A. Lafond, «The difference between hydrocarbons and volatile organic compounds», *Foobot*, 26-sep-2018. [En línea]. Disponible en: <https://foobot.io/guides/difference-between-hydrocarbons-and-volatile-organic-compounds.php>. [Accedido: 20-sep-2019].
- [28] «Particulate Matter Measurements». [En línea]. Disponible en: https://www.dieselnet.com/tech/measure_dpm.php. [Accedido: 23-jun-2019].

- [29] «29th CRC Real World Emissions Workshop», *Cvent*. [En línea]. Disponible en: <http://www.cvent.com/events/29th-crc-real-world-emissions-workshop/event-summary-ca701bd72cbe477f9cb5d08c28cd2b94.aspx?lang=en>. [Accedido: 03-abr-2019].
- [30] «Center for Environmental Research & Technology: 9th Annual International PEMS Conference». [En línea]. Disponible en: <https://www.cert.ucr.edu/events/pems/>. [Accedido: 03-abr-2019].
- [31] «Portable Emissions Equipment Measurement Experts | 3DATX». .
- [32] «U of M: Department of Mechanical Engineering: Faculty Template». [En línea]. Disponible en: <http://www.me.umn.edu/people/kittelson.shtml>. [Accedido: 07-sep-2019].
- [33] «Sensors, Inc. - Innovative Gas Measurement Solutions». [En línea]. Disponible en: <http://www.sensors-inc.com/>. [Accedido: 30-ago-2019].
- [34] V. D. Shahinian, «SEMTECH-D User Manual», p. 238, 2001.
- [35] V. D. Shahinian, «SEMTECH-G User Manual», p. 212, 2001.
- [36] «DMM manual 1.1.pdf». .
- [37] «GPS Visualizer». [En línea]. Disponible en: <https://www.gpsvisualizer.com/>. [Accedido: 20-jul-2019].
- [38] «Google Earth», *Google Earth*. [En línea]. Disponible en: <https://www.google.com/intl/es/earth/>. [Accedido: 14-sep-2019].
- [39] C.- www.utem.cl, «UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA METROPOLITANA», *UTEM*. .
- [40] M. D. V. Y. URBANISMO, «DTO-47 05-JUN-1992 MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO», *Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional*, 05-jun-1992. [En línea]. Disponible en: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=8201>. [Accedido: 30-jun-2019].
- [41] «40 CFR Subpart D - Calibrations and Verifications», *LII / Legal Information Institute*. [En línea]. Disponible en: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-1065/subpart-D>. [Accedido: 15-jul-2019].
- [42] «Masa molar». [En línea]. Disponible en: <http://es.webqc.org/mmcalt.php>. [Accedido: 29-jul-2019].
- [43] «SSP_230.pdf». .
- [44] «Detailed specs review of 2014 Kia Sorento 2.2 CRDi Vision (KX-1) AWD automatic model for Europe», *www.automobile-catalog.com*. [En línea]. Disponible en: https://www.automobile-catalog.com/car/2014/1773170/kia_sorento_2_2_cr_di_vision_kx-1_awd_automatic.html. [Accedido: 16-ago-2019].
- [45] «3CV | Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones». [En línea]. Disponible en: <https://www.mtt.gob.cl/3cv>. [Accedido: 15-sep-2019].
- [46] «Nomina Vehiculos Livianos y Medianos Homologados_30 agosto 2019.xls». .

Anexos

A continuación, se presenta el protocolo propuesto de forma condensada donde se enumeran las actividades y se acompaña con una breve descripción del proceso:

N°	Actividad	Descripción
Diseño de la prueba		
1	Definir objetivo general del estudio	Este valor guiara el desarrollo del experimento, por ello una correcta definición es primordial a la hora de diseñar la prueba.
2	Definir los parámetros a controlar	Acompañado de la definición del objetivo general, los parámetros a controlar son todas las variables, emisiones, características, etc. Que pueden ser registradas con un equipo externo y que responden, en cierta medida, a lo planteado en el objetivo del estudio.
3	Definir la hipótesis del estudio	La hipótesis del estudio sirve como una primera aseveración que luego será corroborada una vez se analice la data obtenida. Esta aseveración viene de la experiencia de equipo de trabajo y de antecedentes que existan sobre el fenómeno.
4	Seleccionar circuito de prueba	Corresponde al circuito donde se analizarán las emisiones en ruta, debe considerar información sobre las vías de circulación, tráfico, señaléticas, velocidades de circulación, etc.
5	Seleccionar vehículos de ensayo	Ligado al objetivo general, el o los vehículos de ensayo pueden ser: únicos, de una misma familia, de un mismo fabricante, de similar cilindrada, mismo combustible, etc.
6	Seleccionar al conductor designado	El conductor designado debe conocer la ruta y el modo de conducción que se desea probar durante la jornada. Debe ser capaz de ser consistente en su manera de conducir, valor que se comprueba con la información de la unidad de actividad vehicular VAM.
7	Realizar reconocimiento en ruta del circuito	Previo a la fecha programada, se debe reconocer el circuito de prueba preferiblemente en diferentes instancias del día con el objetivo de analizar el tráfico, ver el estado de la vía y posibles reparaciones que se estén desarrollando y puedan entorpecer la prueba.
8	Programar las mediciones	Luego de reconocer el circuito se proponen rangos de horas donde realizar la prueba. Aquí se selecciona un horario y se inician los preparativos para la fecha programada.
9	Finalizar diseño de la prueba	Se consolidan todos los pasos anteriormente descritos en una bitácora de la prueba, archivo de texto que contiene toda la información y que permite agregar eventos que surjan durante el ensayo.

Preparación previa		
10	Selección del equipamiento	Acorde a los parámetros a controlar se selecciona el equipamiento necesario para llevar a cabo las mediciones. Se pueden incorporar equipos redundantes siempre cuando no interfieran.
11	Preparación del equipo	Se juntan todos los equipos seleccionados en un único lugar, se inspeccionan visualmente y se revisa que todos se encuentren operativos.
12	Encendido de calentamiento de los equipos	Aquellos sistemas que requieran de calentamiento son encendidos al comienzo de la jornada para asegurar que alcancen su temperatura optima previo a la etapa de calibración.
13	Carga de gases especiales	Se cargan los gases especiales (FID) que utilizan los equipos PEMS, tomando en consideración que estos tienen un tiempo antes de agotarse y requerir una nueva carga.
14	Selección de métodos de anclaje del tubo de muestreo	Con el vehículo en el laboratorio se realiza una inspección de los posibles puntos de anclaje que existen. En base a aquello se selecciona la mejor ruta para el tubo de muestreo y la conexión entre este y el escape del vehículo.
15	Formular plan de montaje de los equipos	Dado que los equipos de emisiones son de considerable tamaño, se debe revisar el espacio disponible en la maleta del vehículo y tomar medidas para asegurarse que es factible la utilización de todos los equipos requeridos por la prueba. Se recomienda instalar primero las baterías ya que estas son las de mayor peso y permiten hacer el cambio de corriente alterna a directa con mayor facilidad una vez se muevan los PEMS al vehículo.
16	Realizar maniobras de montaje de los equipos	Una vez instalada la o las baterías se procede con el montaje de los equipos en la maleta del vehículo. De ser necesario se instalan bloques de espuma para proteger los alrededores y amortiguar el desplazamiento que pueda ocurrir en la ruta.
17	Instalar tubo de muestreo	El tubo de muestreo corresponde a la zona donde se conectan todas las líneas de muestreo, este tubo normalmente se ubica en el parabrisas trasero de forma horizontal, por lo que requiere de un codo en la entrada para redirigir los gases provenientes del escape. El tubo se monta con ventosas al parabrisas, requiriendo de 1 o 2, dependiendo de la curvatura de este.
18	Purgar líneas de muestreo	Se debe purgar las líneas ya que se forma condensado en estas que no se desplaza con facilidad una vez encendido el sistema.
19	Conectar líneas de muestreo	Se conectan todas las líneas de muestreo entre los equipos y el tubo de muestreo. Se debe cuidar que estas no presenten curvas pronunciadas ni se

		encuentren cerca de las zonas calientes del sistema ya que se puede derretir la línea.
20	Realizar pruebas de estanqueidad	Se inspeccionan todas las juntas y abrazaderas, con los equipos encendidos se utiliza el software para realizar las pruebas de estanqueidad. Para probar la línea principal que redirige los gases de escape, se enciende el vehículo y se tapa la salida del tubo de prueba, no debe existir fugas a menos que se ejerza una presión excesiva.
21	Calibrar los sensores	Con los equipos montados en el vehículo y a una temperatura de funcionamiento se inicia el proceso de calibración, para ello se utilizan gases patrones y el software de cada analizador.
22	Registrar valores de la calibración	Se registra en la bitácora de la prueba los valores de la calibración (los de la botella y los medidos por el equipo).
23	Inspección visual de los sistemas montados	Antes de cerrar la maleta o el compartimiento donde se ubican los equipos se realiza una última inspección visual de las juntas neumáticas y eléctricas, además de revisar todos los apoyos mecánicos existentes. Esta tarea debe realizarla todo el equipo de trabajo, en especial el conductor designado. Debe ser considerada como un chequeo de seguridad previo a iniciar la prueba.
24	Chequear buen funcionamiento de los sensores	Se revisa que todos los sensores estén registrando valores acordes a la situación (vehículo apagado y detenido).
25	Finalizar preparación previa	Anotar valores en la bitácora de la prueba. Se aprueba el paso a la siguiente fase.
Realización de la prueba		
26	Cambio de alimentación eléctrica	Se desconectan los equipos de la alimentación eléctrica fija (cable) y se dejan operativos únicamente con las baterías o generador instalados en el vehículo.
27	Iniciar registro de datos de los equipos	Previo a la partida del vehículo se inicia el registro de los datos de la prueba.
28	Chequear buen funcionamiento de los sensores	Se debe chequear que los sistemas continúan registrando valores acordes a la situación y que no se vieron afectados por el cambio de alimentación eléctrica.
29	Dar encendido al vehículo	Se da partida al vehículo
30	Chequear buen funcionamiento de los sensores	Se chequea que los sistemas registran valores acordes a la nueva situación (vehículo encendido y detenido), aquí se revisan los analizadores de emisiones ya que ahora disponen de flujo de escape.
31	Iniciar el recorrido	Se da inicio al recorrido en condiciones reales.
32	Chequear regularmente los valores registrados	El pasajero encargado de revisar el funcionamiento de los equipos debe revisar regularmente los valores que se presentan en la pantalla del ordenador, anotando cualquier evento anómalo que se presente en la bitácora de la prueba.

33	Finalizar el recorrido	Se finaliza el recorrido una vez se completa la prueba y se retorna al laboratorio.
34	Detener y apagar el vehículo	Se detiene el vehículo en la zona designada y se apaga.
35	Detener el registro de datos de los equipos	Se detiene la recolección de datos por parte de los analizadores.
36	Realizar auditoria de los sensores	Aquellos sensores que fueron calibrados con gases patrones deben ser expuestos a la misma señal para identificar la deriva que sufrieron a lo largo de la prueba. Este proceso se conoce como auditoria.
37	Registrar valores de la auditoria	Dentro de la bitácora se registran los valores de la auditoria.
38	Descargar ficheros de los equipos	Descargar los ficheros de los Analizadores de gases, Material particulado, Black Carbon, Unidad VAM y todos los equipos extra que se utilizaron durante la prueba.
39	Crear carpeta única de la jornada de medición	Dentro del ordenador portátil utilizado se genera una carpeta única que contiene toda la información de las mediciones realizadas. La carpeta debe identificar el vehículo, la fecha y la hora de inicio de la prueba.
40	Registrar hora de inicio y termino de la prueba	Anotar valores en la bitácora junto a la distancia total recorrida.
41	Apagar y desmontar los sistemas de medición del vehículo de prueba	Se apagan todos los sistemas, posteriormente se desconectan y retiran todas las líneas neumáticas y eléctricas, se sueltan los elementos de anclaje y se retiran los equipos del vehículo.
	Finalizar la realización de la prueba	Anotar valores en la bitácora de la prueba.
Post procesado de datos		
42	Recolección de los ficheros	Se seleccionan todos los ficheros que se encuentran en la carpeta de la jornada.
43	Eliminación de columnas nulas	Se abre cada fichero y se eliminan las columnas con valores nulos o no registrados.
44	Selección de las columnas de estudio	Los equipos normalmente arrojan múltiples columnas de valores que utilizan para cálculos internos y estas no representan utilidad para el estudio. Se seleccionan aquellas columnas que poseen valores útiles ya procesados y que coinciden con las variables de estudio seleccionadas durante el diseño de la prueba.
45	Corregir valores a una base común (base húmeda)	Algunos analizadores presentan los valores en base seca dada la naturaleza del sensor, esta corrección se realiza mediante la fórmula (3.1), se debe realizar la corrección para trabajar en función de una base única (base húmeda). Algunos softwares de PEMS realizan esta conversión de forma automática, en dicho caso se debe rescatar la columna corregida.
46	Corregir valores de flujo másico de escape	El flujometro presenta un valor nominal de flujo obtenido mediante diferencias de presión, se debe realizar la corrección por temperatura. Algunos softwares de PEMS realizan esta conversión de

		forma automática, en dicho caso se debe rescatar la columna corregida.
47	Revisar valores de deriva de los analizadores	Se debe comparar la deriva que presenta el sensor respecto a un valor admisible, el cual cambia dependiendo del propósito de la prueba. De ser menor el valor se prosigue con la corrección, de ser mayor la deriva que el valor admisible para la prueba se debe desechar la medición.
48	Corregir la deriva de los analizadores	Se corrige la deriva del analizador respecto a la información de la calibración en el tiempo cero y la auditoría realizada al finalizar la jornada. Se genera una nueva columna por contaminante corregido.
49	Obtener emisiones instantáneas a partir de los valores de concentración corregidos	Se combina la información de concentración de emisiones con el flujo masico de escape mediante la fórmula (3.2), ambos valores corregidos en base, temperatura y sincronizados. Se genera una nueva columna por contaminante.
50	Obtener emisiones másicas por distancia recorrida (análisis del trayecto)	Se realiza una suma de las emisiones instantáneas para obtener el valor total en masa del contaminante, luego se divide por la distancia recorrida en el trayecto definido, este puede ser todo el trayecto o seccionado, de trabajar seccionado se debe realizar lo mismo con la suma de las emisiones instantáneas.
51	Caracterizar por zonas de emisión	Depende de la finalidad de la prueba, de requerir completar porcentajes de conducción a diferentes velocidades se debe generar una tabla con el porcentaje real obtenido para cada tipo de conducción y realizar el paso 50 (análisis por trayecto) para cada uno.
52	Sincronización temporal de los datos	En función al equipo principal (Normalmente el PEMS de gases) y su estampilla de tiempo, se modifican los ficheros de los diferentes equipos para que el primer valor sea el mismo, recordando que todos los equipos deben presentar un valor con una estampilla de tiempo obtenida de una misma fuente, normalmente un ordenador portátil o una señal GPS. Esta etapa puede apoyarse con gráficas para sincronizar los eventos peak como el encendido del motor.
53	Unificación de los datos	Se crea un fichero único donde se unifican todas las columnas representativas (corregidas, calculadas, etc.). La finalidad de esto es reunir todas las mediciones útiles en un único archivo, el cual posteriormente será utilizado durante el análisis.
54	Corroborar información básica de la prueba	Dentro del fichero unificado debe existir información de la fecha de la prueba, hora de inicio y termino, vehículo medido, equipos involucrados, tipo de conducción, notas de la ruta, zonas de emisión, etc. Toda aquella información que resuma la jornada.

55	Crear fichero simplificado para visualizar en 2D o 3D	Similar al fichero unificado se crea una versión simplificada donde solamente exista una tabla con la información proveniente de la VAM y los contaminantes que se desee visualizar en 2D o 3D. De cargarse el fichero original, el programa utilizado para la visualización tendría múltiples inconvenientes dado que el formato es incompatible.
Análisis de resultados		
56	Realizar estudios por recorrido o tramos	Se buscan relaciones evidentes que faciliten los análisis posteriores, recordando que existe un objetivo general e hipótesis que comprobar, los cuales fueron planteados durante el diseño de la prueba.
57	Generar gráficos de emisiones	Se generan gráficos de emisiones instantáneas [g/s] en función del tiempo para todos los contaminantes. También se generan gráficos de emisiones totales acumuladas [g] en función del tiempo, velocidad, cambios de velocidad, gradiente, etc. Estos pueden crearse en software Excel o la herramienta GPS Visualizer.
58	Generar mapas de emisión (2D o 3D)	Se utiliza la herramienta GPS Visualizer para plasmar las emisiones instantáneas en un plano georreferencial, ya sea en 2D o 3D. Para esto se debe utilizar el fichero simplificado que combina la información de la VAM con las emisiones calculadas. En caso de utilizar la opción 3D, se debe acompañar el análisis con el software Google Earth.
59	Identificar tendencias en las emisiones vehiculares	Se analizan gráficos y mapas de emisiones en busca de identificar tendencias marcadas.
60	Analizar efectos de velocidad	Se analizan gráficos y mapas de emisiones en busca de relaciones con la velocidad de circulación.
61	Analizar efectos del tráfico	Se analizan gráficos, mapas de emisiones y la bitácora de la prueba en busca de relaciones con el tráfico enfrentado.
62	Analizar efectos del gradiente	Se analizan gráficos, mapas de emisiones y elementos topográficos en busca de relaciones con el gradiente del terreno.
63	Analizar efectos del perfil de aceleración	Se analizan gráficos y mapas de emisiones en busca de relaciones con la aceleración del vehículo.
64	Confeccionar informe de resultados	Se plasman los resultados obtenidos y aquellas relaciones que fueron comprobadas durante el análisis. Se responde a la hipótesis original planteada junto al objetivo general.