

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTIMACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE
GASES CONTAMINANTES EMITIDOS POR CINCO
VEHÍCULOS LIVIANOS A GASOLINA QUE TRANSITAN
EN LIMA METROPOLITANA**

**Tesis para optar por el título de Ingeniero Mecánico, que presenta
el bachiller**

PIERO ALEXANDRO CHÁVEZ QUISPE

ASESOR: Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza

Lima, mayo de 2024

Informe de Similitud

Yo, Julio César Cuisano Egúsquiza, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulado “Estimación de los factores de emisión de gases contaminantes emitidos por cinco vehículos livianos a gasolina que transitan en Lima Metropolitana”, del autor Piero Alejandro Chávez Quispe, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 18%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 7/05/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: San Miguel, 7 de mayo de 2024.

Apellidos y nombres del asesor: Cuisano Egúsquiza, Julio César	
DNI: 10744493	Firma 
ORCID: 0000-0002-2175-3656	

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se realizó el análisis de los datos de las concentraciones de los gases de escape obtenidos mediante la experimentación en cinco vehículos livianos de gasolina diferentes modelos y año de fabricación. Se realizó las gráficas para analizar los consumos de combustible, aire para la combustión e índices de emisiones de gases de escape: CO₂, CO, HC, NO_x.

Los vehículos bajo estudio fueron instrumentados. Un sistema de adquisición de datos permitió el registro en tiempo real de todas las variables de manera instantánea del consumo de aire, combustible y las concentraciones de los gases contaminantes. La velocidad del vehículo y las condiciones ambientales fueron obtenidas mediante el sistema GPS y un sensor de temperatura y humedad. Asimismo, se utilizó el dispositivo OBDLINK MX+ para conectarse a la unidad de control electrónico (ECU), a través del puerto OBD con el fin de obtener los datos medidos y calculados para el vehículo de estudio por la computadora del vehículo en estudio. Se elaboró un procedimiento para efectuar una campaña experimental, en diferentes vías de Lima Metropolitana. Se realizó, en promedio, 4 recorridos diferentes y aleatorios por vehículo al día en varias semanas. En total se registraron aproximadamente más de 10 variables durante más de 50000s en los cinco vehículos.

Los factores de emisión contaminantes (g/km), para cada vehículo, fueron calculados y representados en gráficos y tablas. Se realizó el comparativo del factor de emisión de CO₂ en g/km entre el estudio experimental y el resultado del OBDLINK MX+. Además, se realizó la comparativa del factor de emisión de CO₂, en g/km, entre el modelo COPERT y el análisis experimental.

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas presentan las concentraciones en porcentaje de los gases de combustión, los cuales fueron calculados como factores de emisión en g/km. Gracias a esto podemos observar cómo operan los vehículos en la actualidad, debido a que una mala quema de combustible o un mal funcionamiento del motor pueden producir mayor cantidad de hidrocarburos no quemado. Este documento presenta los comparativos y resultados de cinco vehículos en vías de Lima Metropolitana.



Dedicatoria

A mis padres, Ernesto y Deysi, por el soporte emocional y el apoyo incondicional a lo largo de mi carrera profesional. A mi hermano Diego por permitirme mejorar como persona día a día. A mis amigos de la universidad, con los cuales estreche fuertes lazos de amistad.

A mi asesor Julio César Cuisano Egúsquiza, por la oportunidad que me brindo y el soporte para culminar este proyecto.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : ESTIMACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE GASES CONTAMINANTES EMITIDOS POR CINCO VEHÍCULOS LIVIANOS A GASOLINA QUE TRANSITAN EN LIMA METROPOLITANA.

ÁREA : Energía

PROPUESTO POR : Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza

ASESOR : Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza

TESISTA : Piero Alexandro Chávez Quispe

CÓDIGO : 20165792

FECHA : 07/09/2023

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

La emisión de gases de escape de vehículos livianos influye directamente en el calentamiento global y la contaminación ambiental. En la actualidad, la información del daño generado por estos gases es escasa. El último registro de las emisiones vehiculares fue emitido en el año 2014 por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). En ese sentido, el presente trabajo determina los factores de emisión contaminante emitidos por vehículos livianos que transitan en Lima Metropolitana. Además, compara los resultados obtenidos del factor de emisión de CO₂ en g/km por diferentes fuentes: data experimental, programa COPERT y algoritmo del módulo de control del vehículo OBD LINK+. Para ello, la metodología del trabajo contempla una campaña de medición de cinco vehículos livianos de diferente modelo y año de fabricación. Los vehículos recorren diferentes trayectorias, mientras se realiza la medición de la concentración de gases de escape mediante un único sistema de adquisición de datos. De igual manera, la metodología describe las características técnicas de los vehículos, la instrumentación empleada y el estudio del programa COPERT

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ESTIMACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE GASES CONTAMINANTES EMITIDOS POR CINCO VEHÍCULOS LIVIANOS A GASOLINA QUE TRANSITAN EN LIMA METROPOLITANA

Introducción

1. Marco Teórico
2. Metodología y experimentación
3. Resultados y análisis

Conclusiones

Bibliografía

Anexos



Dr. Julio César Cuisano Egúsqiza

Asesor





CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	. 1
1.MARCO TEÓRICO	. 5
1.1. Motores de combustión interna alternativo.....	5
1.2. Ciclo de Trabajo.....	6
1.3. Condiciones ambientales y sus efectos	9
1.4. Factores de emisión.....	13
1.4.1. Fuentes móviles para factores de emisión	14
1.5. Modelo COPERT.....	15
1.6. Metodología del COPERT	16
1.6.1. Estudio de recorrido.....	19
1.7. Software de procesamiento COPERT	19
1.7.1. Creación del proyecto a realizar	20
1.7.2. Año de flota vehicular	20
1.7.3. Información ambiental.....	21
1.7.4. Especificaciones de las constantes para combustibles	22
1.7.5. Configuración de categorías	22
1.7.6. Datos de circulación	24
1.7.7. Resultados de emisiones contaminantes.....	24
1.7.8. Procedimiento de cálculo g/km utilizando el modelo COPERT	25
2.METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN	27
2.1. Circuito de pruebas en Lima	28
2.2. Instrumentación para medición.....	31
2.2.1. Analizador de gases.....	32
2.2.2. Sistema de adquisición de datos	33
2.2.3. Sensor de humedad y temperatura.....	36
2.2.4. Sistema GPS	36
2.2.5. Vehículos de prueba y procedimiento para adquisición de datos.....	37
2.3. Flota de vehículos	37
2.4. Procedimiento de cálculo y expresiones	42
2.5. Ejemplo de cálculo.....	45
3.RESULTADOS Y ANÁLISIS	48
3.1. Resultados de los circuitos en condiciones de tráfico.....	49
3.2. Comparativo de factor de emisión de CO ₂ entre OBDLINK MX+ y el valor obtenido por la experimentación	71
3.3. Comparativo de factor de emisión de CO ₂ entre COPERT y el valor obtenido por la experimentación.....	74
CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Modelado de ciclos de un MCIA de 4 tiempos (Payri, 2011).	7
Figura 1.2 - Emisiones contaminantes según el dosado en el escape de un MEP sin catalizador (Payri, 2011).	8
Figura 1.3 - Actividad de transporte público del mes de julio, SENAMHI (2020).	10
Figura 1.4 - Venta de vehículos livianos – Automóviles, SW (AAP, 2020).	12
Figura 1.5 - Cantidad de vehículos por cada 1000 habitantes del 2011 – 2016 (IPSOS, 2018).	13
Figura 1.6 - Diagrama de procesos del programa COPERT, elaboración propia.	16
Figura 1.7 - Módulo de creación del proyecto en el programa COPERT.	20
Figura 1.8 - Módulo de selección de año en el programa COPERT.	21
Figura 1.9 - Características ambientales del desarrollo COPERT.	21
Figura 1.10 - Módulo de especificaciones de los combustibles en programa COPERT.	22
Figura 1.11 - Configuración de categorías del programa COPERT.	23
Figura 1.12 - Configuración de actividad y cantidad de datos en COERPT.	23
Figura 1.13 - datos de circulación de COPERT.	24
Figura 1.14 - Resultados de emisiones en caliente COPERT.	24
Figura 1.15 - Factor de emisión de CO ₂ (ton/año) COPERT.	25
Figura 1.16 - Factor de emisión de CO (ton/año) COPERT.	25
Figura 1.17 - Factor de emisión de NO _x (ton/año) COPERT.	25
Figura 2.1 - OBDLINK MX+.	27
Figura 2.2 – Recorridos HAR1/HAR2/HAR3/HAR4 del modelo Hyundai Accent	29
Figura 2.3 – Recorridos HER1/HER2/HER3/HER4 del modelo Hyundai Elantra	29
Figura 2.4 – Recorridos TRVR1/TRVR2/TRVR3/TRVR4 del modelo Toyota Rav4	30
Figura 2.5– Recorridos TYR1/TYR2/TYR3/TYR4 del modelo Toyota Yaris	30
Figura 2.6.– Recorridos VGR1/VGR2/VGR3/VGR4 del modelo Volkswagen Gol	31
Figura 2.7 - Instrumentación para mediciones a bordo de los factores contaminantes y datos del vehículo.	32
Figura 2.8 - Analizador de gases.	33
Figura 2.9 - Sistema de adquisición de datos (LABEN PUCP, 2016)	34
Figura 2.10 - Arduino a utilizar para el circuito electrónico – Genuino Mega 2560	35
Figura 2.11 - sensor de humedad y temperatura.	36
Figura 2.12 - Sistema GPS.	36
Figura 3.1 - Mediciones de velocidad en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Elantra,	49
Figura 3.2 - Mediciones de velocidad en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Accent.	50
Figura 3.3 - Mediciones de aire en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Elantra,	50
Figura 3.4 - Mediciones de aire en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Accent.	51

Figura 3.5 - Mediciones de factor lambda en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Elantra,	51
Figura 3.6 - Mediciones de factor lambda en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Accent.	52
Figura 3.7 - Mediciones de combustible en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Elantra.	52
Figura 3.8 - Mediciones de combustible en condiciones de tráfico para el Hyundai Accent	53
Figura 3.9 - Mediciones de factor de emisión CO en condiciones de tráfico para el Hyundai Elantra.	53
Figura 3.10 - Mediciones de factor de emisión CO en condiciones de tráfico para el Hyundai Accent.	54
Figura 3.11 - Mediciones de factor de emisión NO _x en condiciones de tráfico para el Hyundai Elantra	54
Figura 3.12 - Mediciones de factor de emisión NO _x en condiciones de tráfico para el Hyundai Accent.	55
Figura 3.13 - Mediciones de factor de emisión HC en condiciones de tráfico para el Hyundai Elantra	55
Figura 3.14 - Mediciones de factor de emisión HC en condiciones de tráfico para el Hyundai Accent	56
Figura 3.15 - Mediciones del factor de emisión CO ₂ en condiciones de tráfico para el Hyundai Elantra.	56
Figura 3.16 - Mediciones de factor CO ₂ en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Accent.	57
Figura 3.17 - Mediciones de velocidades km/h en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.	57
Figura 3.18 - Mediciones de velocidades km/h en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.	58
Figura 3.19 - Mediciones de consumo de aire g/km en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.	59
Figura 3.20 - Mediciones de consumo de aire g/km en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.	59
Figura 3.21 - Mediciones de factor lambda en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.	60
Figura 3.22 - Mediciones de factor lambda en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.	60
Figura 3.23 - Mediciones de combustible en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.	61
Figura 3.24 - Mediciones de combustible en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.	61
Figura 3.25 - Mediciones del factor CO g/km en condiciones de tráfico para el vehículo Toyota RAV 4.	62
Figura 3.26 - Mediciones del factor CO g/km en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.	63
Figura 3.27 - Mediciones del factor NO _x g/km en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.	63
Figura 3.28 - Mediciones del factor NO _x g/km en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.	64
Figura 3.29 - Mediciones del factor HC g/km en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.	64

Figura 3.30, Mediciones del factor HC g/km en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.	65
Figura 3.31 - Mediciones del factor CO ₂ g/km en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.	65
Figura 3.32 - Mediciones del factor CO ₂ g/km en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.	66
Figura 3.33 - Mediciones de velocidad km/h en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol.	66
Figura 3.34 - Mediciones de consumo de aire g/km en condiciones de tráfico Volkswagen Gol	67
Figura 3.35 - Mediciones factor lambda en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol.	68
Figura 3.36 - Mediciones de combustible g/km en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol.	68
Figura 3.37 - Mediciones de factor de CO g/km en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol,	69
Figura 3.38 - Mediciones de factor de NO _x g/km en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol.	69
La figura 3.39 presenta los factores de emisión de HC en g/km del vehículo Volkswagen Gol en los cuatro recorridos VGR1, VGR2, VGR3 y VGR4.	70
Figura 3.40 - Mediciones de factor de CO ₂ g/km en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol.	70
Figura 3.41 Comparativo de ECO ₂ (g/km) OBDLINK + vs Experimental – Hyundai Accent	71
Figura 3.42 Comparativo de ECO ₂ (g/km) OBDLINK + vs Experimental – Hyundai Elantra	72
Figura 3.43 Comparativo de ECO ₂ (g/km) OBDLINK + vs Experimental – Toyota Rav4	72
Figura 3.44 Comparativo de ECO ₂ (g/km) OBDLINK + vs Experimental – Toyota Yaris	73
Figura 3.45 Comparativo de ECO ₂ (g/km) OBDLINK + vs Experimental – Volkswagen Gol	74
Figura 3.46 Comparativo de ECO ₂ (g/km) COPERT vs Experimental – Hyundai Accent	75
Figura 3.47 Comparativo de ECO ₂ (g/km) COPERT vs Experimental – Hyundai Elantra	75
Figura 3.48 Comparativo de ECO ₂ (g/km) COPERT vs Experimental – Toyota Rav4	76
Figura 3.49 Comparativo de ECO ₂ (g/km) COPERT vs Experimental – Toyota Yaris	77
Figura 3.50 Comparativo de ECO ₂ (g/km) COPERT vs Experimental – Volkswagen Gol	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 - Estándares de calidad para aire ambiental Fuente (SENAMHI, 2020).	11
Tabla 1.2 - Límites Máximos permisibles para vehículos livianos de 2018 en adelante, norma Euro, (El Peruano, 2017).	11
Tabla 1.3 - Límites Máximos permisibles para vehículos livianos de 2018 en adelante, norma Tier. (Peruano, 2017).	11
Tabla 2.1 - Características del OBDLINK MX+.	27
Tabla 2.2 - Características del analizador de gases (Infraned, 2015)	33
Tabla 2.3 - características del sensor Omega (Omega,2015).	36
Tabla 2.4 - características del Sistema GPS.	37
Tabla 2.5 – Datos técnicos del HYUNDAI ACCENT 2012.	38
Tabla 2.6 - Datos técnicos del HYUNDAI ELANTRA 2012.	39
La siguiente Tabla 2.7 presenta los datos técnicos del vehículo Volkswagen GOL del 2021	39
Tabla 2.7 - Datos técnicos VOLKSWAGEN GOL.	40
La siguiente Tabla 2.8 presenta los datos técnicos del Toyota Yaris del año 2008.	40
Tabla 2.8 - Datos técnicos del TOYOTA YARIS.	41
Tabla 2.9 - Datos técnicos del TOYOTA RAV4.	42
Tabla 2.10 - Masa Molar de los componentes de emisiones de escape.	44
(2.11)	45
Tabla 2.11 - datos obtenidos de un momento i-ésimo del analizador de gases.	46

INTRODUCCIÓN

Lima Metropolitana es una de las ciudades más contaminadas en el ranking mundial debido a su alto grado de producción de gases contaminantes. Estos varían desde material particulado (MP), producido por las industrias, hasta los gases emitidos por los motores de combustión interna. La cantidad de vehículos livianos en Lima llega a 2,602,030 en el año 2015 (Lima Como Vamos, 2015). Según el informe realizado por Lima Como Vamos existe 178 vehículos livianos y pesados por cada 1000 habitantes y 125 vehículos menores.

La contaminación del aire perjudica a los seres vivos, culturas, ecosistemas y hábitats. En el transcurso de los años se ha intensificado las consecuencias en la salud humana y medio ambiente. Estos contaminantes suelen afectar a diferentes áreas mencionadas, una de las cuales es el impacto al proceso de evolución de las plantas, ya que perjudica la fotosíntesis generando efectos graves en la purificación del aire que se aspira diariamente. La lluvia ácida es una consecuencia relacionada a la acumulación de los gases en la atmósfera, debido a las propiedades de ciertos gases como CO₂, CH₄, N₂O y O₃ (SENAMHI, 2021).

Los efectos perjudiciales que causan en las personas son los siguientes (IMT, 2014)

- La presencia de CO₂ en el aire empeora la calidad y la afectación de condiciones climáticas, lo cual repercute en la salud humana (IMT, 2014)
- El NO_x, óxidos de nitrógeno y gases altamente reactivos produciendo ozono troposférico, esta causa irritaciones en el aparato respiratorio. (IMT, 2014)
- El CO ingresa a la sangre, a través de las vías respiratorias, produciendo déficit en la capacidad pulmonar para los niños y pueden funcionar como medio de transporte para otras sustancias nocivas. (IMT, 2014)

Además, la contaminación ambiental, en especial, la del aire, produce problemas cardiovasculares, alergias, ataques de asma, conjuntivitis, enfermedades bronquiales, cáncer de pulmón o piel, problemas de visión afectando a los grupos más vulnerables los ancianos, niños y mujeres embarazadas (SENAMHI, 2021).

Por otro lado, no se posee información necesaria para estimar los daños que genera a la sociedad en Lima Metropolitana, esto es debido a la deficiencia de estudios, los cuales se basan en contaminantes y estimaciones a futuro. El último registro de estimaciones vehiculares en Lima Metropolitana del año 2014 fue realizado por SENAMHI.

De acuerdo con Pérez, los motores de combustión interna generan dos tipos de gases, inofensivos y contaminantes. Los primeros están formados por Nitrógeno, Dióxido de Carbono, vapor de agua e Hidrógeno, mientras que los segundos están formados por Monóxido de carbono, Hidrocarburos, Óxidos de Nitrógeno y Plomo. El nitrógeno es un gas inofensivo que se encuentra en el aire y solemos respirar constantemente, este posee una concentración del 79%, (Perez, 2018). El Dióxido de carbono CO_2 es producto de la combustión completa del carbono, resultando inofensivo para los seres humanos y sirve como alimentación para las plantas; a mayor concentración se da una mejor combustión; no obstante, si este se incrementa de manera desmesurada producirá variaciones climáticas a gran escala.

En la búsqueda de nuevos datos para estimar los factores contaminantes producidos por los vehículos livianos, se evalúan diferentes alternativas para la estimación de estos como los programas americanos MOBILE, MOVES 3 o el europeo COPERT. Debido a que estos pueden utilizarse como calculadoras para estimarlos. Actualmente se utiliza el programa COPERT para estimar factores contaminantes a diferentes años, incluso puede estimar a futuro; sin embargo, estos valores no son exactos, ya que se basan en datos recopilados por diferentes usuarios del programa. Por ello, se ve la necesidad de obtener datos reales en base a experimentaciones con diferentes vehículos en Lima Metropolitana, los cuales utilizarán gasohol con mezcla de etanol E7,8.

Debido a esto, el presente trabajo pretende realizar un análisis experimental en cinco vehículos que funcionan con gasohol con mezcla de etanol en un 7,8% en Lima Metropolitana, con esto desarrollar la evaluación de los factores de emisión obtenidos para cada vehículo mediante gráficos. Para ello, se implementará en los vehículos un único sistema de adquisición de datos, un analizador de gases y GPS, esto debido al registro de datos en tiempo real del consumo de aire de admisión del motor, las emisiones de los gases de escape, la velocidad del vehículo en km/h,

la distancia recorrida, la humedad relativa y las condiciones geográficas durante las pruebas. La campaña experimental será desarrollada mediante diferentes recorridos variando las rutas y horarios, dependiendo de la disponibilidad del equipo, dentro de Lima Metropolitana. Cinco (05) vehículos brindarán una cantidad de datos experimentales suficiente para el análisis de las variables de interés, lo cual permitiría obtener información actual de los factores contaminantes.

Los resultados esperados del estudio propuesto permitirán estimar los factores de emisión en g/km para cada tipo de vehículo, los consumos de combustible y el consumo de aire instantáneo. Además, se realizará un comparativo del factor de emisión del CO₂ obtenido de manera experimental vs el obtenido por el OBDLINK MX+ y por el programa COPERT.

Se presentará la metodología para calcular los factores de emisión en caliente (CO, CO₂ y NO_x) para un vehículo utilizando el programa COPERT.



Objetivo general

Estimar los factores de emisión de gases contaminantes emitidos por cinco vehículos livianos a gasolina que transitan en Lima Metropolitana, con el propósito de comprender y estimar los factores de emisión mediante la implementación de un estudio experimental

Objetivos específicos

- Seleccionar cinco tipos de vehículos livianos a gasolina, con la finalidad de obtener datos de su funcionamiento en condiciones reales de tránsito, mediante la implementación de un sistema de adquisición.
- Desarrollar una campaña de medición en vías del área metropolitana de Lima, considerando diferentes horarios, condiciones de tráfico vehicular y siguiendo una propuesta de procedimiento.
- Realizar el procesamiento de datos adquiridos para la obtención de los factores de emisión de los gases contaminantes, a través del uso de cinco vehículos a condiciones de tránsito aleatorias.
- Elaborar gráficos, los cuales permitan el análisis de los factores de emisión en los diferentes vehículos, así como la comparativa entre el programa COPERT, OBDlink + con los resultados experimentales.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Motores de combustión interna alternativo

Según Payri, los motores de combustión interna alternativos (MCIA) ya poseen más de 1 siglo de historia, ya que el principal ejemplar de estos se dio a conocer en el año 1876 por el alemán Nicolaus Otto, la cual fue patentada como Gasmotor (Payri, 2011).

Debido a que los MCIA tienen como una principal característica ser máquinas volumétricas o de desplazamiento positivo, nos da a entender la forma en la que el fluido se desplaza dentro de paredes, lo cual modifica la masa dentro del motor, debido a esto las máquinas de vapor son consideradas como uno de los primeros ingenios capaces de producir altos rendimientos, energía mecánica, y con esto poder ser la fuente de derivación para los MCIA.

A inicios de 1862, en París, se estableció, por primera vez, la importancia de la carga del cilindro previo a la combustión, por el francés Alphonse Eugene Beau de Rochas, este es conocido como ciclo teórico de volumen constante (Payri, 2011).

La combustión normal se enciende mediante la chispa producida por una bujía. Se conoce que la combustión solo varía mediante el instante de encendido, siempre y cuando, el motor sea prediseñado, por lo que el control de la combustión no es factible. Los motores de combustión interna, MCIA, se clasifican en dos tipos de encendido, los cuales son provocados por compresión (MEC) o por encendido en chispa (MEP).

Motores de encendido por chispa (MEP)

Para que se produzca la combustión de estos motores, se requiere producir una energía externa al ciclo de trabajo, la cual es producido por un salto de chispa previo al punto muerto superior. Este salto de chispa puede variar según el ángulo de encendido; asimismo, producirá diferencias significativas en los porcentajes de gases de escape y con esto producir combustiones lo más eficientes posibles (Payri, 2011).

Estos motores se diferencian en 2 tipos, inyección directa e indirecta, para los motores indirectos el ingreso del combustible se realiza en el proceso de admisión; mientras que, en los motores directos, la inyección de combustible se realiza en la carrera de compresión, formando una mezcla heterogénea.

Motores de encendido por compresión (MEC)

Para estos motores la compresión es realizada mediante el autoencendido de la mezcla combustible y aire, la cual se consigue luego de obtener temperaturas altas dentro de la cámara de combustión debido a la compresión de los gases. En estos casos el combustible ingresa al final de la carrera de compresión, con la finalidad de poder controlar el instante de encendido con el parecido a un MEP de inyección directa, la mezcla es heterogénea. Asimismo, la mezcla aire-combustible local es cercano al estequiométrico. Finalmente, el proceso de combustión depende de los procesos de inyección, así como los procesos físicos del combustible o del aire (Payri, 2011).

1.2. Ciclo de Trabajo

Los motores de combustión interna trabajan con 2 tipos de ciclos, siendo los motores de cuatro tiempos (4T) y los de dos tiempos (2T). Estos motores se diferencian en el proceso de renovación de carga, la cual se basa en la admisión del aire, combustible y escape de los gases de combustión. Se procederá a explicar los procesos de los motores de 4 tiempos, los cuales cuentan con admisión, compresión, expansión y escape. Ver Figura 1.1 para mayor detalle.

Admisión. Conocido como la primera carrera del pistón, la cual después de estar en el punto muerto superior (PMS) se desplaza hacia abajo al punto muerto inferior (PMI) permitiendo el

ingreso de gases. Para el caso de inyección indirecta ingresa aire y combustible, mientras en el caso de inyección directa ingresa el aire y combustible antes de llegar al PMS, en la carrera de compresión.

Compresión. Esta es la segunda carrera del pistón, la cual luego de haber permitido el ingreso de los gases procede a comprimirlos hasta el contacto con el salto de chispa. Cabe resaltar que esta explicación es para los motores MEP; La combustión en los MEC no se produce con el salto de chispa, sino por las altas presiones a las que está sometido el gas. Las válvulas de admisión y escape se encuentran cerradas al momento de la compresión.

Expansión. La tercera carrera del pistón, la cual se produce posterior a la combustión, debido al incremento de presiones producidas por la previa combustión de los gases de admisión, lo que lleva al empuje del embolo hacia el punto muerto inferior (PMI) produciendo el único trabajo del ciclo.

Escape. Esta es la última carrera del pistón, la cual inicia en el punto muerto inferior (PMI) posterior al trabajo realizado. El embolo se desplaza hacia el PMS produciendo la expulsión de los gases de escape, iniciando el nuevo ciclo.

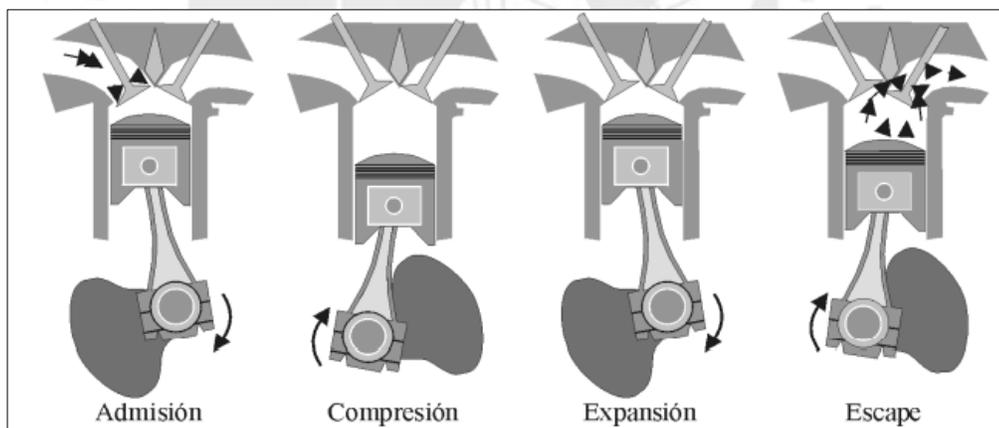


Figura 1.1 - Modelado de ciclos de un MCI de 4 tiempos (Payri, 2011).

Las principales emisiones que son producidas por los MCI son provenientes del tubo de escape, los cuales ocasionan problemas para la salud; por ejemplo, hidrocarburos no quemados (HC) debido a la combustión incompleta; asimismo, el Monóxido de carbono (CO) el cual es producido por una mezcla rica y combustión incompleta. Además, el dióxido de carbono (CO₂), óxidos de

nitrógeno (NO_x). Estas emisiones suelen depender de la variación de los automóviles, tales como el combustible, el dosado, factores de operación y los estados de mantenimiento.

El CO suele aparecer cuando la mezcla entre el combustible y el aire es rica, lo que lleva a una asociación a la combustión incompleta, debido a que el oxígeno es menos abundante cuando la mezcla es rica, lo que produce una escasez de O_2 impidiendo una conversión completa de CO_2 , y con esto incrementa el CO (Payri, 2011).

Según Gonzales, este gas se caracteriza por ser inodoro, incoloro e insípido, este se fusiona con la sangre humana de una manera más eficiente que el oxígeno. Produce carboxihemoglobina impidiendo el transporte y la liberación del oxígeno a los tejidos (Gonzales, S/F).

El NO_x se produce en las combustiones estequiométricas, cuando la temperatura es elevada y hay abundancia de oxígeno; además, esta lleva a que la máxima formación de NO_x se produzca en relaciones aire-combustible pobres.

Los hidrocarburos no quemados (HC) se producen mediante la combustión incompleta, la cual es producida por 2 posibilidades, tales como el caso de dosado rico, el cual al no poseer una cantidad elevada de oxígeno, no oxida todo el combustible quedando una parte sin combustionar. La combustión rica en la cual se produce la dificultad de la propagación del frente de llama, llevando a que ciertas partes de la mezcla no se quemen incrementando el HC.

La Figura 1.2 presenta las emisiones contaminantes a medida que incrementa el dosado relativo (Fr).

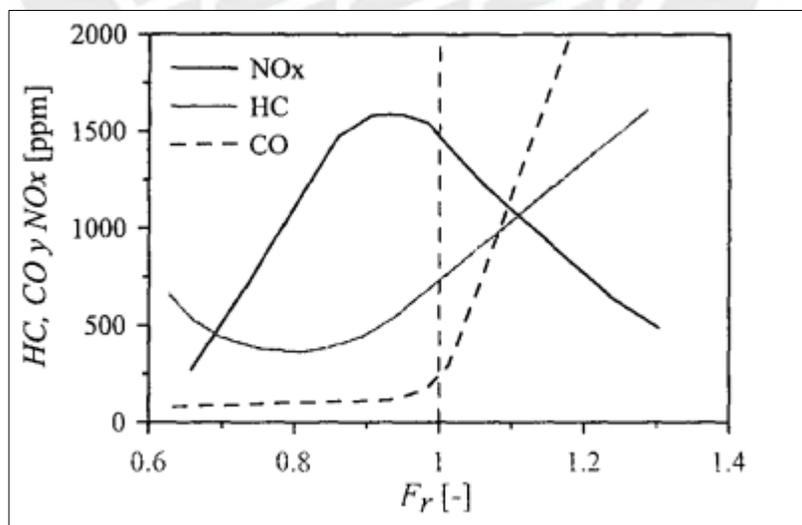


Figura 1.2 - Emisiones contaminantes según el dosado en el escape de un MEP sin catalizador (Payri, 2011).

1.3. Condiciones ambientales y sus efectos

Un principal riesgo medioambiental, que afecta la salud de las personas, es la contaminación del aire que puede darse en países desarrollados como subdesarrollados. En las zonas rurales se estima un aproximado de 4.2 millones de muertes prematuras debido a la contaminación ambiental en alta proporción a la contaminación por partículas pequeñas de 2.5 micrones o menos diámetro (OMS, 2018).

Acorde al estudio realizado por Estecha, las recientes investigaciones, en base a los contaminantes del aire, manifiestan que los efectos a la salud generan problemas cardiovasculares. Entre estos contaminantes podemos encontrar al plomo, cadmio, arsénico, mercurio. En el caso del plomo al ser un metal tóxico, el cual está presente en el medio ambiente, se almacena en los huesos por casi 30 años; además de afectar los sistemas nervioso periférico y central (Estecha, s/f).

La contaminación ambiental es considerada como un problema a nivel mundial generando distintos males en la sociedad. Por ello, se está implementando diferentes medidas para la detención de esta. Perú está ubicado en el puesto 22 de los países más contaminados a nivel mundial. Lima se ubica en el tercer lugar como la ciudad con un índice alto de congestión vehicular; además, de ser la octava ciudad más contaminada de Latinoamérica (IQAir, 2018).

El transporte es considerado como una fuente de contaminantes debido al alto índice de emisiones producidas por los gases de escape. Lima, al poseer un deficiente sistema de transporte público, mala organización de rutas produce por lo menos 15000 muertes por enfermedades respiratorias (MINAM, 2021).

Por otro lado, El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú registra la actividad de la contaminación en Lima Metropolitana mensualmente desde el 2004, lo que nos brinda la información recopilada del mes de julio, a través de la aplicación Moovit, la cual presenta el muestreo del desplazamiento de las personas diariamente en transportes públicos de Lima Metropolitana (SENAMHI, 2020).

Además, permite la obtención del tiempo de viaje del ciudadano y espera. Moovit permite utilizar data para poder realizar los diferentes cálculos estadísticos, la cual es obtenida mediante OpenStreetMap-OSM (SENAMHI, 2020). Los datos obtenidos de las estaciones del distrito de San Borja presentan un alto índice en el mes de julio, lo cual se debe al alto consumo de automóviles; asimismo, en los otros puntos como el distrito de Carabayllo se presentó un índice alto, pero no supera el límite otorgado por la ECA (Estándares de Calidad Ambiental).

Por esta razón, en el Perú, los Límites Máximos Permisibles (LMP) se aplicarán a los vehículos nuevos y usados que van a ser incorporados en el parque automotor, y los que ya se encuentran en circulación.

Así como se visualiza en la Figura 1.3, el incremento del porcentaje de la actividad de transporte público incrementa con el pasar de los meses.

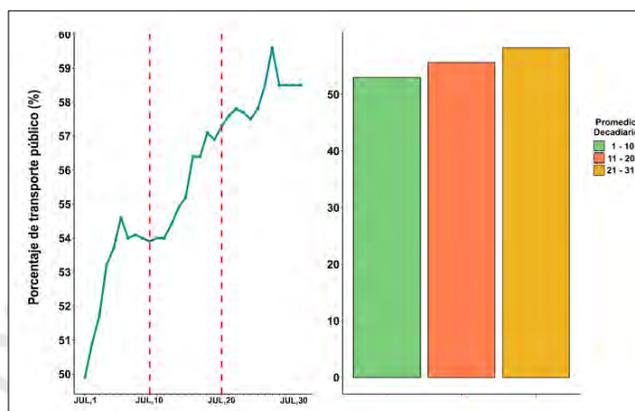


Figura 1.3 - Actividad de transporte público del mes de julio, SENAMHI (2020).

La calidad del aire en Lima Metropolitana presenta un incremento de contaminación. Por ello, SENHAMI, a través de la Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico (SEA), tiene la ocupación de vigilar, monitorear y pronosticar los contaminantes atmosféricos. Son 10 las estaciones dedicadas a la vigilancia, ubicadas principalmente en los puntos más concurrentes de Lima, tales como Lima Norte, Lima Este, Lima Centro y Lima Sur. Las estaciones de monitoreo brindan la información sobre 6 contaminantes conocidos como, material particulado (PM_{10}), material particulado menor a 2,5 micras de diámetro ($PM_{2,5}$), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y ozono (O_3).

Acorde a la ley general del Ambiente, los contaminantes del aire poseen restricciones con respecto al límite Estándar de Calidad Ambiental, los cuales no deben superar dicha medida para evitar futuros problemas de salud a los ciudadanos y al ambiente. En las siguientes tablas 1.1, tabla 1.2 y tabla 1.3 se presentará los valores establecidos por el Ministerio del Ambiente (Sistema Nacional de Información Ambiental, 2005).

Tabla 1.1 - Estándares de calidad para aire ambiental Fuente (SENAMHI, 2020).

ESTANDARES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AIRE		
CONTAMINANTE	FRECUENCIA	ECA-aire
Material Particulado menor de 10 micras - PM10	24 horas (día)	100 ug/m ²
Material Particulado menor de 2.5 micras - PM2.5	24 horas (día)	50 ug/m ²
Monóxido de carbono - CO	1 hora	30 000 ug/m ²
Dióxido de azufre - SO ₂	24 horas (día)	250 ug/m ²
Dióxido de Nitrógeno - NO ₂	1 hora	200 ug/m ²
Ozono Superficial - O ₃	8 horas	100 ug/m ²

Tabla 1.2 - Límites Máximos permisibles para vehículos livianos de 2018 en adelante, norma Euro, (El Peruano, 2017).

I.3. Vehículos de pasajeros PBV ≤ 2.5 Ton y ≤ 6 asientos								
Año aplicación (*)	Norma	Directiva	Tipo de Motor / encendido	CO [g/Km]	HC+NOx [g/Km]	HC [g/Km]	NOx [g/Km]	PM [g/Km]
2017 a marzo 2018	EURO III o de mayor exigencia	98/69/EC(A) ⁽²⁾	Chispa	2,30	-	0,20	0,15	-
			Compresión	0,64	0,56	-	0,50	0,05
Abril 2018 en adelante	EURO IV ⁽¹⁾ o de mayor exigencia	98/69/EC(A) ⁽²⁾ y 2002/80/EC ⁽²⁾	Chispa	1,00	-	0,10	0,08	-
			Compresión	0,50	0,30	-	0,25	0,025

Tabla 1.3 - Límites Máximos permisibles para vehículos livianos de 2018 en adelante, norma Tier. (Peruano, 2017).

I.4. Vehículos livianos para el transporte de pasajeros (LDV) ≤ 12 asientos									
Año de aplicación (*)	Norma	Ciclo	Tipo de Motor	CO [g/mi]	HC+NOx [g/mi]	THC [g/mi]	NMHC [g/mi]	NOx [g/mi]	PM [g/mi]
2017 a marzo 2018	Tier 1 o de mayor exigencia	FTP	Gasolina	3,40	-	0,41	0,25	0,40	0,08
			GNV	3,40	-	-	0,25	0,40	0,08
			GLP	3,40	-	0,41	0,25	0,40	0,08
			Diésel	3,40	-	0,41	0,25	1,00	0,08
				3,40	-	0,41	0,25	1,00	0,08
Año aplicación (*)	Norma	Ciclo	Tipo de Motor	CO [g/mi]	NMOG ⁽¹⁾ [g/mi]	HCHO [g/mi]	NOx [g/mi]	PM [g/mi]	
Abril 2018 en adelante	Tier 2 (Bin 5) o de mayor exigencia	FTP	Gasolina GNV GLP Diésel	4,20	0,090	0,018	0,07	0,01	

La compilación de los factores de contaminación del aire ha sido publicada desde 1972, como la primera compilación de la EPA. El contenido de los factores de emisión y procesos de información poseen más de 200 categorías de contaminación de aire. Los factores de emisión han estado desarrollándose y complementando las fuentes de la data, material de estudio y estimaciones de ingeniería (EPA, 2015).

Lima Metropolitana, al ser la capital del país, posee la mayor afluencia de vehículos generando un incremento de compra y venta de estos; acorde a la Asociación automotriz del Perú, la venta

de vehículos livianos nuevos en el Perú incremento 59937 unidades entre enero y mayo del año 2021, esto generó un incremento en 73.2% respecto al periodo similar de 2020 (AAP, 2020).

Por otro lado, se encuentra la importación de vehículos livianos automotores, los cuales difieren según el estado de este. Acorde a la información del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), el parque vehicular desde el año 2012 hasta el 2016 ha crecido en 7%, incluso llegando a 2 661 719 vehículos circulando en todo el Perú. Lima es la región que posee mayor afluencia vehicular llegando a 1 752 919 vehículos livianos, lo cual representa el 66% de vehículos que existen en el parque automotor (MINAM, 2018).

La Asociación Automotriz del Perú acorde a sus estudios determino que las ventas en enero y diciembre de 2019 ascendieron 151 997 unidades entre automóviles SW, Camionetas, Pick up y SUV, las cuales representaron un incremento en 2.4% al observado en el 2018 (AAP, 2020). Ver Figura 1.4.

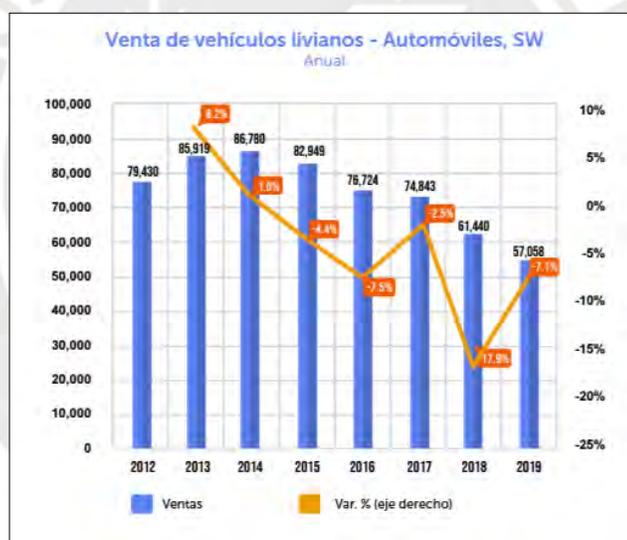


Figura 1.4 - Venta de vehículos livianos – Automóviles, SW (AAP, 2020).

Un análisis estadístico de cantidad de vehículos por cada mil habitantes fue desarrollado por el Ministerio del Ambiente en el año 2016, ver figura 1.5, lo que demostró que las ciudades de Arequipa, Cusco, La Libertad, Moquegua, Tacna y Lima son las ciudades con mayor afluencia. Además, este indicador fue incrementándose a medida que transcurrían los años, debido al incremento de habitantes en el país. Los vehículos incluyen automóviles y autobuses, pero no incluyen vehículos de 2 ruedas.

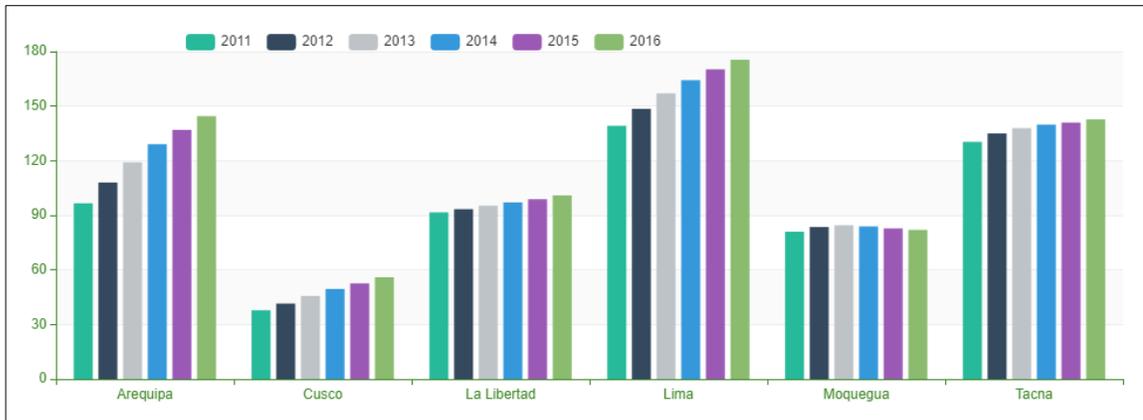


Figura 1.5 - Cantidad de vehículos por cada 1000 habitantes del 2011 – 2016 (IPSOS, 2018).

El informe de flujo vehicular realizado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones presentó la cantidad de vehículos livianos en Lima de todo el año 2021 mensualmente. Estos oscilan entre 912,085 hasta 1,346,859 cantidad de vehículos.

1.4. Factores de emisión

Se conoce a los factores de emisión como los valores representativos, que relacionan la cantidad de contaminantes con la atmósfera. Estos factores, usualmente, son expresados como el peso del contaminante entre la unidad de peso, volumen, distancia o duración de la actividad emitida contaminante. Estos factores facilitan la estimación de las emisiones desde varios recursos de contaminación ambiental y en algunos casos son considerados como el promedio de data, la cual es aceptable y de alta calidad (EPA, 2015).

Los factores de emisión han sido las herramientas fundamentales por un largo tiempo para el desarrollo nacional, regional y local de emisiones para la administración de la calidad de aire (EPA, 2015). Los factores de emisión han sido aplicados en determinadas limitaciones de emisiones en operaciones permitidas por los gobiernos y la industria. La ecuación general para la estimación de las emisiones brindada por la EPA es:

$$E = A * EF * \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (1.1)$$

donde:

$$E = \text{emisiones} \left(\frac{g}{km}\right)$$

$A = \text{velocidad de actividad}$

$E_f = \text{Factor de emision}$

$ER = \text{Eficiencia general de reducci3n de emisiones}$

Son considerados como el principal parámetro para lograr cuantificar la emisi3n de los gases NO_x , CO , SO_x y el material particulado.

1.4.1. Fuentes m3viles para factores de emisi3n

El tipo de combustible es uno de las principales variables para determinar la cantidad de contaminantes y estimar los factores de emisi3n, bajo las condiciones de operaci3n del autom3vil y las condiciones ambientales. Por otra parte, en la actualidad existen m3todos que los determinan:

- a. Equipo a bordo: Los equipos conocidos como PEMS cuentan con t3cnicas establecidas provenientes de autoridades ambientales reconocidas para el muestreo de estos. Estas logran determinar las emisiones y los factores; no obstante, el n3mero de veh3culos que permite medir es limitado.
- b. Dinam3metro de chasis y analizador de gases. Este m3todo es conocido por colocar el dinam3metro sobre el chasis del veh3culo, y as3 ejercer ciclos de conducci3n. Por medio de un analizador del gas de escape se logra determinar la masa de contaminante por kil3metro recorrido.
- c. Modelaci3n inversa: Este modelado utiliza modelos de calidad de aire, los cuales parten de concentraciones por medio de an3lisis estad3sticos, lo cual permite determinar las fuentes de emisi3n y los factores.
- d. Uso de modelos: *The Environmental Protection Agency* (EPA) tiene el modelo MOVES que proporciona la construcci3n de inventarios de emisiones en fuentes m3viles, y determina los factores de emisi3n. El modelo logra obtener informaci3n robusta de una manera clara y detallada de la flota vehicular, condiciones meteorol3gicas e infraestructura vial.

La compilación de los factores de contaminación del aire ha sido publicada desde 1972, como la primera compilación de la EPA. El contenido de los factores de emisión y procesos de información poseen más de 200 categorías de contaminación de aire. Los factores de emisión han estado desarrollándose y complementando las fuentes de la data, material de estudio y estimaciones de ingeniería (EPA, 2015).

1.5. Modelo COPERT

Estima las emisiones estándar de la industria europea, utilizando data de la población, el tipo de vehículo, el kilometraje, la velocidad y la temperatura del ambiente. El modelo calcula las emisiones y el consumo de energía o combustible para una región específica.

COPERT es utilizado por distintos países europeos con la finalidad de obtener datos oficiales de las emisiones. La metodología es revisada y publicada por expertos de la *Geneva Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP)* de la *United Nations framework Convention on Climate Change (UNECES)* y este incluye los contaminantes principales, tales como gases invernaderos, contaminantes del aire y las distintas especies tóxicas. (Ntziachristos, 2016).

La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) es la encargada del desarrollo de COPERT, el cual fue realizado a través de la preparación de inventarios oficiales de emisiones para los distintos transportes en carretera para los países miembros de la AEMA. Con respecto a su metodología, esta forma parte de la guía del inventario de emisiones contaminantes atmosféricos de *The Emission Inventory Guidebook (EMEP/CORINAIR 1999)* para los cálculos de las emisiones (Ntziachristos, 2016)

COPERT estima las emisiones de los distintos modos de conducción y de operación de los vehículos de carretera, tales como el funcionamiento del motor, las emisiones y la fase de calentamiento. Por otro lado, la biblioteca de COPERT posee los factores de emisión de hasta 450 tipos de vehículos individuales, los cuales incluyen vehículos pasajeros, vehículos comerciales ligeros y pesados. En la figura 1.6 se presenta el diagrama de procesos del programa COPERT.

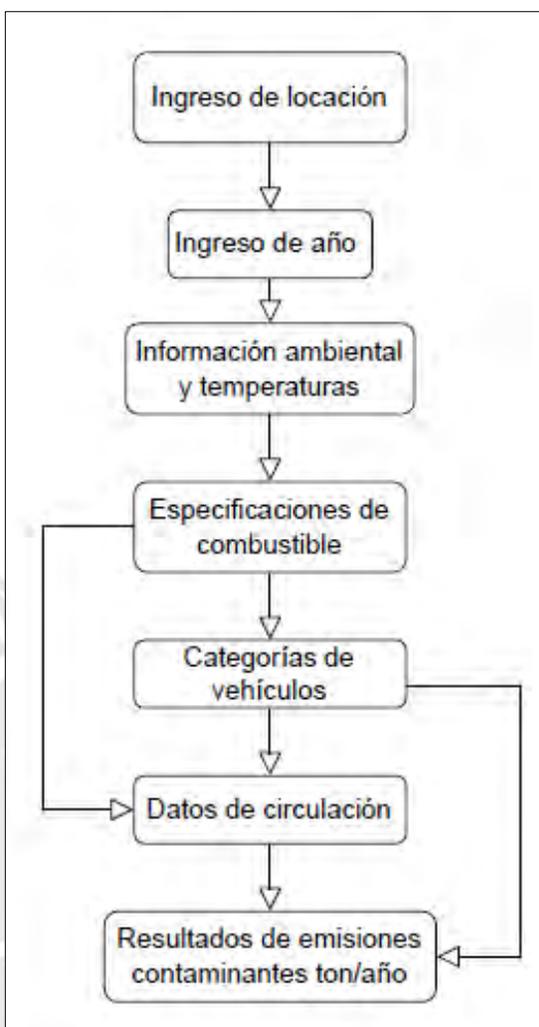


Figura 1.6 - Diagrama de procesos del programa COPERT, elaboración propia.

1.6. Metodología del COPERT

En esta sección se describe la metodología del COPERT, desde las distinciones de los procesos de emisión, inicio en caliente, en frío, evaporación, hasta la formulación de los factores de emisión usados en el software.

COPERT incluye la metodología para estimar las emisiones de la flota de vehículos a un nivel de ciudad. metodología trata de equilibrar la necesidad de los cálculos detallados de emisiones con el uso de pocos datos de entrada. Los gases y material particulado emitido por el motor del vehículo son calculados en base a la siguiente ecuación:

$$E_{EXH} = E_{HOT} + E_{COLD} \quad (1.2)$$

Las emisiones de escape E_{EXH} cuentan con 2 partes, la primera se da en el motor y en el sistema de control de emisiones; estos están estabilizados térmicamente y son denominadas E_{HOT} , debido a que el motor y los dispositivos de postratamiento ya alcanzaron la temperatura normal u optima de funcionamiento y la segunda considerada como emisiones de inicio en frio E_{COLD} . Las emisiones calientes se pueden calcular utilizando la siguiente ecuación, en la cual el factor de emisión es la emisión medida en g/km:

$$E_{HOT} = N_j * M_j * e_{HOT} \quad (1.3)$$

E_{HOT} = Emisiones producidas por vehículos livianos en 1 año (g)

N_j = Número de vehículos en circulación por año

M_j = Kilometraje por vehíxulo conducido ($\frac{km}{vh}$)

e_{HOT} = Factor de emisión de la flota promedio en ($\frac{g}{km}$)

La otra parte de la ecuación se refiere a las emisiones de inicio en frio, estas ocurren antes de que se alcance la temperatura de operación normal o de diseño. Durante esta fase las emisiones son más altas y dependen en gran medida de las condiciones ambientales. A medida que el motor del vehículo comienza a calentarse, la sobrecarga del arranque en frio comienza a tender a cero y se producen emisiones en caliente; por ello, se visualiza que las emisiones de arranque en frio tienden a aumentar a medida que se reduce la temperatura. La siguiente ecuación sirve para poder calcular las emisiones excesivas del inicio en frio; esta es la fracción de la actividad total realizada antes de que se alcance la temperatura optima de operación.

$$E_{COLD} = \beta * NM * e_{HOT} * \left(\frac{e^{COLD}}{e^{HOT}} - 1 \right) \quad (1.4)$$

$N_j =$ Número de vehículos en circulación por año

$M_j =$ Kilometraje por vehículo conducido (km)

$\frac{e^{cold}}{e^{hot}} =$ relación frío – caliente de las emisiones contaminantes relevantes

$\beta =$ Fracción de kilometraje impulsado en frío por debajo de la T promedio

Se conoce como una fuente de emisiones al combustible, el cual se evapora a través de las pérdidas producidas en su sistema. Los motores de combustión por chispa sufren de estas pérdidas producidas por la elevada cantidad de vapores. Las emisiones en caliente ocurren cuando el motor del vehículo se enciende y con esto el calor acumulado calienta las líneas de combustible, por las cuales ya no fluye el fluido. Estas se pueden dividir en 2 tipos, las cuales son conocidas como “hot soak” producidas cuando el motor está apagado y produce un incremento de temperatura del fluido de refrigeración del motor, el cual puede estar por encima de los 70 °C; mientras que la “warm soak” se produce cuando se encuentra inferior a los 70 °C. Por otro lado, las emisiones evaporativas suelen ocurrir cuando el vehículo está en funcionamiento, agregando a esto la variación de la temperatura, la cual varía si está sobre los 70 °C o inferior a esta, o cuando el vehículo se encuentra estacionado.

En el caso del programa COPERT, la evaporación es originada por 3 fases de operación, la pérdida de combustible mayormente ocurre diurnamente, cuando la temperatura varía durante el día ($E_{diurnal}$), luego cuando el combustible caliente es contenido en el reservorio (E_{soak}) y cuando el combustible tibio regresa al reservorio ($E_{running}$).

$$E_{EVAP} = E_{DIURNAL} + E_{SOAK} + E_{RUNNING} \quad (1.5)$$

Para el presente trabajo, en el cual se utilizarán tramos de rutas largas, condiciones de tráfico y a velocidad constante, se procederá a calcular las emisiones a la condición de motor en caliente.

El cálculo de los factores de emisión es el centro de la metodología de COPERT. Estos describen el rendimiento de las emisiones del vehículo y dependen de la operación de este, las condiciones ambientales, el entorno, etc. El cálculo del nivel de emisiones instantáneas para todos los vehículos de una ciudad o país y la integración de estos en el cálculo de un inventario anual no es

factible en ninguna aplicación práctica. Por ello, COPERT está construido entorno al acercamiento de la velocidad promedio; es decir, los factores de emisión son expresados a través de funciones de velocidad media de desplazamiento, durante el ciclo de conducción completo. Para el cálculo de los factores de emisión, se utiliza un muestreo de vehículos a lo largo de distintos perfiles de velocidad bien definidos, los cuales se miden sobre un dinamómetro de chasis (Ntziachristos, 2016). Se conoce que los niveles medios de cada vehículo, medidos en g/km, se vinculan a la velocidad media de conducción en cada ciclo, y al producirse en un gran número de automóviles, las emisiones representativas de la flota logran una posible reproducción de resultados en función a la velocidad media.

1.6.1. Estudio de recorrido

Para realizar las estimaciones de los factores contaminantes, en el estudio del modelo COPERT, se requiere la cantidad de vehículos que transitan en Lima Metropolitana a velocidades medias. Para el proceso se utilizará los datos del año 2016, debido a que se posee información confiable del Ministerio de Ambiente.

Los factores de emisión obtenidos del programa COPERT se encuentran en ton/año. Por esta razón, se realizará la transformación a g/km y se presentará los resultados para los factores de emisión del CO₂, CO y NO_x.

1.7. Software de procesamiento COPERT

La metodología de COPERT ha sido integrada en la aplicación de un software, que se ejecuta en Microsoft Windows. Adicionalmente se requiere de Framework v1.1 y HTML. Los reportes son creados automáticamente por la aplicación usando el “Crystal Reports for Visual Studio”. Las fuentes de código están divididas en 2 secciones, de las cuales la primera sección incluye maneras de usar la interfaz, mientras que la segunda sección contiene los códigos de programación. Estos implementan todos los cálculos requeridos en la metodología de COPERT. Los datos necesarios, como los de entrada, los parámetros de cálculo, los factores de cálculo intermedio y los resultados finales están dentro de una librería de documentos de Microsoft Access.

La interfaz del COPERT sigue los enfoques de las aplicaciones estándares de Windows, debido a la familiaridad que poseen los usuarios con estos programas. COPERT puede ser usado en distintas aplicaciones. Una de estas se encuentra en la ayuda que brinda a los expertos en la

compilación de los inventarios. Dado que la metodología de COPERT es basada en los reportes y experimentos detallados, puede ser utilizado por científicos y estudios posteriores; es decir, estudios sobre cálculo de emisiones para flotas específicas y áreas pequeñas de los países, como el modelado de la calidad de aire. Además, los usuarios pueden simular escenarios similares basados en datos compilados, para investigar los efectos de nuevas políticas o la introducción de nuevas tecnologías de emisiones.

1.7.1. Creación del proyecto a realizar

Este paso es importante, debido a que se selecciona el continente en el que se va a realizar los cálculos. Cabe resaltar que cada continente posee diferente data, debido a sus normativas; por ejemplo, Perú actualmente se encuentra en Euro 4, mientras que Europa ya está trabajando con Euro 6. Posteriormente, se selecciona el país a estudiar y se selecciona el modo tier 3 norma americana equivalente a Euro 4, ver figura 1.7 para mayor detalle.

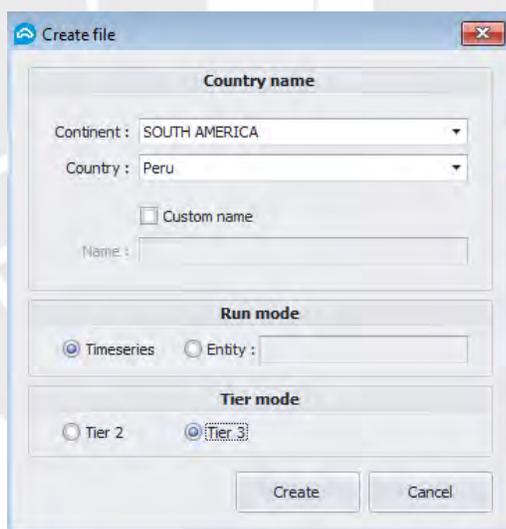


Figura 1.7 - Módulo de creación del proyecto en el programa COPERT.

1.7.2. Año de flota vehicular

En este paso se selecciona el año en el que se calculará los valores de emisiones. COPERT puede procesar datos de hasta 30 años. Gracias a esto, se puede realizar cálculos a futuro y estimar como será su desarrollo de estos. En nuestro ejemplo se utilizará el año 2016, debido a que se posee

datos concretos de la cantidad de vehículos livianos que transitan en Lima Metropolitana. Ver figura 8 para mayor detalle.

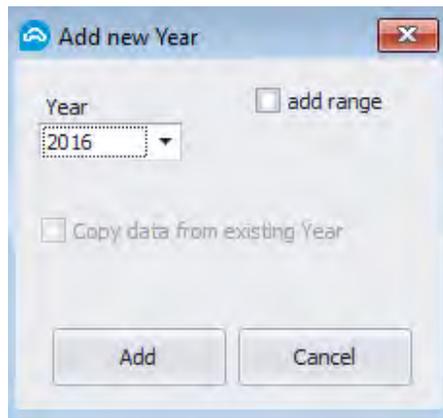


Figura 1.8 - Módulo de selección de año en el programa COPERT.

1.7.3. Información ambiental

Este paso es importante, debido a que la cantidad de emisiones varía acorde a la temperatura ambiental, por ejemplo, se puede incrementar las emisiones en frío si la temperatura ambiental es muy baja, lo que lleve a que dificulte el encendido, produciendo emisiones no deseadas. Por ello, acorde a la figura 1.9, hay que ingresar los valores mínimos y máximos de las temperaturas del año de estudio, se utilizará humedad relativa promedio mensual de 82.8%.

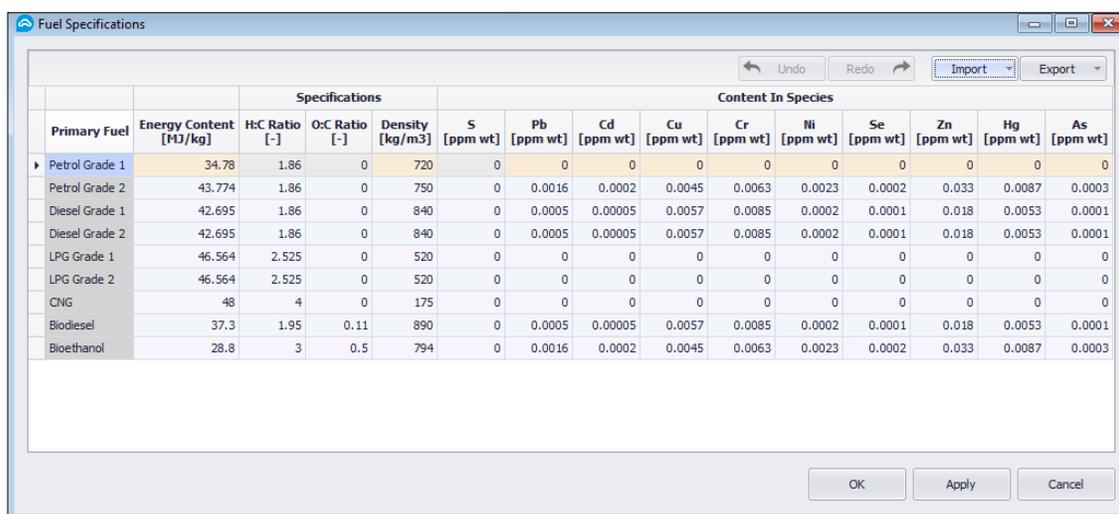
Month	Min Temperature [°C]	Max Temperature [°C]	Humidity [%]
January	20	26	82.8%
February	20	27	82.8%
March	20	26	82.8%
April	18	24	82.8%
May	17	22	82.8%
June	16	20	82.8%
July	16	19	82.8%
August	15	19	82.8%
September	15	20	82.8%
October	16	21	82.8%
November	17	22	82.8%
December	19	24	82.8%

Figura 1.9 - Características ambientales del desarrollo COPERT.

1.7.4. Especificaciones de las constantes para combustibles

Se utilizó la densidad de 720 kg/m³, energía de 34.78 MJ/kg y según el decreto supremo N°025-2017-EM se permite un máximo de 50 ppm de azufre en la mezcla. Para los demás metales no se asignó un valor, ya que no se tiene información exacta de la composición.

COPERT posee funciones para utilizar parámetros, los cuales pueden proporcionar los efectos de los lubricantes en las emisiones, las opciones de los vehículos, tales como las mezclas entre combustibles o biocombustible, el uso de aire acondicionado, entre otros, ver figura 1.10.



Primary Fuel	Specifications				Content In Species									
	Energy Content [MJ/kg]	H:C Ratio [-]	O:C Ratio [-]	Density [kg/m ³]	S [ppm wt]	Pb [ppm wt]	Cd [ppm wt]	Cu [ppm wt]	Cr [ppm wt]	Ni [ppm wt]	Se [ppm wt]	Zn [ppm wt]	Hg [ppm wt]	As [ppm wt]
Petrol Grade 1	34.78	1.86	0	720	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Petrol Grade 2	43.774	1.86	0	750	0	0.0016	0.0002	0.0045	0.0063	0.0023	0.0002	0.033	0.0087	0.0003
Diesel Grade 1	42.695	1.86	0	840	0	0.0005	0.00005	0.0057	0.0085	0.0002	0.0001	0.018	0.0053	0.0001
Diesel Grade 2	42.695	1.86	0	840	0	0.0005	0.00005	0.0057	0.0085	0.0002	0.0001	0.018	0.0053	0.0001
LPG Grade 1	46.564	2.525	0	520	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LPG Grade 2	46.564	2.525	0	520	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CNG	48	4	0	175	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biodiesel	37.3	1.95	0.11	890	0	0.0005	0.00005	0.0057	0.0085	0.0002	0.0001	0.018	0.0053	0.0001
Bioethanol	28.8	3	0.5	794	0	0.0016	0.0002	0.0045	0.0063	0.0023	0.0002	0.033	0.0087	0.0003

Figura 1.10 - Módulo de especificaciones de los combustibles en programa COPERT.

1.7.5. Configuración de categorías

En esta ventana se selecciona el tipo de automóvil o flota que se va a utilizar, dependiendo del tipo de vehículo o del estándar en el que se encuentra, sea EURO 1, 2 hasta incluso 6; asimismo, el combustible que se va a utilizar gasolina o Diesel. Se recomienda cotejar la data de modelos de vehículos de la ciudad para agregarlo como dato de entrada en COPERT. Para este estudio se utilizará Euro 4 para *passengers cars small* a petróleo, lo cual se visualiza en la figura 1.11.

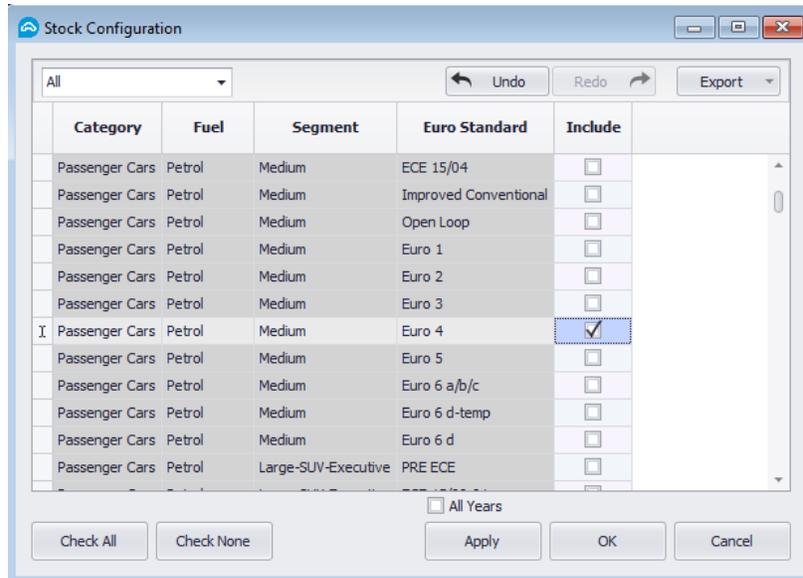


Figura 1.11 - Configuración de categorías del programa COPERT.

Posteriormente, se procede a seleccionar el stock de los automóviles, se considerará el total de vehículos livianos a 4 cilindros que transitan en Lima, sean estos pick ups, sedans, camionetas, entre otros; se coloca la cantidad de kilometraje que va a recorrer. Para nuestro estudio se realizará un total de 100-110 total de kilómetros recorridos por vehículos cada año, este valor es solo para el desarrollo del programa. Para el estudio se utilizará el promedio de los vehículos livianos presentados en la tabla superior de flujos de vehículos livianos en Lima, siendo un valor promedio de 1180269, acorde a SINIA un vehículo en Perú recorre 22381 km. Ver figura 1.12.

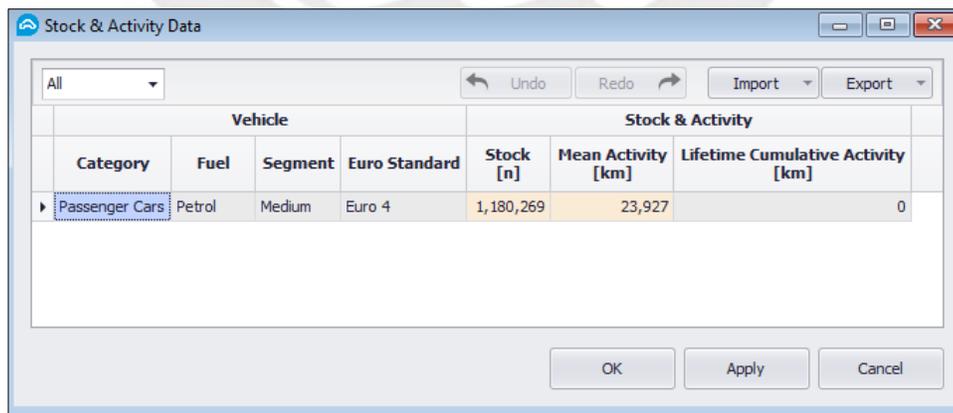
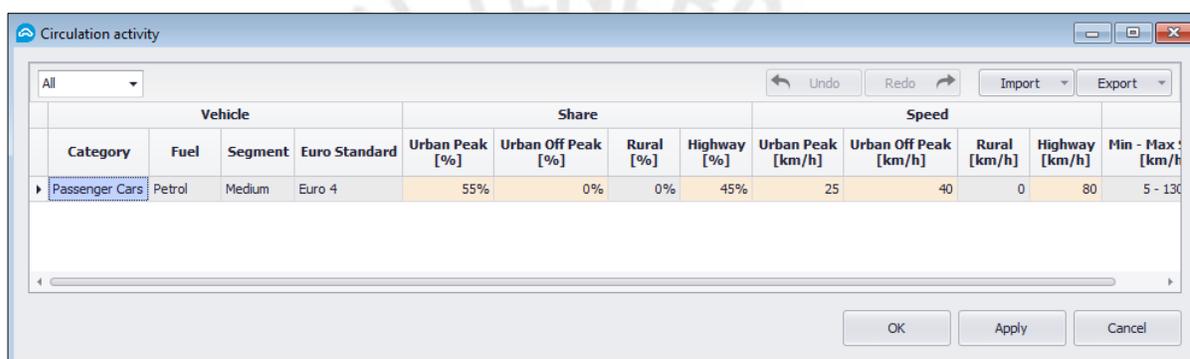


Figura 1.12 - Configuración de actividad y cantidad de datos en COERT.

1.7.6. Datos de circulación

Debido a que los resultados de las emisiones son en frío, caliente y por evaporación, este paso permite colocar el porcentaje de diferentes tipos de rutas, tales como urbanos, rurales, viaductos a velocidad. Se conoce que las emisiones contaminantes son menores cuando las velocidades rondan entre los 60-90 km/h, y esto se produce en viaductos o vías rápidas de recorrido. En vías urbanas o rurales, las velocidades no superan los 60 km/h, lo que genera un aumento de las emisiones contaminantes; por ello, al tratarse de un modelo que utiliza datos globales en alta cantidad, se utilizará un porcentaje de 45% a velocidades elevadas (highway) y 55% a velocidades urbanas de forma aproximada con finalidades de comparación, ver figura 1.13.

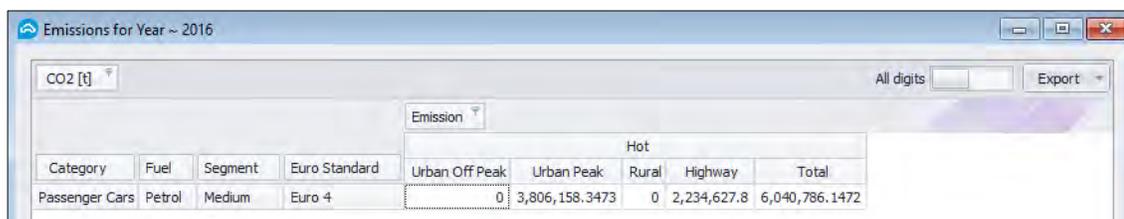


Vehicle				Share				Speed				
Category	Fuel	Segment	Euro Standard	Urban Peak [%]	Urban Off Peak [%]	Rural [%]	Highway [%]	Urban Peak [km/h]	Urban Off Peak [km/h]	Rural [km/h]	Highway [km/h]	Min - Max [km/h]
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 4	55%	0%	0%	45%	25	40	0	80	5 - 130

Figura 1.13 - datos de circulación de COPERT.

1.7.7. Resultados de emisiones contaminantes

En este proceso se visualiza los resultados obtenidos de la modelación del programa; sin embargo, cabe resaltar, que estos valores son para el total de vehículos livianos que transitan en Lima Metropolitana, por lo que es necesario realizar cálculos posteriores para desarrollar y obtener los resultados para un vehículo, acorde a SINIA, un vehículo en promedio en Perú recorre 22381 km. Ver figura 1.14.



Category	Fuel	Segment	Euro Standard	Hot				
				Urban Off Peak	Urban Peak	Rural	Highway	Total
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 4	0	3,806,158.3473	0	2,234,627.8	6,040,786.1472

Figura 1.14 - Resultados de emisiones en caliente COPERT.

1.7.8. Procedimiento de cálculo g/km utilizando el modelo COPERT

Para el cálculo de las emisiones en g/km, se realizará el cálculo como si un vehículo recorriera solo 100 km en un año, con la finalidad de aproximar los resultados a los experimentales.

The screenshot shows the 'Emissions for Year ~ 2016' window with 'CO2 [t]' selected. The vehicle parameters are: Passenger Cars, Petrol, Medium, Euro 4. The emission table is as follows:

Category	Fuel	Segment	Euro Standard	Hot					Cold	
				Urban Off Peak	Urban Peak	Rural	Highway	Total	Urban Off Peak	Urban Peak
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 4	0	3,404,397.1884	0	1,998,750.4211	5,403,147.6095	0	422,534.4701

Figura 1.15 - Factor de emisión de CO₂ (ton/año) COPERT.

The screenshot shows the 'Emissions for Year ~ 2016' window with 'CO [t]' selected. The vehicle parameters are: Passenger Cars, Petrol, Medium, Euro 4. The emission table is as follows:

Category	Fuel	Segment	Euro Standard	Hot					Cold				
				Urban Off Peak	Urban Peak	Rural	Highway	Total	Urban Off Peak	Urban Peak	Rural	Highway	
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 4	0	2,456.9968	0	4,063.9809	6,520.9777	0	4,742.8511	0		

Figura 1.16 - Factor de emisión de CO (ton/año) COPERT.

The screenshot shows the 'Emissions for Year ~ 2016' window with 'NOx [t]' selected. The vehicle parameters are: Passenger Cars, Petrol, Medium, Euro 4. The emission table is as follows:

Category	Fuel	Segment	Euro Standard	Hot					Cold				
				Urban Off Peak	Urban Peak	Rural	Highway	Total	Urban Off Peak	Urban Peak	Rural	Highway	
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 4	0	1,042.5532	0	303.5376	1,346.0909	0	404.596	0		

Figura 1.17 - Factor de emisión de NOx (ton/año) COPERT.

Los resultados obtenidos están en las unidades de ton/año; a continuación, se presentará el cálculo para obtener las emisiones g/km para 1 vehículo del modelo Copert.

$$D_{rr} = 22381 \frac{km}{año} \quad (1.6)$$

$$E_{CO2} = 5403147 \frac{ton}{año} \quad (1.7)$$

$$E_{iCO2} = \frac{E_{CO2}}{D_{rr}} \quad (1.8)$$

$$E_{CO_2} = \frac{5403147 \text{ ton}}{22381 \text{ km}} \rightarrow 225846282 \frac{\text{g}}{\text{km}} \quad (1.9)$$

Cabe resaltar que este es el obtenido por el total de vehículos livianos en Lima del año 2016, por lo que se debe dividir entre el valor promedio de estos 1180219 con esto se obtiene el valor de las emisiones de CO₂ en g/km para 1 vehículo.

$$E_{CO_2} = \frac{5403147 \text{ ton}}{22381 \text{ km}} \rightarrow 225846282 \frac{\text{g}}{\text{km}} * \frac{1}{1180269} \rightarrow 214 \frac{\text{g}}{\text{km}} \quad (1.10)$$

Factores de emisión g/km de CO₂, NO_x y CO para 1 vehículo en general utilizando el programa COPERT.

$$E_{CO_2} = 214.12 \frac{\text{g}}{\text{km}} \quad (1.11)$$

$$E_{NO_x} = 0.05 \frac{\text{g}}{\text{km}} \quad (1.12)$$

$$E_{CO} = 0.29 \frac{\text{g}}{\text{km}} \quad (1.13)$$

2. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

Para obtener los resultados se realizó distintas rutas aleatorias, en trayectos urbanos, céntricos y transitados. El puerto OBDLINK MX+ permite recolectar la información registrada por el módulo de control electrónico del vehículo. Variables como rpm, temperatura, presiones de los fluidos del motor y datos de velocidad del vehículo, entre muchas otras variables. Para obtener la posición del vehículo se utilizó un GPS.



Figura 2.1 - OBDLINK MX+.

Tabla 2.1 - Características del OBDLINK MX+.

Parámetros	Valor	Unidad
Alimentación	12	V
Salidas	-	V
Corriente	62	mA
Temperatura	-20 / 55	°C

2.1. Circuito de pruebas en Lima

En este estudio, se realizará 4 mediciones por vehículos a estudiar, a través de diferentes rutas céntricas de Lima Metropolitana. En el presente documento se utilizará una flota de cinco automóviles livianos de cuatro cilindros, los cuales cuenten con las características necesarias para obtener correctas mediciones y sean compatible con el sistema OBDLINK MX. A continuación, en la figura 2.2 se presentan los recorridos de cada vehículo. Para la presentación de las figuras, se utilizará las siguientes nomenclaturas: TYR1/R2/R3/R4, HAR1/R2/R3/R4, HER1/R2/R3/R4, TRVR1/R2/R3/R4 y VGR1/R2/R3/R4. Para la obtención de los datos, se realizó los recorridos en base a los mismos tiempos por vehículo, lo cual se menciona a continuación:

- Tiempo aproximado de recorridos de Hyundai Accent (HAR1/HAR2/HAR3/HAR4): 7200s
- Tiempo aproximado de recorridos de Hyundai Elantra (HER1/HER2/HER3/HER4): 4100s
- Tiempo aproximado de recorrido de Toyota Rav4 (TRVR1/TRVR2/TRVR3/TRVR4): 3100s
- Tiempo aproximado de recorrido de Toyota Yaris (TYR1/TYR2/TYR3/TYR4): 6000s
- Tiempo aproximado de recorrido de Volkswagen Gol (VGR1/VGR2/VGR3/VGR4): 2900s

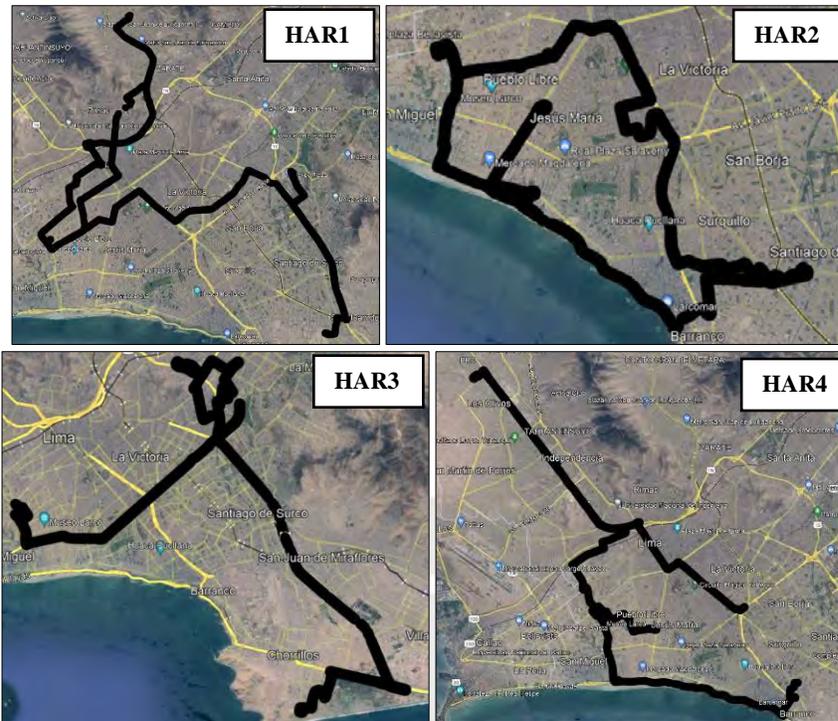


Figura 2.2 – Recorridos HAR1/HAR2/HAR3/HAR4 del modelo Hyundai Accent.

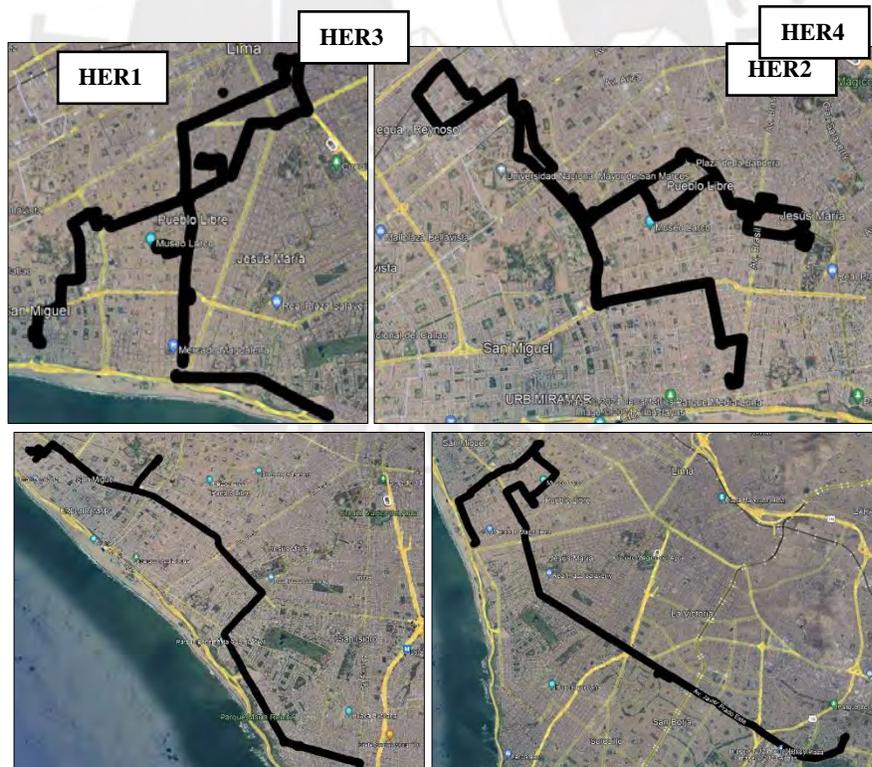


Figura 2.3 – Recorridos HER1/HER2/HER3/HER4 del modelo Hyundai Elantra

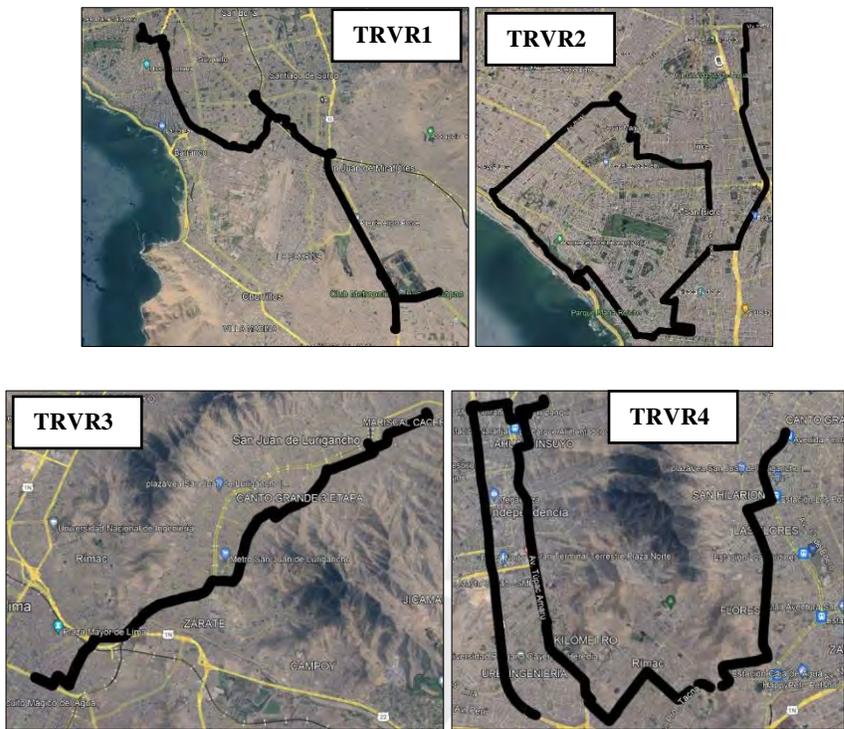


Figura 2.4 – Recorridos TRVR1/TRVR2/TRVR3/TRVR4 del modelo Toyota Rav4.

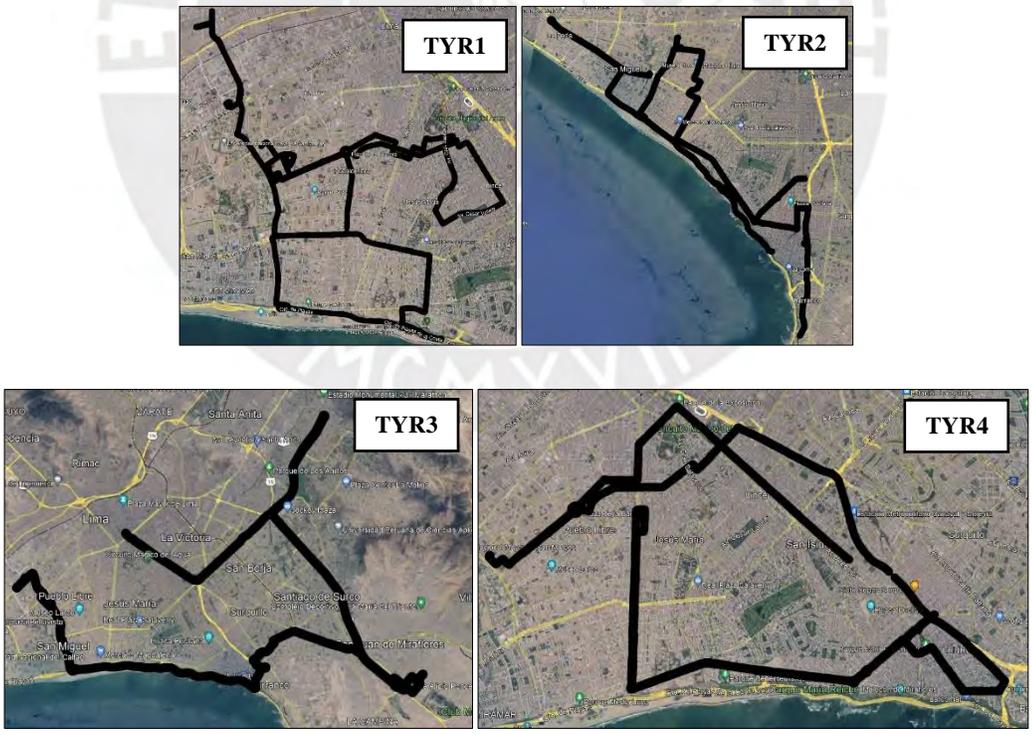


Figura 2.5– Recorridos TYR1/TYR2/TYR3/TYR4 del modelo Toyota Yaris.

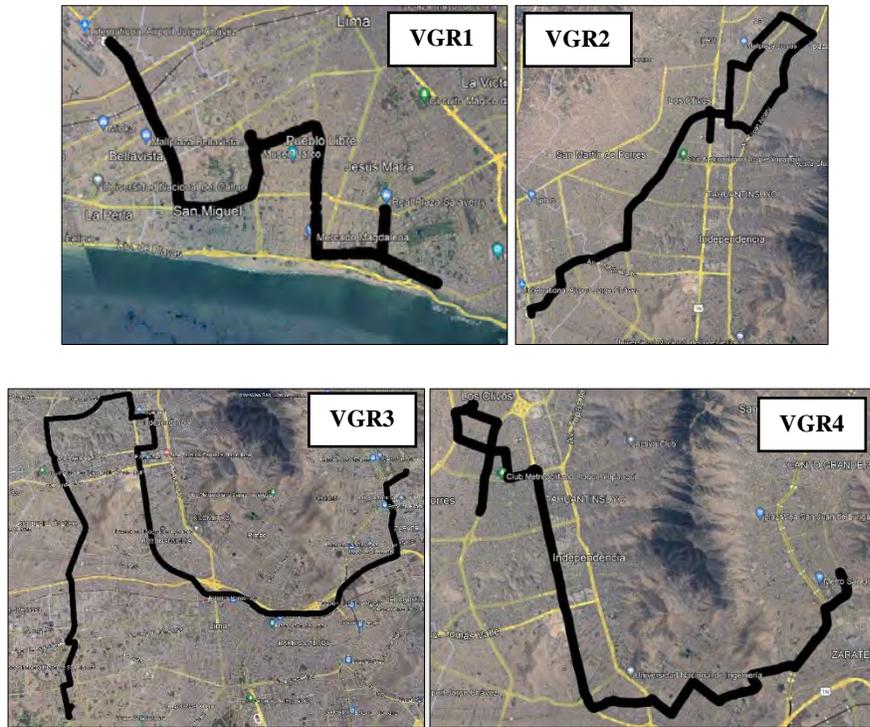


Figura 2.6– Recorridos VGR1/VGR2/VGR3/VGR4 del modelo Volkswagen Gol.

2.2. Instrumentación para medición

En este acápite, se comentará sobre el sistema a utilizar para obtener la data requerida para la experimentación. Se explicará a detalle cada componente del sistema, y su debido funcionamiento que estos poseen para desarrollar una óptima toma de datos. Ver figura 2.7.



Figura 2.7 - Instrumentación para mediciones a bordo de los factores contaminantes y datos del vehículo.

2.2.1. Analizador de gases

Para lograr obtener la data de los contaminantes en tiempo real, se utilizó un analizador de gases portátil, el cual muestra distintos resultados de hasta 5 tipos de gases principales a la hora de obtener los datos de los factores, tales como: los Hidrocarburos (HC), Monóxidos de carbono (CO), Oxígeno (O₂), Dióxido de carbono (CO₂) y Óxidos de Nitrógeno (NO_x). El analizador de gases mide la concentración de estos, además de la relación aire-combustible y el factor Lambda. Para las concentraciones de NO_x se cuantifican mediante celdas electroquímicas, mientras que un infrarrojo no dispersivo para CO, CO₂ y HC. Por otro lado, posee la función de poder medir los gases en 2 tubos de escape; logra realizar un promedio de lecturas al momento de tomar datos y advierte de posibles fugas en el sistema de escape. El dispositivo permite conectarse al puerto USB de una computadora portátil para visualizar el registro de datos instantáneos. En el presente estudio se conectó a la plataforma Arduino mediante un conector de ocho pines. Para mayor detalle ver figura 2.8.



Figura 2.8 - Analizador de gases.

Tabla 2.2 - Características del analizador de gases (Infraned, 2015)

Parámetros	Valor	Unidad
Alimentación	10-16	V
Salidas	0-10	V
HC	0-9999	ppm
CO	0-10	%
CO ₂	0-20	%
O ₂	0-25	%
NO _x	0-5000	ppm
Factor lambda	0-5	-
AFR	0-50	-

2.2.2. Sistema de adquisición de datos

Para el estudio se implementó e instrumento un sistema de adquisición de datos, a través de una plataforma de hardware basada en lenguaje de programación con entradas y salidas a la placa. Se utilizó la plataforma Arduino de la marca Genuino modelo Mega 2560.

En la plataforma utilizada para la experimentación, se instrumentó equipos de medición de datos, tales como el analizador de gases de escape, sensor de parámetros ambientales, el cual mide humedad y temperatura, sistema de posicionamiento global (GPS) y el acelerómetro.

Así como se obtiene la data cada 5 segundos del analizador de gases, se necesita almacenar la data en un receptor; por ello, se utilizará un Arduino para recopilar la información obtenida de los gases contaminantes, así como la posición de tiempo real y los distintos parámetros ambientales del entorno; el modelo a utilizar será Mega 2560. Ver figura 2.9.

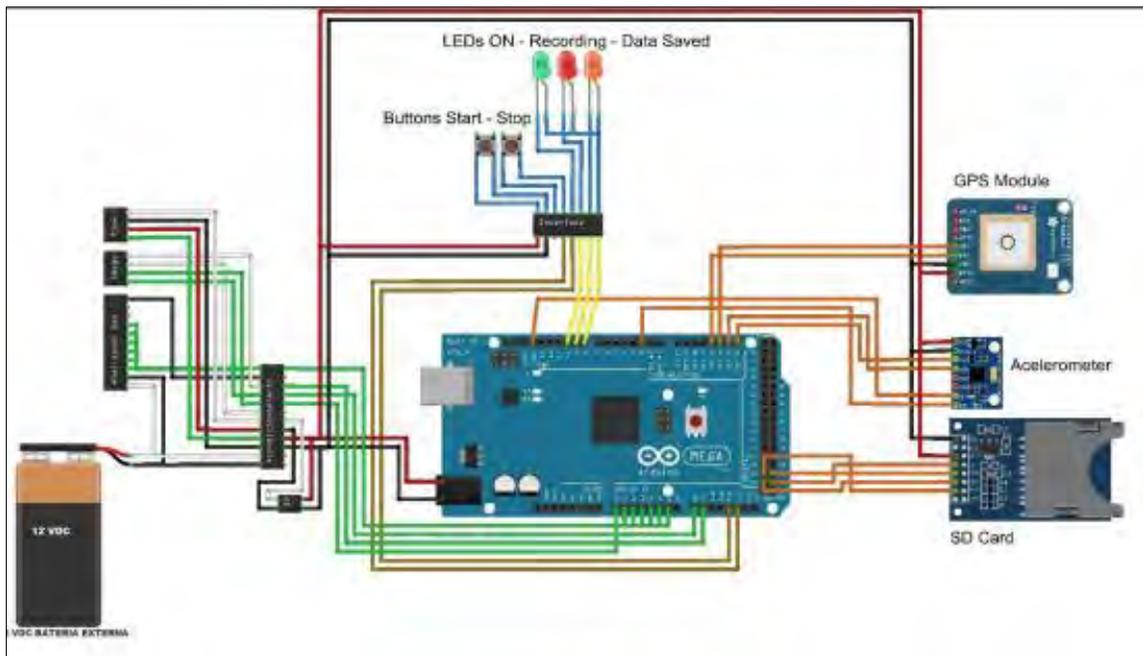


Figura 2.9 - Sistema de adquisición de datos (LABEN PUCP, 2016)

La figura 2.10 presenta el Arduino a utilizar para la experimentación y sus características del sistema de adquisición de datos se presentan a continuación:

- **Alimentación:** Consta de una fuente de alimentación con batería externa de 12 V, mediante la conexión de cables negro y rojo (cocodrilo). No obstante, se utiliza batería externa de 12 V para mantener operativo el analizador de gases.
- **Cables:** En el experimento se utilizaron cables para poder conectar entre los dispositivos. Uno de estos es el cable de unión entre el analizador de gases y el sensor omega, este tiene una longitud de dos metros. El cable del sensor de flujo consta de 3 metros de longitud. Los demás cables tienen longitudes pequeñas, ya que estos se encuentran cerca al sistema Arduino.
- **Funcionamiento e interfaz:** El sistema utilizado presenta 2 botones de operación en la carcasa, los cuales sirvan para iniciar la grabación y la parada de esta. Una vez energizado

el sistema, a una batería externa, este se inicia de manera automática, cabe resaltar que se necesita ingresar la tarjeta SD para poder procesar los datos y grabarlos. Tres focos LEDs de color azul, verde y rojo están implementados en el sistema, cada uno cumple una función específica en las mediciones. El LED de color azul indica que el SAD está energizado, el de color rojo indica que el sistema está grabando datos eficientemente y el verde indica los datos guardados de manera correcta, por lo cual se puede retirar la tarjeta SD.

El botón de parada sirve para culminar la grabación y guardar los datos ya medidos en el recorrido; el SAD está programado para guardar de manera automática los datos medidos cada cinco minutos, cabe resaltar que este sistema puede grabar los datos por un tiempo total de 24 horas.

- **Puertos:** Para la conexión del sistema se utilizan diferentes puertos. Puerto USB, puerto SD card, cable de datos del analizador de gases, batería de 12 V, alimentación cigarrera del auto y cable de datos del sensor.
- **Toma de datos:** La toma de datos del sistema consta de trece datos de los equipos de medición, siete del analizador de gases, dos del sensor omega, tres del flujo del GPS y uno del flujo de aire. Para el estudio, ya que no se graba el tiempo, se utilizó el sistema OBDLINK MX+ el cual inicia la grabación el mismo instante que el analizador de gases.

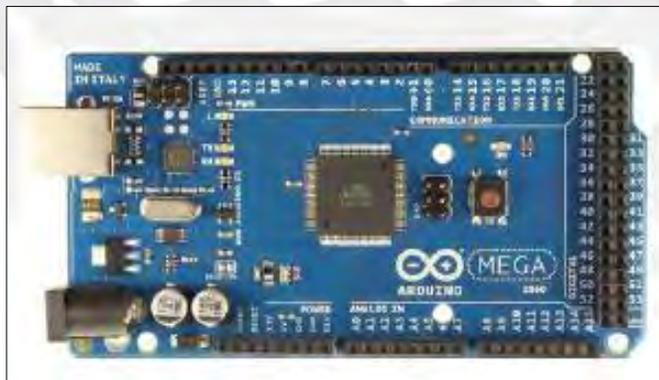


Figura 2.10 - Arduino a utilizar para el circuito electrónico – Genuino Mega 2560

2.2.3. Sensor de humedad y temperatura

Para obtener las mediciones en condiciones ambientales se utilizará el sensor de humedad y temperatura de la marca Omega HX94, Este sensor brinda alta sensibilidad, respuesta instantánea y estabilidad de datos tomados. Ver figura 2.11.



Figura 2.11 - sensor de humedad y temperatura.

Tabla 2.3 - características del sensor Omega (Omega,2015).

Parámetros	Valor	Unidad
Alimentación	6-30	V
Salidas	4-20	V
Temperatura	0-100	°C
Humedad	0-100	%

2.2.4. Sistema GPS

Por otro lado, se necesita obtener la información sobre la distancia recorrida por los vehículos y las velocidades respectivas en los tramos de estudio; por ello, se utiliza un GPS compatible con el Arduino (modelo GPS Grove). Ver figura 2.12



Figura 2.12 - Sistema GPS.

Tabla 2.4 - características del Sistema GPS.

Parámetros	Valor	Unidad
Alimentación	3.5-5	V
Salidas		V
Velocidad	-	m/s

2.2.5. Vehículos de prueba y procedimiento para adquisición de datos.

Debido a la disponibilidad de la obtención de vehículos, se utilizaron vehículos propios, y de personas cercanas; se utilizó vehículos que permitan la conexión entre el OBDLINK MX y estos. EL procedimiento utilizado para la correcta adquisición de datos este compuesto por los siguientes pasos: Se debe realizar una correcta conexión del cable alimentador del analizador de gases con el vehículo, realizar el correcto bombeo del analizador de gases. Posterior a esto se debe realizar la conexión del analizador de gases con el módulo de adquisición de datos, esto con la finalidad de poder grabar las concentraciones. El sensor de temperatura debe ir conectado con el módulo de adquisición de datos, para medir la humedad en los recorridos. Se debe realizar una limpieza de la sonda que va en el tubo de escape cada 45 minutos.

El procedimiento a realizar depende de cada vehículo, debido a la posición de los instrumentos, los cuales deben encontrarse en una posición adecuada para no sufrir daños.

2.3. Flota de vehículos

En la siguiente Tabla 2.5 se presentarán los datos técnicos del modelo Hyundai Accent 2012.

Tabla 2.5 – Datos técnicos del HYUNDAI ACCENT 2012.

Modelo	HYUNDAI ACCENT 2012
Carrocería	Sedan
Periodo de producción	2012
Motor	1599 cm ³
Potencia	112 cv en 4500 RPM
Caja de cambios	Automática
Velocidad máxima	176 km/h
Consumo de combustible	14.3 km/l
Capacidad de tanque de combustible	45 litros
Dimensión del vehículo (Largo x ancho x alto)	4.3m, 1.7m, 1.4m
Par Máximo	146 Nm en 4500 RPM
Aceleración 0-100 km/h	12 s

La siguiente Tabla 2.6 presenta los datos técnicos del vehículo Hyundai Elantra 2012.

Tabla 2.6 - Datos técnicos del HYUNDAI ELANTRA 2012.

Modelo	Hyundai Elantra
Carrocería	Sedan
Periodo de producción	2013
Motor	1797 cc
Potencia	150 cv en 6500 RPM
Caja de cambios	Manual
Velocidad máxima	200 km/h
Consumo de combustible	19.2 km/l
Capacidad de tanque de combustible	48 litros
Dimensión del vehículo (Largo x ancho x alto)	4.5m, 1.8m, 1.6m
Par Máximo	157 Nm
Aceleración 0-100 km/h	10.7 s

La siguiente Tabla 2.7 presenta los datos técnicos del vehículo Volkswagen GOL del 2021

Tabla 2.7 - Datos técnicos VOLKSWAGEN GOL.

Modelo	VOLKSWAGEN GOL
Carrocería	Sedan
Periodo de producción	2021
Motor	1598 cc
Potencia	110 cv en 5750 RPM
Caja de cambios	Automático
Velocidad máxima	175 km/h
Consumo de combustible	7.9 km/l
Capacidad de tanque de combustible	55 litros
Dimensión del vehículo (Largo x ancho x alto)	4.3m, 17m, 15m
Par Máximo	143 Nm
Aceleración 0-100 km/h	18.5s

La siguiente Tabla 2.8 presenta los datos técnicos del Toyota Yaris del año 2008.

Tabla 2.8 - Datos técnicos del TOYOTA YARIS.

Modelo	TOYOTA YARIS
Carrocería	Sedan
Periodo de producción	2008
Motor	1296 cc
Potencia	87 CV en 6000 RPM
Caja de cambios	Mecánico
Velocidad máxima	170 km/h
Consumo de combustible	13.9 km/l
Capacidad de tanque de combustible	42 litros
Dimensión del vehículo (Largo x ancho x alto)	3.8m, 1.7m, 1.5m
Par Máximo	121 Nm
Aceleración 0-100 km/h	11.5s

La siguiente Tabla 2.9 presenta los datos técnicos del vehículo Toyota Yaris del 2014.

Tabla 2.9 - Datos técnicos del TOYOTA RAV4.

Modelo	TOYOTA RAV4
Carrocería	SUV
Periodo de producción	2014
Motor	1998 cc
Potencia	124 CV en 2400 RPM
Caja de cambios	Mecánica
Velocidad máxima	180 km/h
Consumo de combustible	17.5 km/l
Capacidad de tanque de combustible	60 litros
Dimensión del vehículo (Largo x ancho x alto)	4.6m, 1.8m, 1.7m
Par Máximo	310 Nm
Aceleración 0-100 km/h	10.5s

2.4. Procedimiento de cálculo y expresiones

Como se explicó anteriormente, el analizador de gases mide las concentraciones volumétricas de los gases de escape de cada automóvil. Para la obtención de los consumos máxicos se utilizó el OBDLINK MX+, gracias a su interfaz y algoritmo permite obtener el consumo de combustible y con esto el consumo máxico de aire mediante la relación aire-combustible.

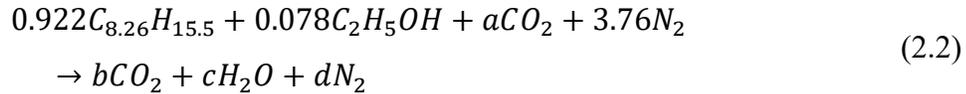
Para este estudio solo se trabaja con los gases de escape del CO, CO₂, NO_x y HC, en 5 vehículos livianos, utilizando 4 diferentes rutas para cada uno.

Balance de ecuación estequiométrica utilizando gasolina comercial y etanol 7.8

E 7.8:



Se trabajará las ecuaciones sin el Argón en el aire.



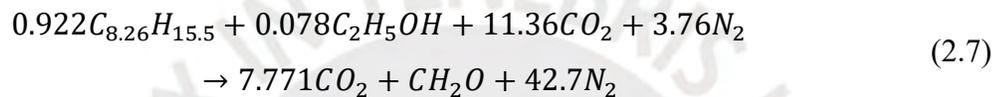
$$7.615 + 0.156 = b \rightarrow b = 7.771 \quad (2.3)$$

$$14.291 + 0.468 = 2c \rightarrow c = 7.3795 \quad (2.4)$$

$$0.078 + 2a = 2b + c \rightarrow a = 11.36 \quad (2.5)$$

$$3.76a * 2 = 2d \rightarrow d = 42.7 \quad (2.6)$$

Ecuación balanceada:



El medidor de gases logra obtener los datos del factor lambda y da la razón aire-combustible (AFR); sin embargo, el AFR no suele medirse de manera correcta, por lo que se utilizará para las ecuaciones el valor de 14.6, el cual es el dosado estequiométrico acorde a Payri (2011) para vehículos a gasolina.

$$m_i = m_{aire} * \left(1 + \frac{1}{\lambda * AFR}\right) * X_{mi} \quad (2.8)$$

Donde se conoce a las siguientes variables como:

m_i = Consumo másico del componente i – ésimo

m_{aire} = Consumo másico del aire $\left(\frac{g}{s}\right)$

AFR = Relación de aire y combustible

λ = Factor lambda

X_{mi} = Concentración de la masa molar del componente i – ésimo

Posterior a las ecuaciones presentadas, se necesita calcular la concentración másica de cada componente presente en las emisiones. Para ello, se utilizará la siguiente ecuación, utilizando la masa molar de cada componente:

$$X_{mi} = \frac{c_i * u_i}{\sum_{j=n}^{j=1} c_j * u_j} \quad (2.9)$$

donde se conoce a las siguientes variables como:

c_i = Concentración volumétrica del componente i – ésimo

u_j = Masa molar del componente i – ésimo $\left(\frac{g}{mol}\right)$

Se presentará la ecuación para el cálculo del denominador de la fórmula

$$\sum_{j=n}^{j=1} c_j * u_j = \mu_{CO} * c_{CO} + \mu_{HC} * c_{HC} + \mu_{CO2} * c_{CO2} + \mu_{O2} * c_{O2} + \mu_{NOX} * c_{NOX} + \mu_{N2} * c_{N2} + \mu_{Ar} * c_{Ar} * (1 - (c_{CO} + c_{HC} + c_{CO2} + c_{O2} + c_{NOX} + c_{N2} + c_{Ar})) \quad (2.10)$$

La Tabla presentará los datos de las masas molares de cada componente de las emisiones de escape.

Tabla 2.10 - Masa Molar de los componentes de emisiones de escape.

Componente Gaseoso	Masa Molar	Unidad
μ_{CO}	28.01	g/mol
μ_{CO2}	44.009	g/mol
μ_{O2}	31.999	g/mol
μ_{HC}	114.23	g/mol
μ_{NOX}	38.006	g/mol
μ_{N2}	28.013	g/mol
μ_{Ar}	39.948	g/mol

Cálculo de las emisiones contaminantes.

Para el cálculo se utilizó los valores medidos de la masa de aire instantánea en g/s, posterior a esto se obtiene la masa de combustible.

$$F_{ab} = \frac{m_f}{m_a} \quad (2.11)$$

$$F_{ab} = \frac{F_r}{F_e} \quad (2.12)$$

$$F_r = \frac{1}{\lambda} = \frac{F}{F_e} \quad (2.13)$$

Dosado estequiométrico para gasolina según Payri (2011)

$$F_e = \frac{1}{14.6} \quad (2.14)$$

Con las ecuaciones proporcionadas se procede al cálculo de la masa de aire promedio según el recorrido total de cada ruta y vehículo.

Flujo másico de aire promedio.

$$m_a = \frac{m_f}{F_{ab}} \quad (2.15)$$

Finalmente, se procede a calcular los factores de emisión en g/km, mediante el uso de la velocidad instantánea para cada uno en (km/h)

$$E_i = m_i \frac{3600}{V_{med}} \left(\frac{g}{km} \right) \quad (2.16)$$

donde

$$V_{med} = \text{Velocidad media instantánea en un tiempo } i - \text{ésimo} \left(\frac{km}{h} \right)$$

2.5. Ejemplo de cálculo

Para los futuros cálculos se utilizaron los datos obtenidos del vehículo modelo Toyota Yaris 2008.

a. Masa de aire instantánea.

$$m_a = 6.59 \frac{g}{s} \quad (2.17)$$

Flujo másico de combustible instantáneo.

$$mf = \frac{m_a}{14.6 * \lambda} \rightarrow 0.447 \frac{g}{s} \quad (2.18)$$

Posteriormente se utilizarán los siguientes datos obtenidos en un instante del recorrido del Toyota Yaris 2008, los cuales se presentarán en la siguiente tabla.

Tabla 2.11 - datos obtenidos de un momento i-ésimo del analizador de gases.

TOYOA YARIS 2008	
\dot{m}_a	6.59 g/s
\dot{m}_f	0.447 g/s
CO (%)	1.16
CO ₂ (%)	13.18
NO _x (PPM)	39.1
HC (PPM)	156.4
O ₂ (%)	0.24
N ₂ (%)	72.84
AR (%)	0.93

Se procederá a calcular la concentración másica del CO₂:

$$\sum_{j=n}^{j=1} c_j * u_j = \mu_{CO} * c_{CO} + \mu_{HC} * c_{HC} + \mu_{CO_2} * c_{CO_2} + \mu_{O_2} * c_{O_2} + \mu_{NOX} * c_{NOX} + \mu_{N_2} * c_{N_2} + \mu_{Ar} * c_{Ar} * (1 - (c_{CO} + c_{HC} + c_{CO_2} + c_{O_2} + c_{NOX} + c_{N_2} + c_{Ar})) \quad (2.19)$$

$$\sum_{j=n}^{j=1} c_j * u_j = 28.01 * 1.16 * 10^{-2} + 86.202 * 10^{-5} * 156.4 + 44.009 * 13.18 * 10^{-2} + 31.99 * 10^{-2} * 13.18 + 38.006 * 10^{-5} * 39.1 * (1 - (1.16 * 10^{-2} + 156.4 * 10^{-5} + 13.18 * 10^{-2} + 1.16 * 10^{-2} + 39.1 * 10^{-2} + 72.84 * 10^{-2} + 0.93 * 10^{-2})) \quad (2.20)$$

$$\sum_{j=n}^{j=1} c_j * u_j = 29.192 \text{ (Valor sumado de todos los componentes)} \quad (2.21)$$

$$X_{mi \text{ CO}_2} = \frac{c_i * u_i}{\sum_{j=n}^{j=1} c_j * u_j} \rightarrow 0.199 \quad (2.22)$$

Emisión del CO₂:

$$m_i = m_{aire} * \left(1 + \frac{1}{\lambda * AFR}\right) * X_{mi} \quad (2.23)$$

$$m_i = 6.59 * \left(1 + \frac{1}{0.95 * 14.6}\right) * 0.199 \rightarrow 0.66 \text{ g/s} \quad (2.24)$$

$$m_i = 0.66 \text{ g/s} \quad (2.25)$$

Cálculo del factor de emisión de CO₂:

$$V \text{ instantánea} = 33.8 \text{ km/hr} \quad (2.26)$$

$$E_{CO_2} = 0.66 \frac{3600}{33.8} \left(\frac{g}{km}\right) \rightarrow 70.34 \left(\frac{g}{km}\right) \quad (2.27)$$

Se procede a presentar los resultados de los otros factores de emisión instantáneos.

$$E_{CO} = 2.55367 \frac{3600}{18.2064} \left(\frac{g}{km}\right) \rightarrow 3.94 \left(\frac{g}{km}\right) \quad (2.28)$$

$$E_{NOX} \rightarrow 0.18 \left(\frac{g}{km}\right) \quad (2.29)$$

$$E_{HC} \rightarrow 1.64 \left(\frac{g}{km}\right) \quad (2.30)$$

$$E_{O_2} \rightarrow 0.93 \left(\frac{g}{km}\right) \quad (2.31)$$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo, se presentará los resultados obtenidos de las distintas pruebas realizadas en Lima Metropolitana, mediante cinco tipos de vehículos distintos, los cuales comparten las mismas características de 4 cilindros y livianos.

Por otro lado, el análisis está desarrollado en 4 distintos recorridos por cada vehículo, los cuales son variados, manteniéndose un tiempo aproximado por vehículo, esto debido a la disponibilidad de estos. Además, las mediciones se realizaron en diferentes rutas permitiendo manejar a diferentes velocidades.

Para la presentación de las tablas, se utilizará las siguientes nomenclaturas: TYR1/R2/R3/R4, HAR1/R2/R3/R4, HER1/R2/R3/R4, TRVR1/R2/R3/R4 y HER1/R2/R3/R4 esto con la finalidad de diferenciar los recorridos realizados por vehículo. Debido a temas de visibilidad, se presentarán dos recorridos por gráfico. Se presentará las variaciones de las velocidades, consumos de aire y combustible, factores de emisión de los cinco gases presentados: CO, CO₂, NO_x y HC.

Finalmente, se realizó el comparativo entre los factores de emisión del CO₂ obtenidos de manera experimental vs los obtenidos por el OBDLINK MX+.

3.1. Resultados de los circuitos en condiciones de tráfico

La figura 3.1 muestra la variación de las velocidades en condiciones de tráfico para el modelo Hyundai Elantra, mientras que la figura 3.2 para el modelo Hyundai Accent. Las gráficas se realizaron considerando la misma marca de vehículos y diferentes modelos. Como bien se puede apreciar en la figura de la izquierda, las velocidades oscilan entre los 0km/h (vehículo detenido), hasta casi los 60 km/h, cuando el vehículo alcanzó la máxima velocidad. Se puede apreciar que no existe diferencia significativa entre los recorridos HER1 y HER2. En el caso del recorrido HER3 y HER4 se aprecia una diferencia significativa al tener valores promedios de 18 hasta 35 lo cual posteriormente va a influenciar en las emisiones contaminantes.

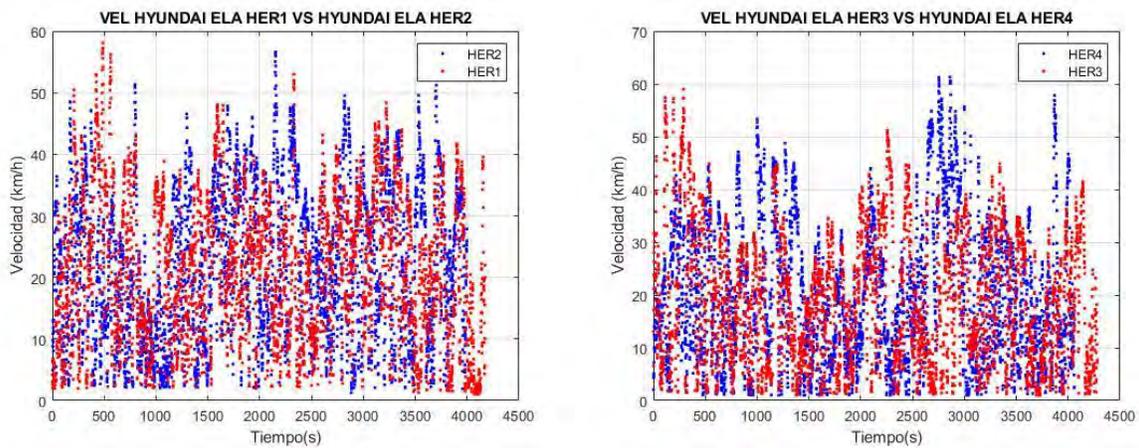


Figura 3.1 - Mediciones de velocidad en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Elantra,

El tiempo de los cuatro recorridos del modelo Accent oscila entre los 6000s. Se visualiza la figura 3.2 del recorrido HAR1 y HAR2 que no presentan variaciones significativas, la mayor cantidad de puntos se encuentran entre 5 a 40 km/h. El promedio del recorrido HAR1 es 23 km/h, mientras que el HAR2 es de 25 km/h. Para el recorrido HAR3 y HAR4, la mayor cantidad de puntos se encuentran entre 10 a 40 km/hr.

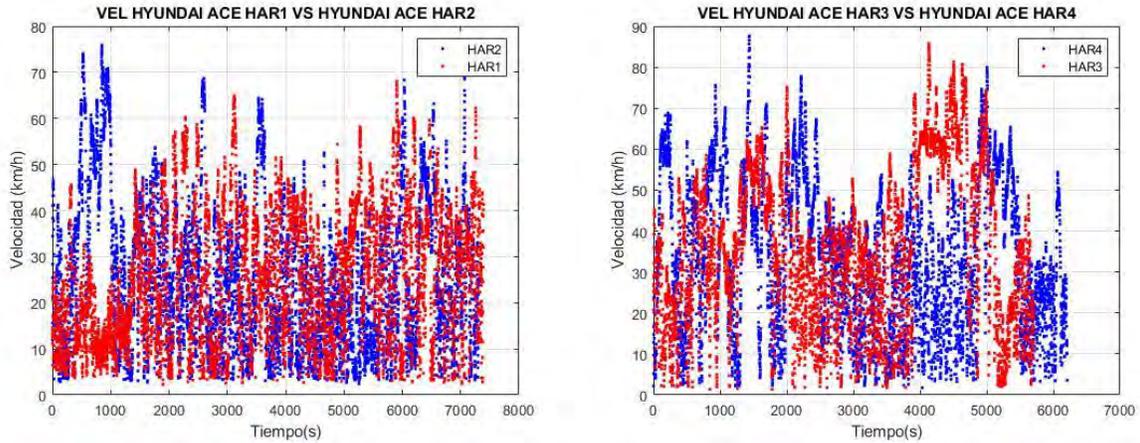


Figura 3.2 - Mediciones de velocidad en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Accent.

Los resultados del flujo másico de aire de admisión se visualizan en la figura 3.3 y la figura 3.4, los cuales muestran los valores de los modelos Elantra y Accent. El modelo Elantra para el recorrido HER1 y HER2 presenta la mayor cantidad de puntos entre los 0 a 1000 g/km de consumo de aire, mientras que para el HER3 y HER4 entre los 0 a 2000 g/km.

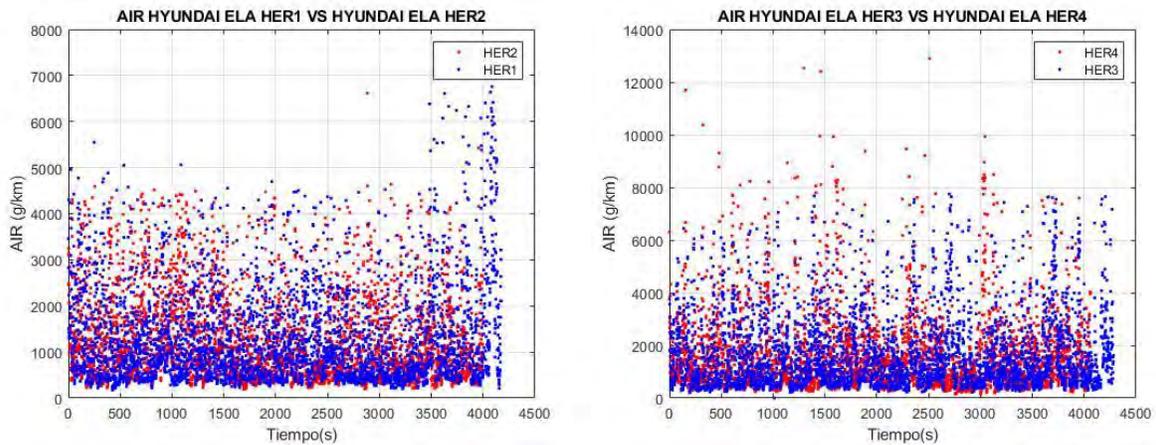


Figura 3.3 - Mediciones de aire en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Elantra,

La figura 3.4 presenta las mediciones de consumo de aire del modelo Accent, los recorridos HER1 y HER2 tienen la mayor cantidad de puntos entre 0 a 2000 g/km de consumo de aire. Por otro lado, el HER3 y HER4 entre 0 a 2500 g/km. La variación de la velocidad podría generar esta diferencia entre ambas gráficas.

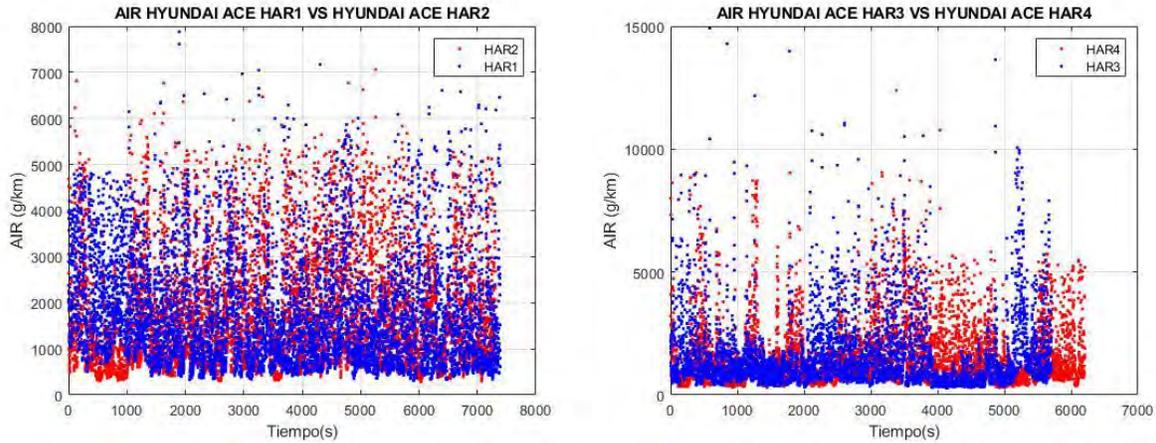


Figura 3.4 - Mediciones de aire en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Accent.

Las figuras 3.5 y 3.6 presentan la variación del factor lambda de ambos modelos en sus 4 recorridos. Para el recorrido HER1 presenta una línea de tendencia en 1.3, mientras de 1 para el recorrido HER2. El HER3 presenta una línea de tendencia de 1.2 y el HER4 cercano a 1. Se puede visualizar que las mezclas son casi estequiométricas.

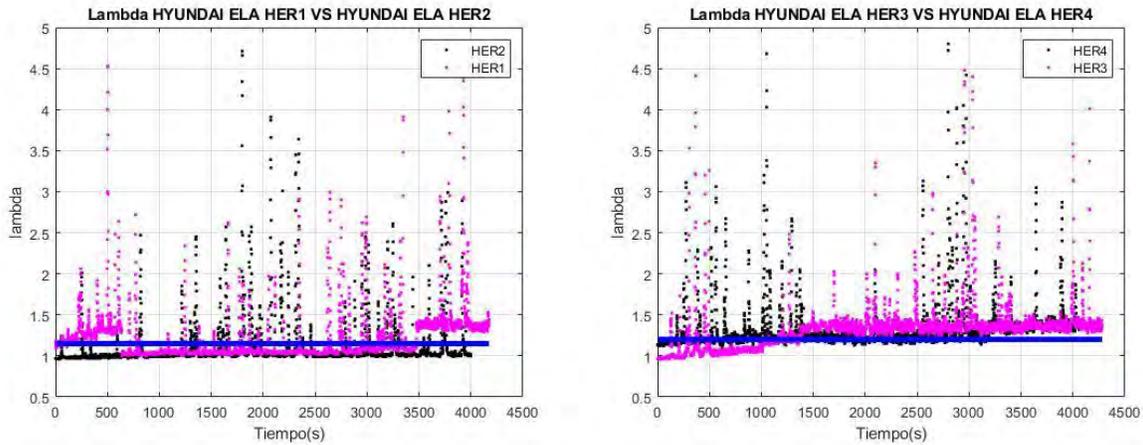


Figura 3.5 - Mediciones de factor lambda en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Elantra,

Se observa en la figura 3.6 que la mayor cantidad de puntos se encuentran entre 1 a 1.5 para los cuatro recorridos del modelo Accent. La línea de tendencia del HER1 está en el valor de 1.3, mientras que del HER2 en 1.4. Para el recorrido HER3 y HER4 los valores se encuentran entre 1 a 1.4 del factor lambda. Los cuatro recorridos presentan la mayor cantidad de puntos cercanos a una mezcla estequiométrica.

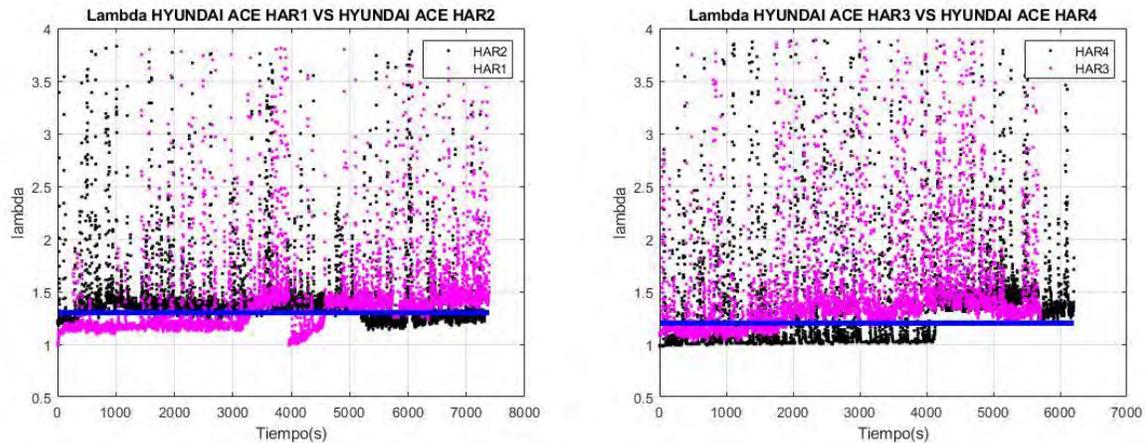


Figura 3.6 - Mediciones de factor lambda en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Accent.

La figura 3.7 y figura 3.8 presentan las variaciones del flujo másico de combustible para los modelos Hyundai Elantra y Accent. Este se calculó utilizando el factor lambda y el flujo de aire. El recorrido HAR1 y HAR2 tienen la mayor cantidad de puntos entre 0 a 200 g/km. El HAR3 y HAR4 tienen la mayor cantidad de datos entre 0 a 400 g/km. Como se observa las gráficas presentan ciertos puntos por encima de 800 g/km para los cuatro recorridos.

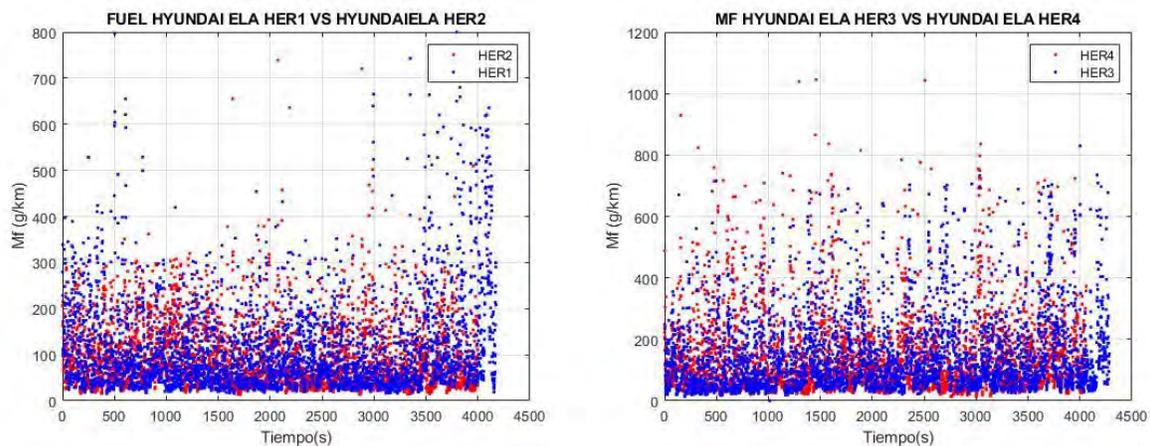


Figura 3.7 - Mediciones de combustible en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Elantra.

La figura 3.8 presenta la mayor cantidad de datos entre 0 a 400 g/km de combustible para los recorridos HAR1 y HAR2; mientras que, para los recorridos HAR3 y HAR4 los puntos se aglomeran entre 0 a 300 g/km, teniendo valores puntuales de hasta 2500 g/km de combustible consumido.

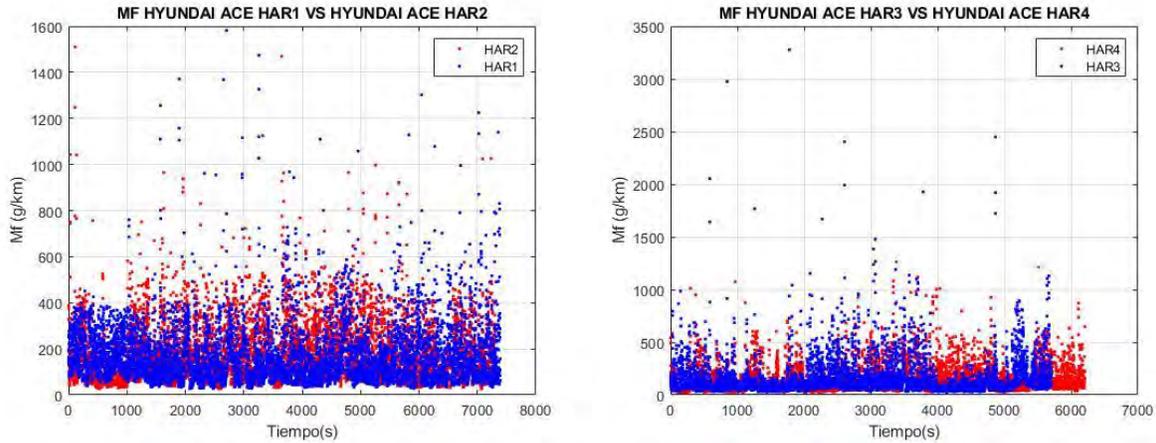


Figura 3.8 - Mediciones de combustible en condiciones de tráfico para el Hyundai Accent.

La siguiente figura 3.9 del modelo Hyundai Elantra presenta mayor cantidad de picos en los recorridos HER1 y HER2, debido a que la mezcla es rica ingresa mayor cantidad de combustible produciendo una mala combustión e incrementando el Monóxido de carbono CO. Los recorridos HER3 y HER4 presentan valores puntuales en ciertos instantes de tiempo. Se puede observar una pequeña aglomeración de puntos entre los segundos 2500 y 3500 del HER3 y HER4. En el segundo 4000 se observa una mayor cantidad de puntos para el recorrido HER4. Una de las posibles razones es la calibración del equipo o la sensibilidad de la sonda.

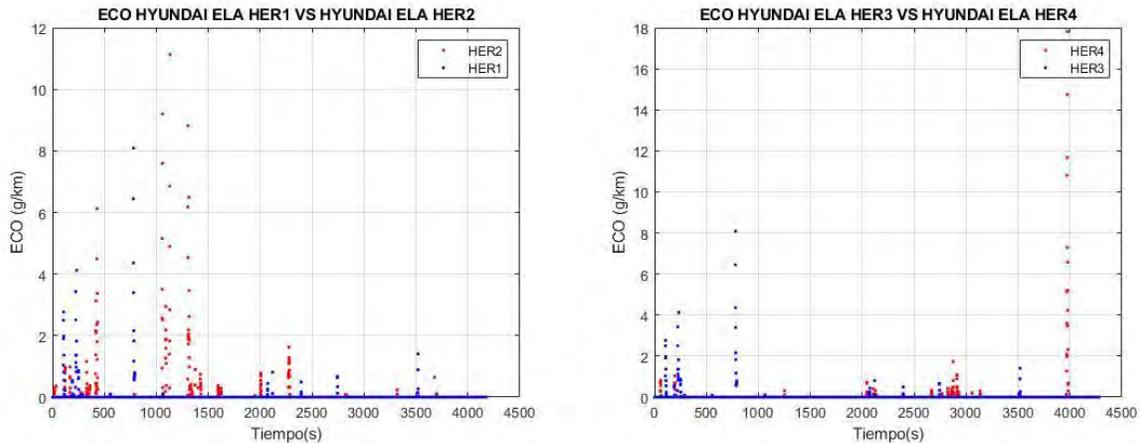


Figura 3.9 - Mediciones de factor de emisión CO en condiciones de tráfico para el Hyundai Elantra.

La figura 3.10 presenta la medición de CO para los cuatro recorridos del modelo Accent. Se observa que el recorrido HAR1 presenta mayores valores a lo largo de este, se presenta la mayor cantidad de datos entre 0 a 5 g/km de ECO para ambos recorridos HAR1 y HAR2. Para el

recorrido HAR3 la mayor cantidad de datos se encuentran entre 0 a 3 g/km, disminuyendo a medida que incrementa el tiempo. EL recorrido HAR4 presenta valores constantes a través del tiempo, presentando puntos por encima de 10 g/km en ciertos instantes.

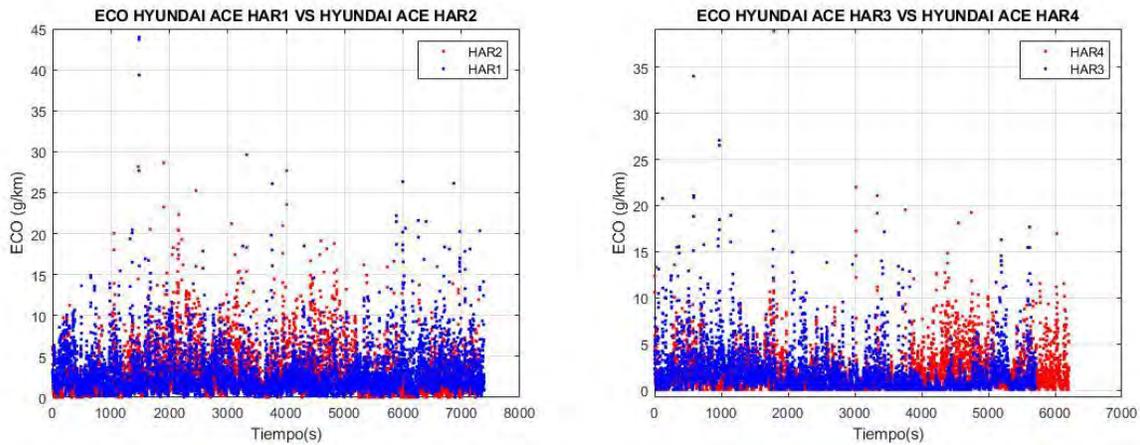


Figura 3.10 - Mediciones de factor de emisión CO en condiciones de tráfico para el Hyundai Accent.

La siguiente figura 3.11 presenta los valores del consumo del factor de emisión NO_x g/km en ciertos instantes para el recorrido los cuatro recorridos. El HER2 presenta un dato en el instante 2500, mientras que el HER1 posee datos en ciertos instantes del recorrido como se visualiza en la gráfica. El recorrido HER3 presenta valores en los segundos 500, 800 y 3300; mientras que, el recorrido HER4 en el segundo 3400.

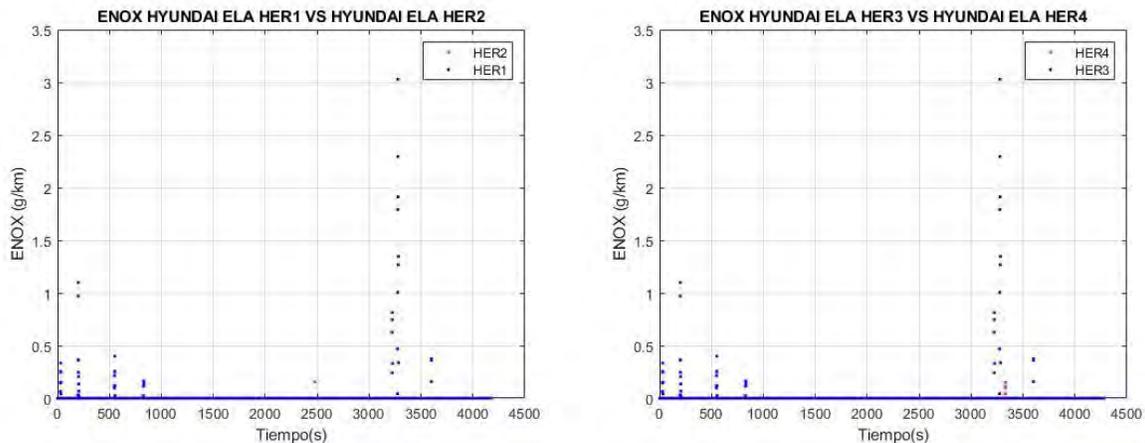


Figura 3.11 - Mediciones de factor de emisión NO_x en condiciones de tráfico para el Hyundai Elantra

La figura 3.12 presenta las mediciones de factor de emisión de Nox para los recorridos HAR1, HAR2, HAR3 y HAR4. Los recorridos HAR1 y HAR2 no presentan valores, lo cual puede deberse a una mala toma de datos al momento de realizar los recorridos. El recorrido HAR3 y HAR4 presentan la mayor cantidad de valores en los primeros 400 segundos, mientras que el recorrido HAR3 presenta valores hasta el segundo 5700. Se observa mayor generación de ENOX para el recorrido HAR4.

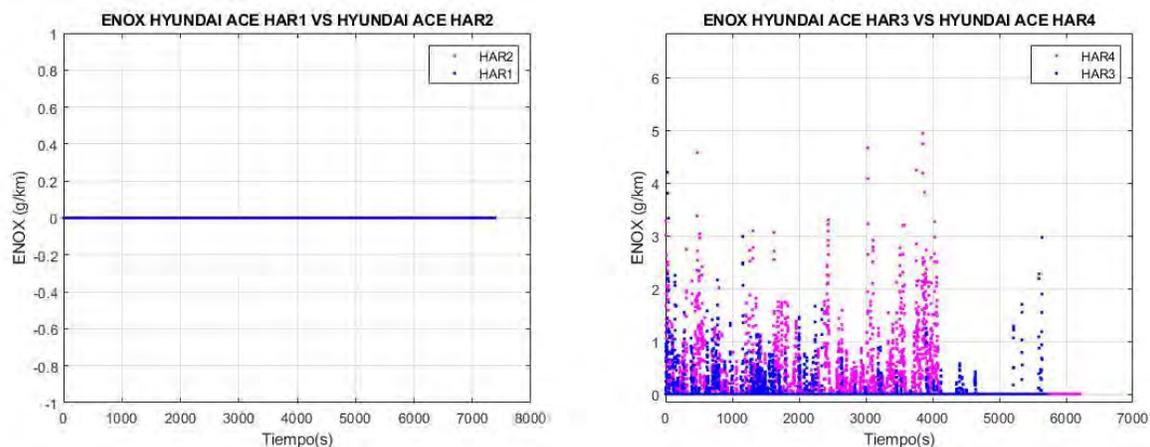


Figura 3.12 - Mediciones de factor de emisión NO_x en condiciones de tráfico para el Hyundai Accent.

La figura 3.13 se observa que el factor de emisión de HC para los recorridos HER1, HER2, HER3 y HER4 son nulos; una mala toma de datos o la sensibilidad de la sonda pueden ser motivo de estos resultados.

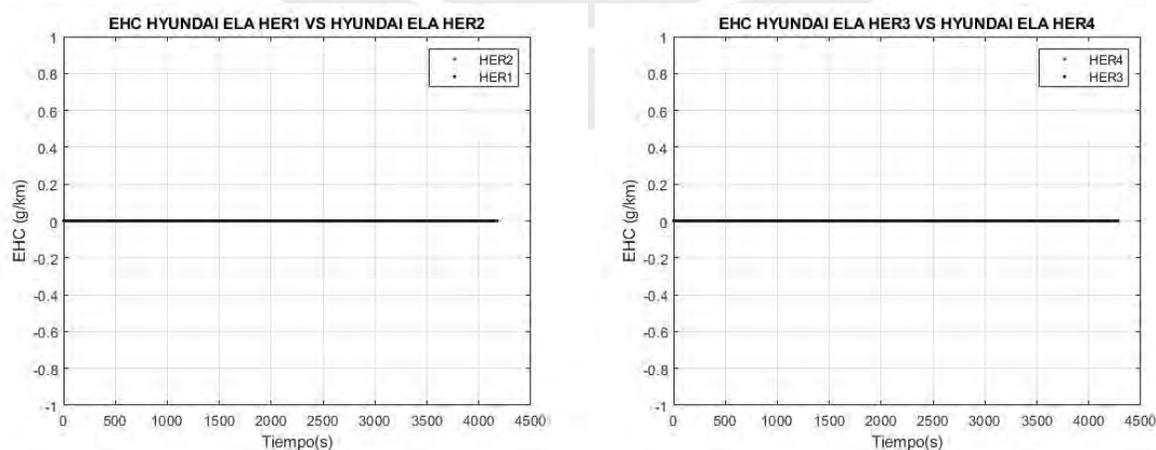


Figura 3.13 - Mediciones de factor de emisión HC en condiciones de tráfico para el Hyundai Elantra

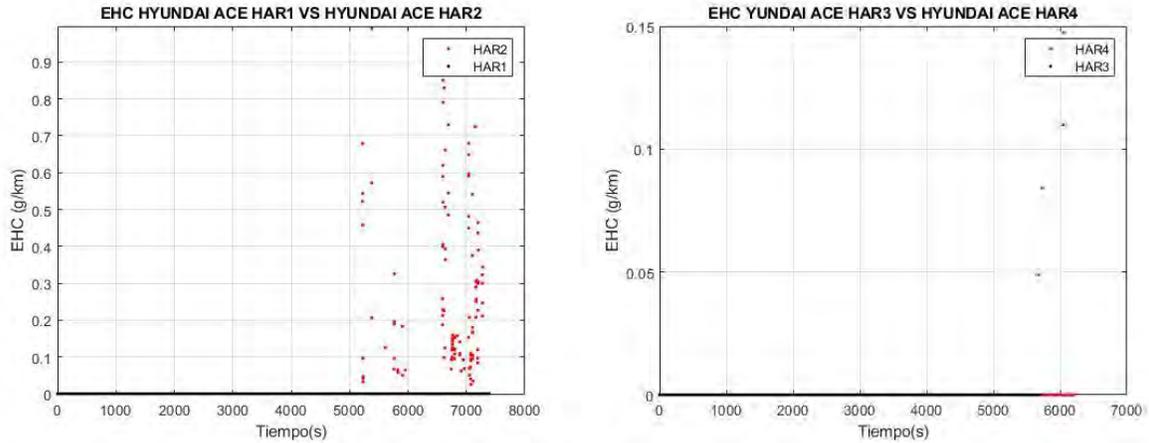


Figura 3.14 - Mediciones de factor de emisión HC en condiciones de tráfico para el Hyundai Accent

Los factores de emisión de CO₂ usualmente se producen debido a la quema de combustible, los cuales son expulsados por el tubo de escape; asimismo, la cantidad de CO₂ depende de la energía que se necesitara para circular en las vías, así como la eficiencia que el motor presenta. En la figura 3.15 el recorrido HER2 presenta mayores valores de CO₂, los cuales se encuentran entre 100 a 1400 g/km. El recorrido HER1 presenta oscilaciones entre 100 a 1000 g/km, teniendo valores más pequeños en comparación con el HER2. Para el caso de los recorridos HER3 y HER4 podemos observar que los valores presentan diferencia. HER4 presenta la mayor cantidad de valores entre 200 a 250 g/km.

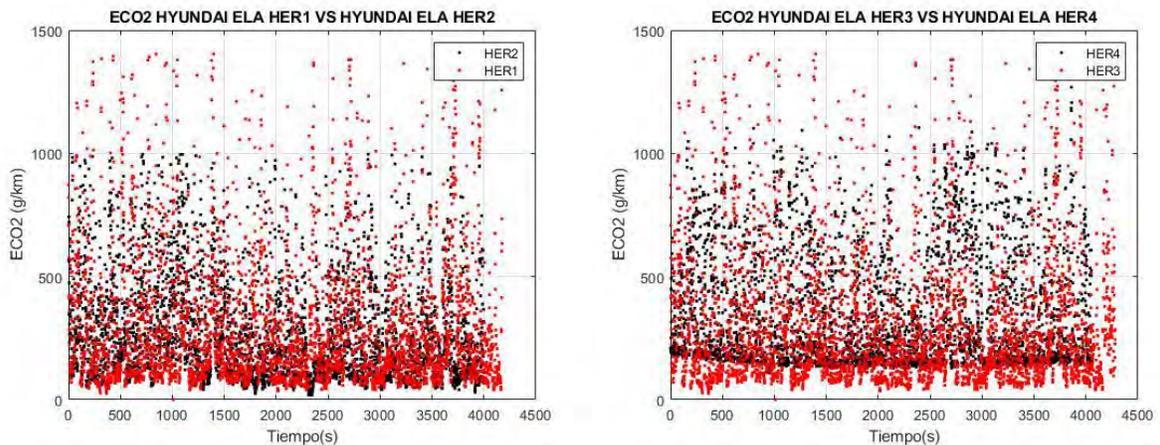


Figura 3.15 - Mediciones del factor de emisión CO₂ en condiciones de tráfico para el Hyundai Elantra.

El modelo Hyundai Accent, presenta variaciones significativas en sus 4 recorridos. En primer lugar, se puede visualizar en la figura 3.16 que el HAR1 presenta mayor cantidad de valores entre 100 a 1000 g/km, al igual que el recorrido HAR2; no obstante, el HAR3 y HAR4 presentan valores por encima de 1000 g/km en ciertos instantes.

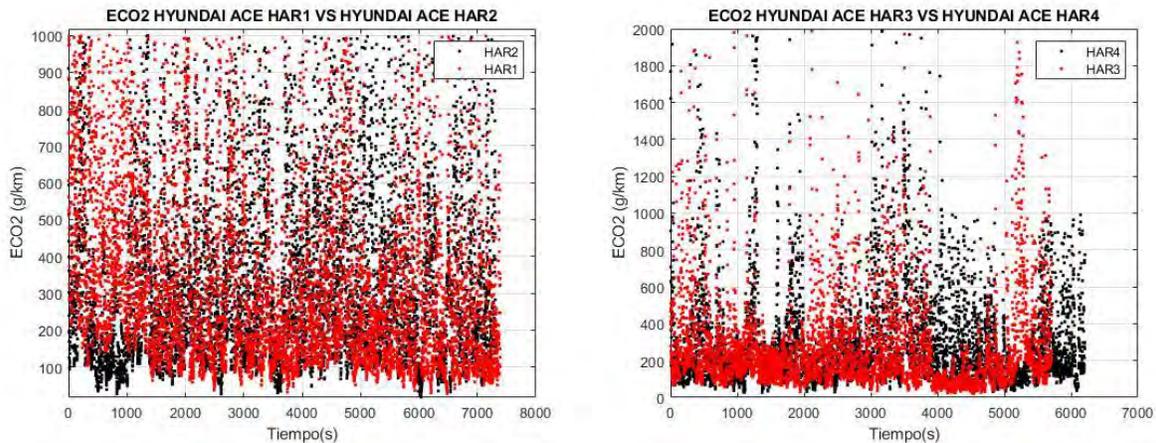


Figura 3.16 - Mediciones de factor CO₂ en condiciones de tráfico para el vehículo Hyundai Accent.

La figura 3.17 muestran la variación de las velocidades para el modelo Toyota Rav4. En la gráfica izquierda se visualiza la variación entre el recorrido TRVR1 y TRVR2 del modelo Rav4, mientras que a la derecha los recorridos TRVR3 y TRVR4, las velocidades del primer recorrido llegan hasta los 75 km/h, mientras que para el segundo hasta 80 km/h. Por otro lado, para el recorrido 3 el máximo valor de velocidad es de 50 km/h, mientras que el 4 supera los 80 km/h.

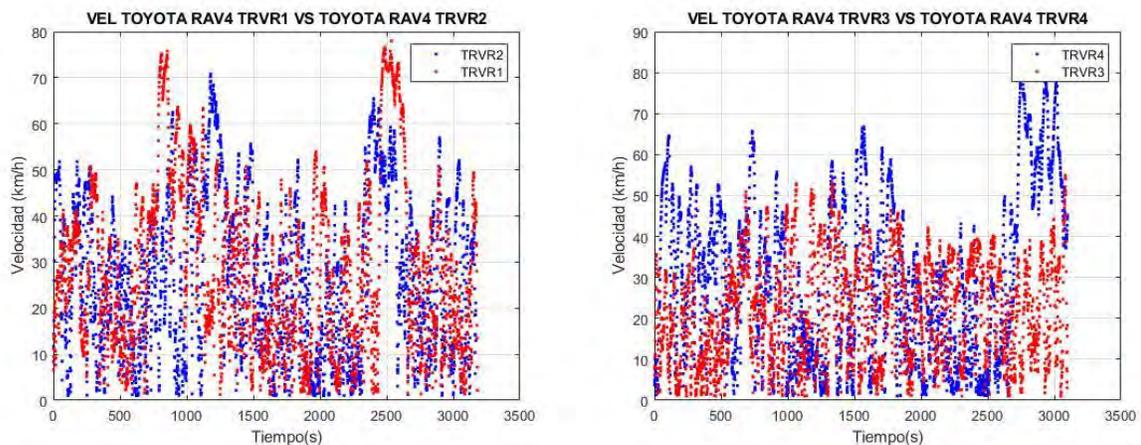


Figura 3.17 - Mediciones de velocidades km/h en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.

La siguiente figura 3.18 presenta la variación de las velocidades para el vehículo Toyota Yaris. La gráfica izquierda presenta los recorridos TYR1 y TYR2, mientras que la derecha el TYR3 y TYR4. Para el recorrido TYR1 la velocidad máxima fue de 85 km/h, mientras que para el TYR2 de 80 km/h. Estos datos no presentan una diferencia significativa entre el modelo Rav4 y el Yaris. El recorrido TYR3 presenta picos de hasta 83 km/h, a diferencia del recorrido TYR4 que presenta valores hasta los 70 km/h.

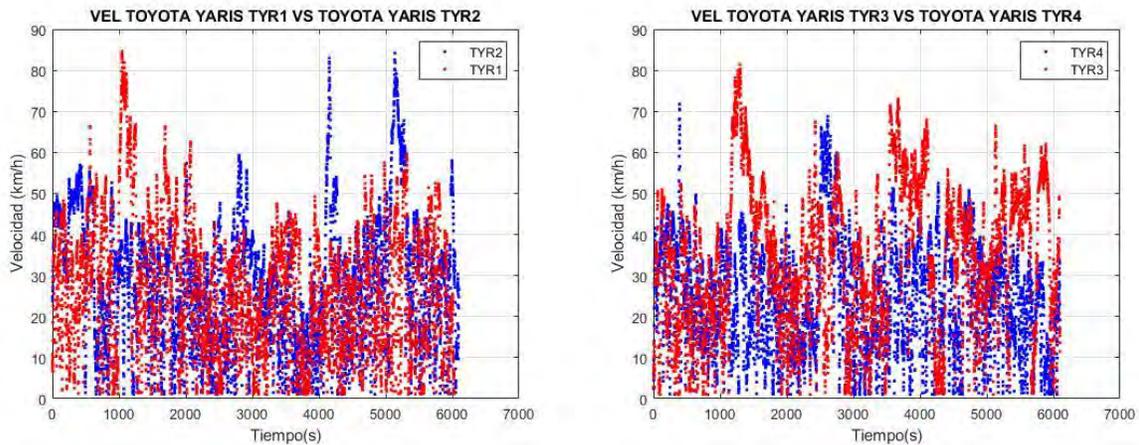


Figura 3.18 - Mediciones de velocidades km/h en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.

La figura 3.19 presenta las variaciones del consumo de aire por cada km recorrido. El consumo de aire es directamente proporcional a la velocidad del vehículo. Los recorridos TRVR1 y TRVR2 tienen la mayor cantidad de valores entre 0 a 2000 g/km. Los recorridos TRVR3 y TRVR4 también presentan la mayor cantidad de valores entre 0 a 2000 g/km; en ciertos instantes ambos vehículos presentan picos de consumo de aire. El diseño del motor influye en la potencia efectiva de este para movilizarse, por lo cual los motores más grandes van a requerir mayor consumo de aire para la quema de combustible, en el caso del Rav4 este posee una cilindrada de 1998cc por lo que este va a requerir mayor consumo de aire, para llegar a las velocidades presentes. El diseño del motor es un factor influyente en las mediciones obtenidas del experimento.

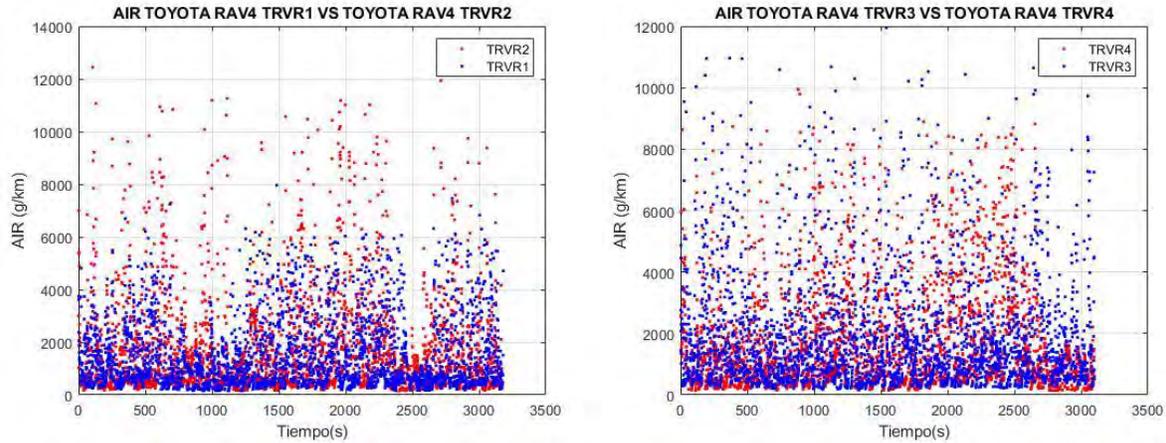


Figura 3.19 - Mediciones de consumo de aire g/km en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.

La siguiente figura 3.20 presenta la variación del consumo de aire para el modelo Yaris en sus 4 recorridos. La gráfica izquierda presenta el recorrido TYR1 y TYR2, los cuales poseen datos de hasta 12000 g/km, mientras que la mayor cantidad de valores se encuentra entre 0 a 2000 g/km. La gráfica de la derecha presenta los recorridos TYR3 y TYR4 del modelo Yaris, la mayor cantidad de valores se encuentran entre 0 a 1000 g/km. Como se mencionó anteriormente, el diseño del motor Yaris presenta una cilindrada de 1296 cc, por lo que este consume menor cantidad de aire para la quema de combustible y obtener las velocidades requeridas.

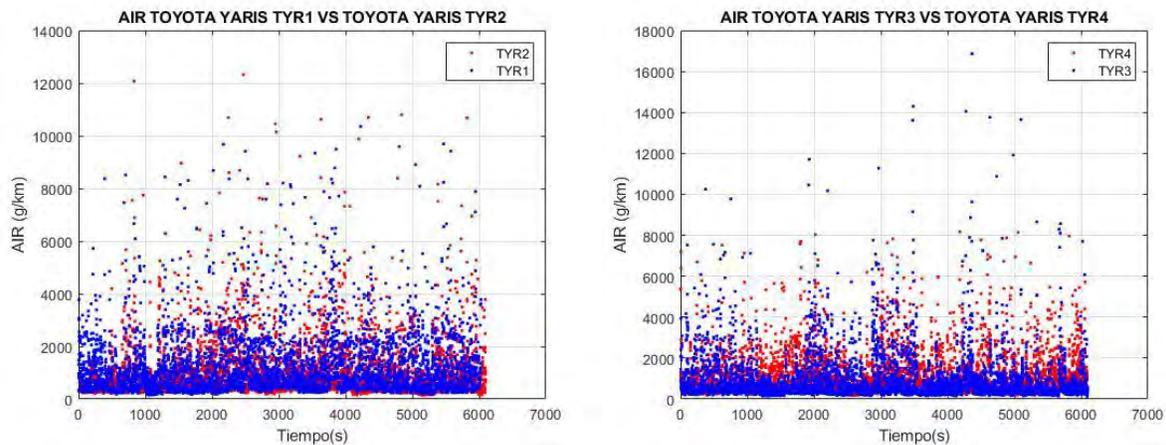


Figura 3.20 - Mediciones de consumo de aire g/km en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.

La figura 3.21 presenta la variación del factor lambda a través del tiempo, para los modelos Toyota Rav4. El modelo Rav 4 para los recorridos TRVR1, TRVR2, TRVR3 y TRVR4 presenta la mayor cantidad de valores cercanos a la unidad, generando una línea de tendencia en 1. Ambos

recorridos presentan picos en ciertos instantes, lo que genera menor ingreso de combustible y con esto una mala combustión. En la mayor parte del recorrido el factor se encuentra cerca de la unidad produciendo mezclas estequiométricas.

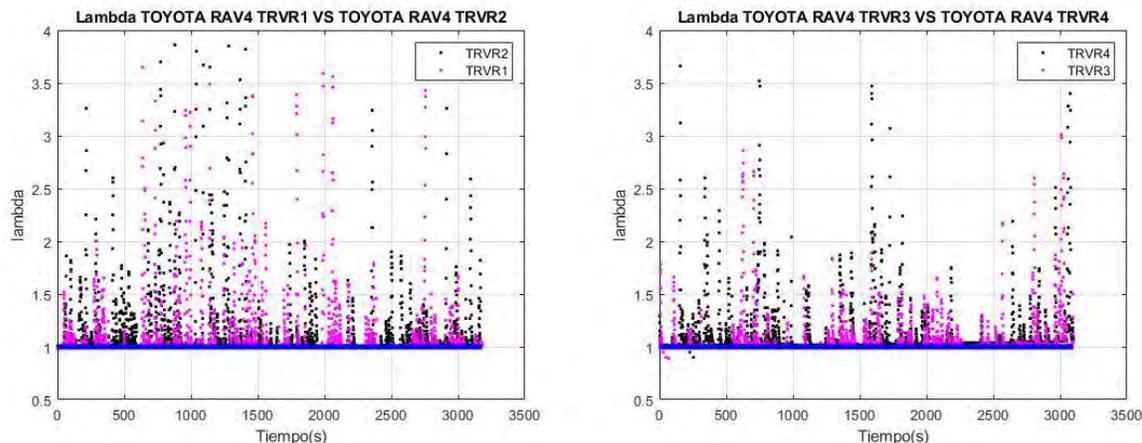


Figura 3.21 - Mediciones de factor lambda en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.

La siguiente figura 3.22 presenta la variación del factor lambda para el modelo Yaris. Los valores presentan diferencias significativas con respecto al modelo Rav4. El recorrido TYR1 posee la mayor cantidad de sus valores cercanos a la unidad produciendo mezclas estequiométricas. La gráfica de la derecha presenta los recorridos TYR3 y TYR4; en el caso del recorrido TYR3 presenta valores de hasta 3.5 y una línea de tendencia en 1.5, generando mezclas pobres al inicio del recorrido y ricas al finalizar este. Para el recorrido TYR4 es lo contrario, iniciando con mezclas ricas y culminando con pobres, donde se visualiza la línea de tendencia en 1.2.

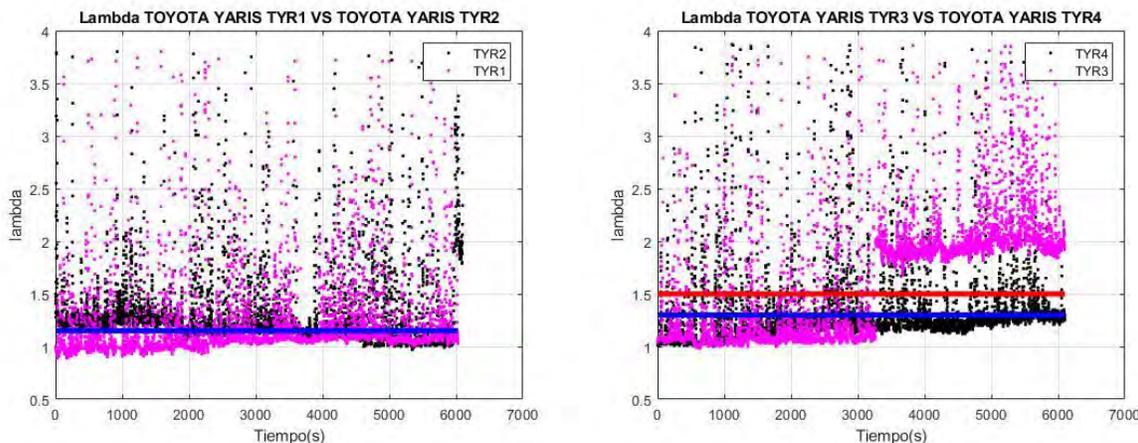


Figura 3.22 - Mediciones de factor lambda en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.

El factor lambda influye directamente en la relación entre el consumo de combustible y el de aire, asimismo, este al ser variable en el tiempo produce diferentes resultados. En el caso del Toyota Rav4 se observa en la figura 3.23 la variación del consumo de combustible, manteniendo las mismas relaciones con respecto al consumo de aire. En el gráfico de la derecha se observa la variación del recorrido TYRV3 y TYRV4, los cuales presentan mayor cantidad de valores de mayor magnitud. El recorrido TYR3 presenta mayor cantidad de puntos por encima de la media.

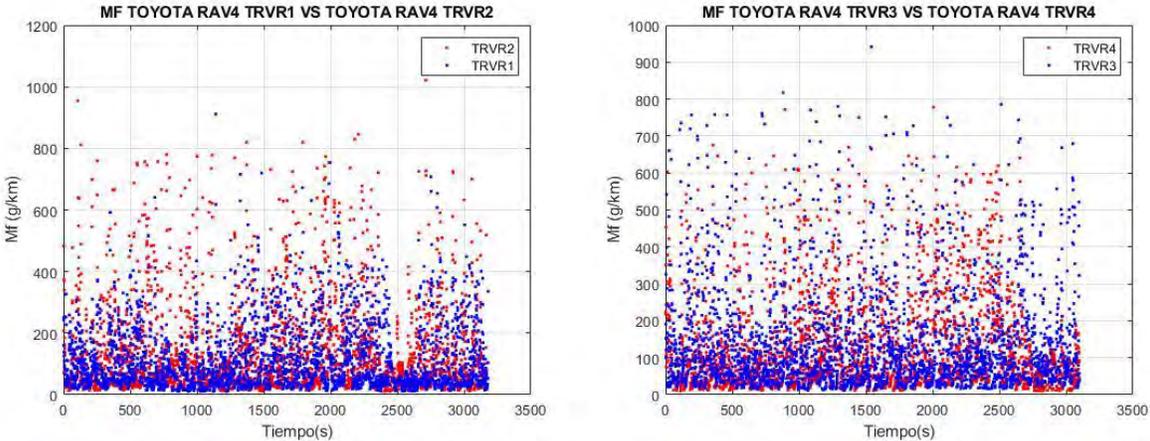


Figura 3.23 - Mediciones de combustible en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4. La siguiente figura 3.24 presenta la variación del consumo de combustible en el Toyota Yaris. La gráfica de la izquierda muestra los recorridos TRY1 y TRY2, en los cuales se observa que los valores se encuentran entre 0 a 200 g/km de consumo. El recorrido TYR3 y TYR4 presentan valores entre 0 a 100 g/m, el recorrido TYR3 presenta valores puntuales de hasta 2250 g/km.

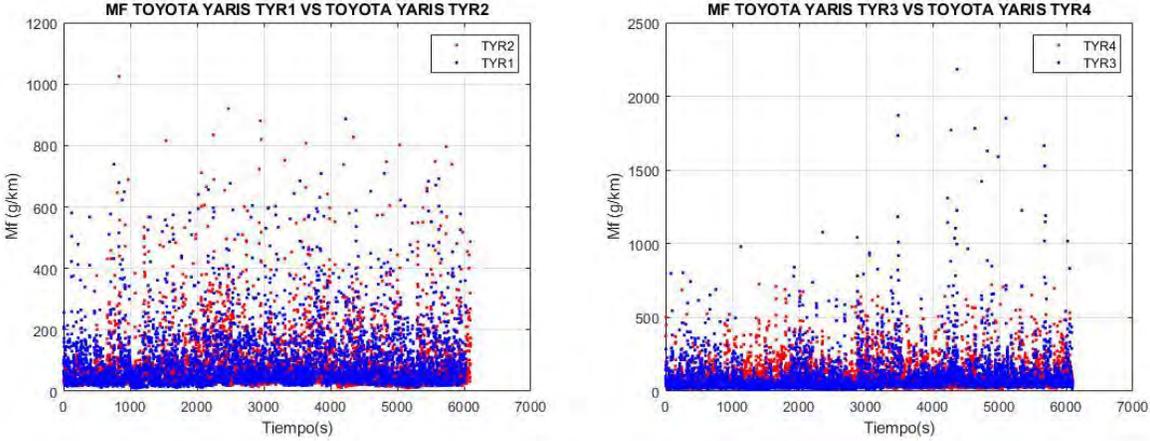


Figura 3.24 - Mediciones de combustible en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.

La siguiente figura 3.25 presenta los valores del factor de emisión del CO a través del tiempo, Los recorridos TRVR1 y TRVR2 presentan valores puntuales de hasta 6 g/km de emisión de CO para ciertos instantes de recorrido, esto debido a los momentos en los cuales el vehículo aceleró, produciendo mayor consumo de combustible y generando una mezcla más rica. En el caso del recorrido TRVR3 y TRVR4 presentan valores factor de emisión CO similares a los recorridos TRVR1 y TRVR2 el cual se debe a las condiciones de tráfico que estuvo expuesto el vehículo.

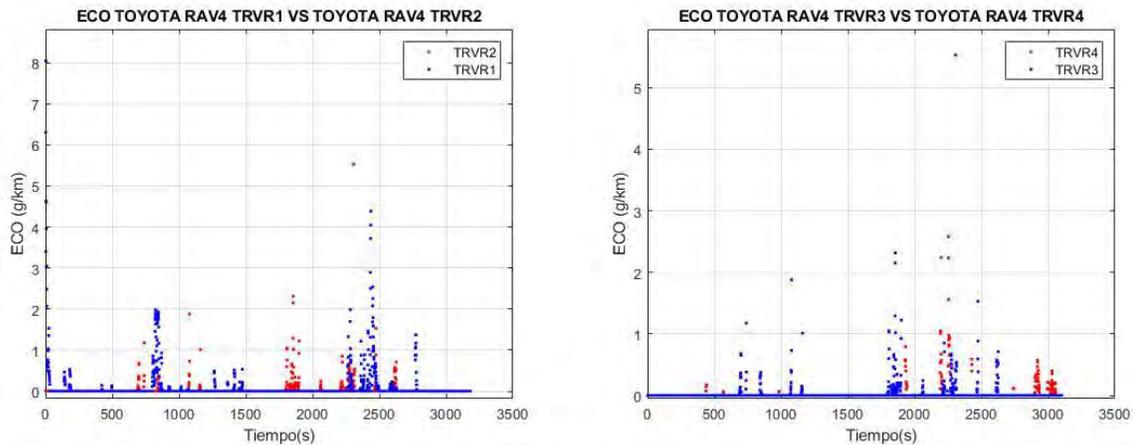


Figura 3.25 - Mediciones del factor CO g/km en condiciones de tráfico para el vehículo Toyota RAV 4.

La siguiente figura 3.26 presenta los valores del factor de emisión de CO para el Toyota Yaris. La gráfica de la izquierda presenta el recorrido TYR1 y el TYR2. Durante los primeros 3000 segundos el recorrido 1 presenta los valores de mayor magnitud. Si observamos la figura 3.21 el factor lambda oscila por debajo de la unidad, produciendo mezclas aire-combustible más ricas y mayor producción de CO. La gráfica de la derecha presenta los valores del factor de emisión del CO para el recorrido TYR3 y TYR4. Los valores son mayores en la mitad del recorrido, mientras que decrecen al inicio y al final, El recorrido TYR1 presenta el pico más alto de 90 g/km.

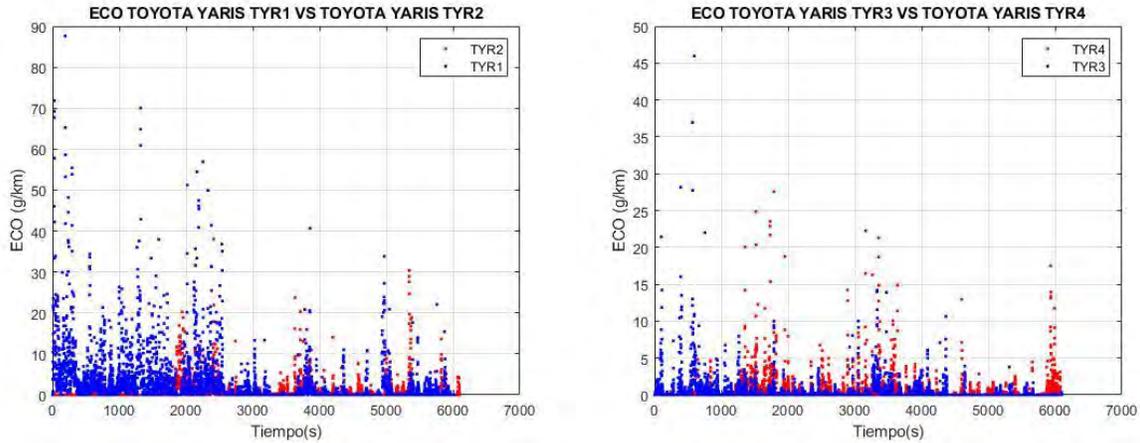


Figura 3.26 - Mediciones del factor CO g/km en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.

Se observa que la figura 3.27 presenta un solo dato del NO_x en el caso del recorrido TRVR1 en el instante 900, mientras que el recorrido TRVR4 en el instante 2300, una posible explicación, por la cual no se pudieron obtener valores, es debido a la sensibilidad del equipo para esta toma de datos de este vehículo.

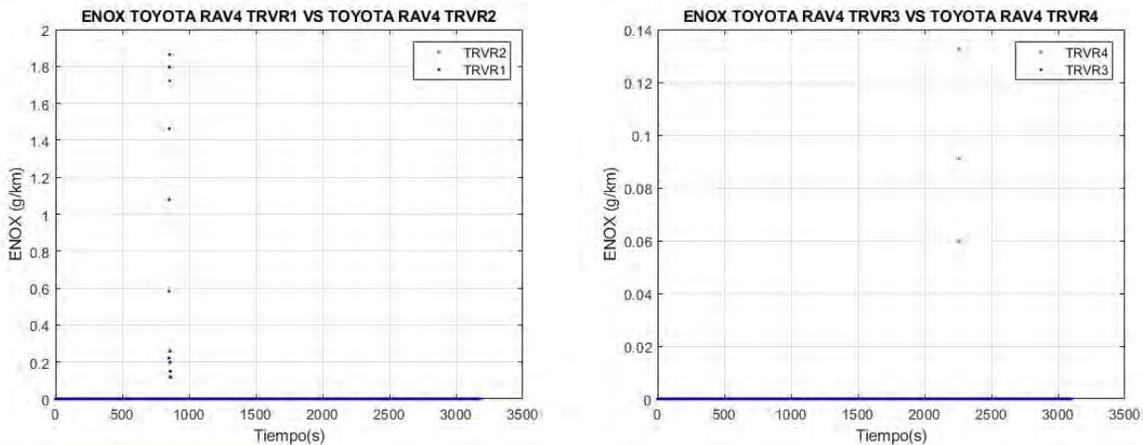


Figura 3.27 - Mediciones del factor NO_x g/km en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.

La figura 3.28 presenta los factores de emisión del NO_x a lo largo de los 4 recorridos del modelo Yaris. Los datos de la gráfica de la izquierda se encuentran desde 1 hasta 60 g/km, en algunos instantes presenta picos de hasta 58 g/km de NO_x. La gráfica de la derecha presenta los recorridos TYR3 y TYR4, los datos de estos son mayores en comparación con los recorridos TYR1 y TYR2.

La mayor cantidad valores de emisión de CO se encuentran entre 1 a 5 g/km de NO_x, mientras que los demás por encima de 10 g/km de NO_x.

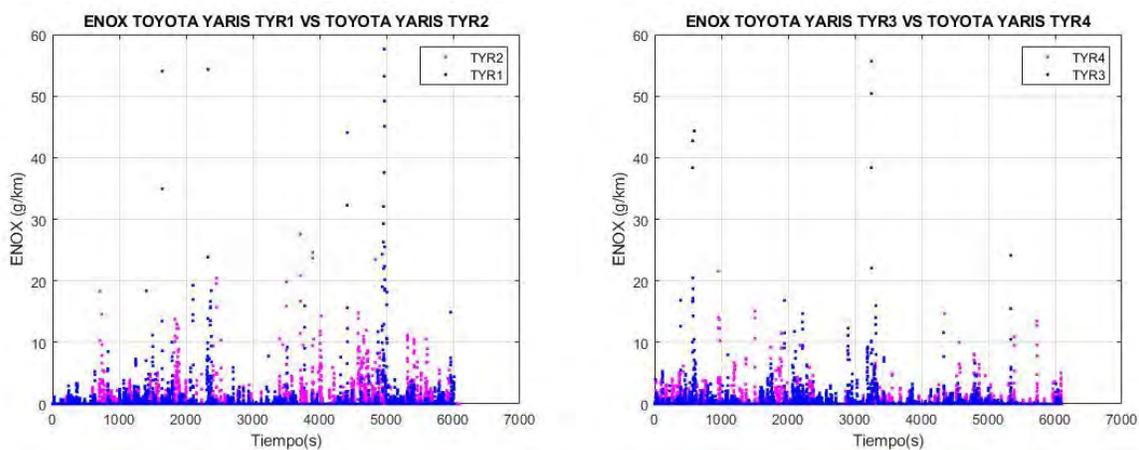


Figura 3.28 - Mediciones del factor NO_x g/km en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.

La figura 3.29 muestra los valores del factor de emisión del HC para el modelo Toyota Rav4. Los recorridos TRVR1 y TRVR2 presentan valores en ciertos instantes, mientras que el recorrido TRVR3 y TRVR4 no presentan valores algunos, teniendo una línea de puntos en 0.

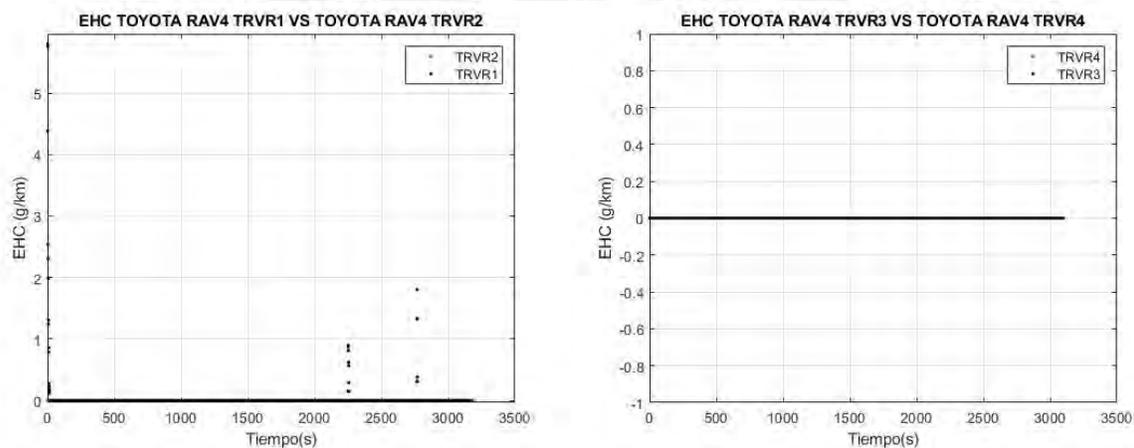


Figura 3.29 - Mediciones del factor HC g/km en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.

La figura 3.30 presenta los factores de emisión del modelo Yaris en sus 4 recorridos. La gráfica de la izquierda muestra los valores a lo largo de los recorridos TYR1 y TYR2, se presentan picos

de hasta 70 g/km de EHC para el TYR1. El recorrido TYR3 presenta mayor cantidad de emisión de EHC antes del segundo 1000 y en el segundo 3200, mientras que el TYR4 en los 6000s.

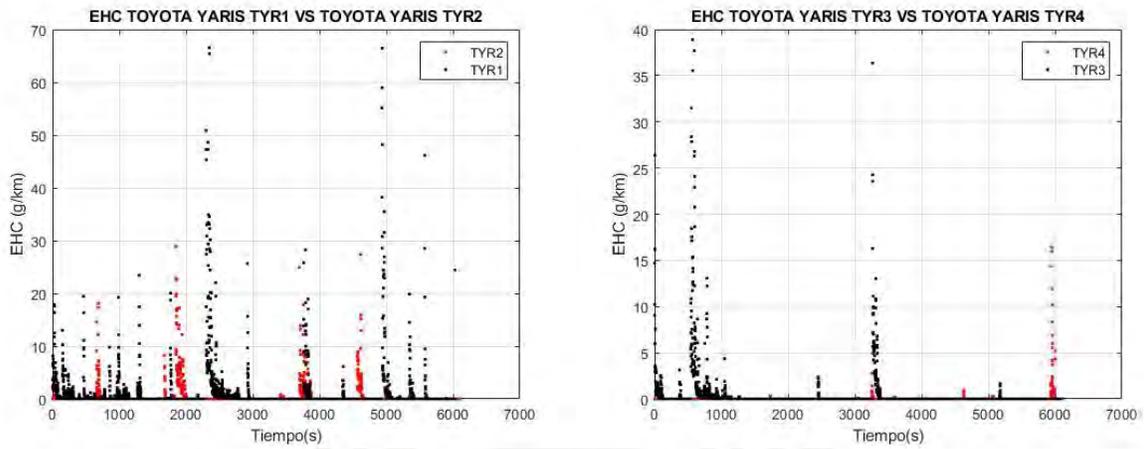


Figura 3.30, Mediciones del factor HC g/km en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.

La siguiente figura 3.31 presenta los valores de emisión de CO₂ g/km para los 4 recorridos del modelo Toyota Rav 4. La producción de CO₂ depende del diseño del automóvil. Si este es más robusto va a requerir mayor energía para su movimiento generando mayor cantidad de consumo de combustible y con esto incremento de CO₂ g/km. El recorrido TRVR1 y el recorrido TRVR2 tienen la mayor cantidad de datos entre 0 a 500 g/km. La gráfica de la derecha presenta los factores de emisión para el recorrido TRVR3 y TRVR4, en los cuales se observa una aglomeración entre 0 a 300 g/km. Los cuatro recorridos presentan datos por encima de la media.

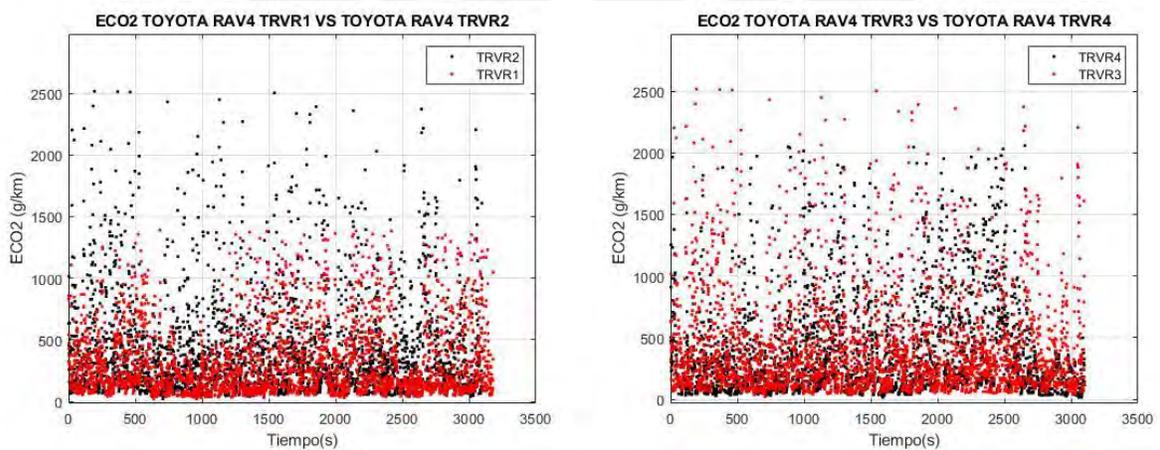


Figura 3.31 - Mediciones del factor CO₂ g/km en condiciones de tráfico para el Toyota RAV 4.

La siguiente figura 3.32 presenta la variación del factor de CO₂ en g/km para el modelo Toyota Yaris en sus 4 recorridos. La gráfica de la izquierda muestra los recorridos TYR1 y TYR2, en los cuales los valores se encuentran entre 1 hasta 500 g/km de CO₂, teniendo datos por encima en ciertos instantes. Los recorridos TYR3 y TYR4 presentan valores similares con datos por encima de 1000 g/km en ciertos instantes.

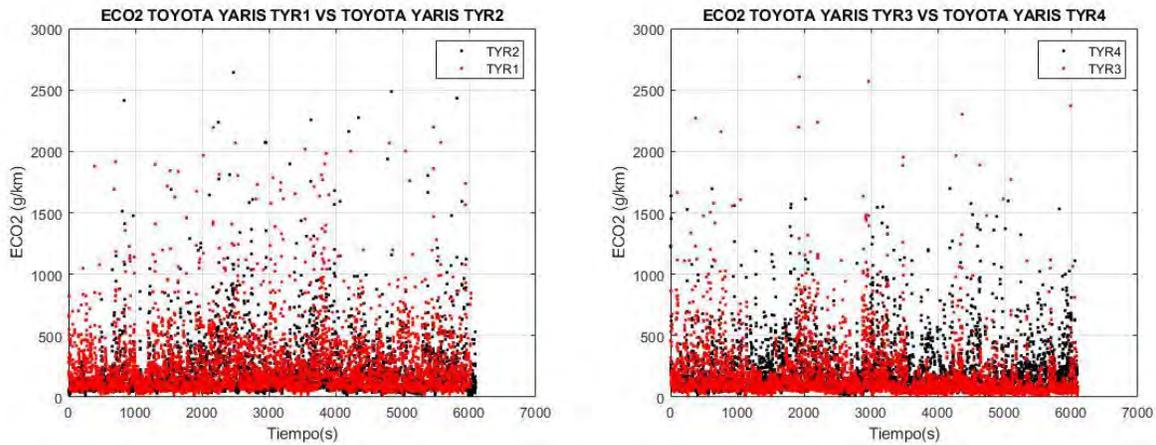


Figura 3.32 - Mediciones del factor CO₂ g/km en condiciones de tráfico para el Toyota Yaris.

La figura 3.33 presenta la variación de la velocidad a través del tiempo para el vehículo Volkswagen Gol. La velocidad llega hasta 70 km/hr para el recorrido VGR1, mientras que para el VGR2 hasta 80. La máxima velocidad del VGR3 llega hasta 70 km/hr y del VGR4 hasta 60 km/hr, para los cuatro recorridos la mayoría de los valores se encuentran entre 0 a 50 km/hr.

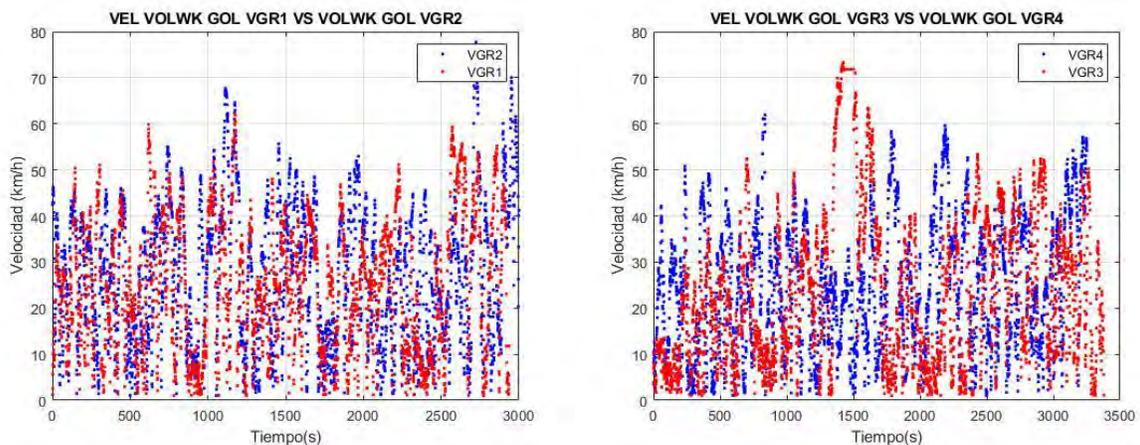


Figura 3.33 - Mediciones de velocidad km/h en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol.

La siguiente figura 3.34 presenta la variación del consumo de aire para los 4 recorridos del vehículo Volkswagen. La gráfica de la izquierda presenta el consumo en los recorridos VGR1 y VGR2, la mayoría de valores se encuentra entre 0 a 2000 g/km de consumo de aire y v alores puntuales por encima de los 4000 g/km en ciertos instantes. La gráfica de la derecha muestra los valores del recorrido VGR3 y VGR4, en los cuales se observa los valores entre 0 a 2000 g/km.

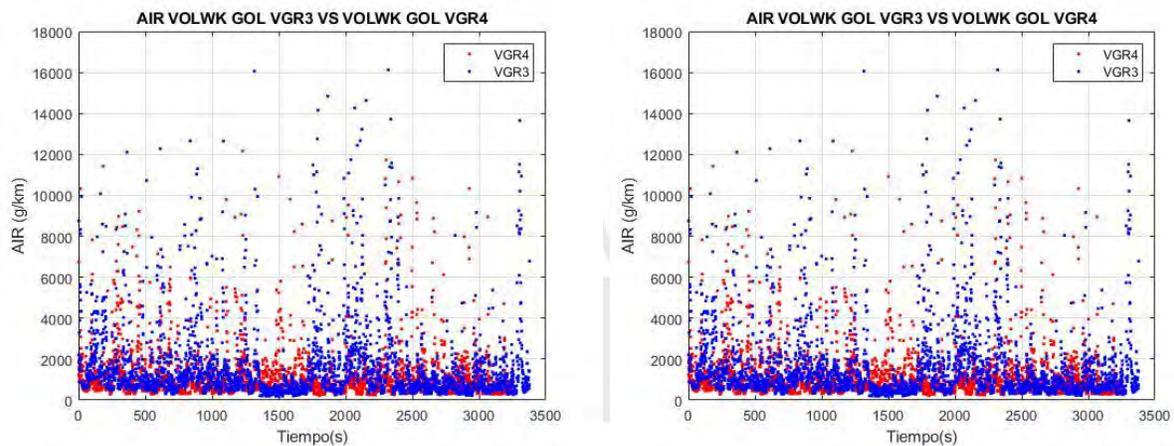


Figura 3.34 - Mediciones de consumo de aire g/km en condiciones de tráfico Volkswagen Gol

La siguiente figura 3.35 presenta la variación del factor lambda en el transcurso del tiempo. La gráfica izquierda muestra valores por encima de 3 en el recorrido VGR1 hasta el segundo 1500, mientras que por encima de 1 a partir de ese instante. Si bien la mezcla es pobre en todo el recorrido VGR1, a partir del segundo 2500 esta tiende a ser un poco más rica generando mayor consumo de combustible, este recorrido presenta una línea de tendencia de 2.5. El recorrido VGR2 presenta una mezcla pobre, a lo largo de todo el tiempo transcurrido, manteniendo la línea de tendencia en 1.8. El gráfico de la derecha presenta los valores del factor lambda en los recorridos VGR3 y VGR4. El recorrido VGR3 presenta valores por encima de 1.5 en todo su trayecto, manteniendo una línea de tendencia de 1.8 mientras que el recorrido VGR4 de 1.4 a lo largo del recorrido.

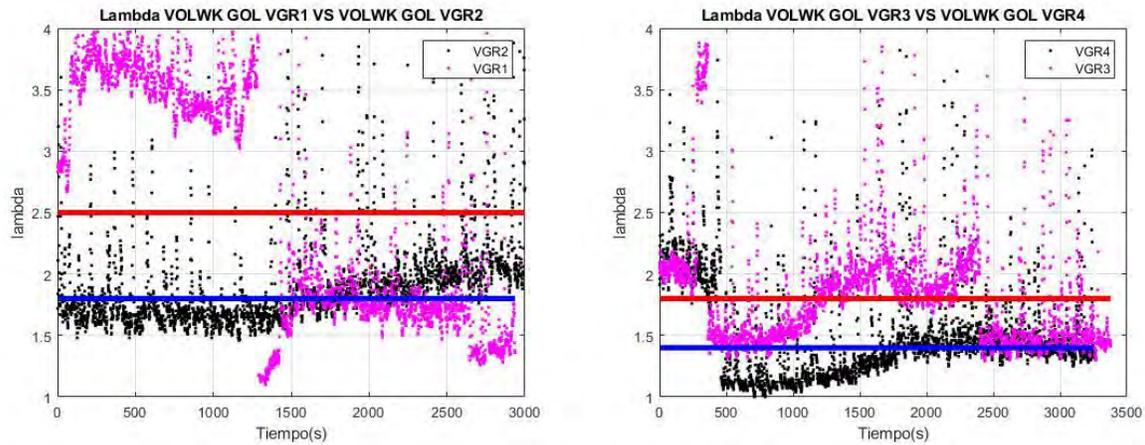


Figura 3.35 - Mediciones factor lambda en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol.

La figura 3.36 presenta los consumos de combustible a través del tiempo. La gráfica de la izquierda presenta valores entre 0 a 500 g/km para el recorrido VGR1. En el segundo recorrido VGR2 los valores se encuentran entre 0 a 300 g/km, a partir del segundo 1500 presenta valores por encima de la media en ciertos instantes. El recorrido VGR3 presenta valores entre 0 a 300 g/km de consumo de combustible. El recorrido VGR4 presenta valores similares al recorrido VGR3; no obstante, este presenta valores por debajo de los máximos del VGR3.

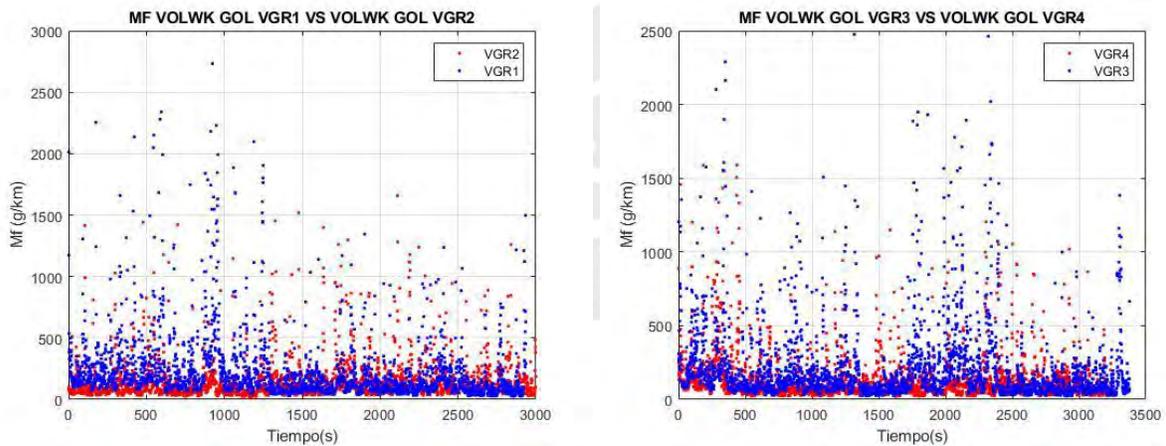


Figura 3.36 - Mediciones de combustible g/km en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol.

La figura 3.37 muestra la variación del factor de emisión CO g/km en los 4 recorridos del modelo Volkswagen. El recorrido VGR1 y VGR2 muestran valores similares, estando entre el rango de 0 a 5 g/km de ECO; sin embargo, el recorrido VGR2 presenta mayor cantidad de valores por

encima de la media. El recorrido VGR3 presenta valores por encima del recorrido 4 durante los primeros 2500 segundos, los valores del recorrido VGR3 llegan hasta 65 g/km de ECO, mientras que para el VGR4 hasta 40 g/km.

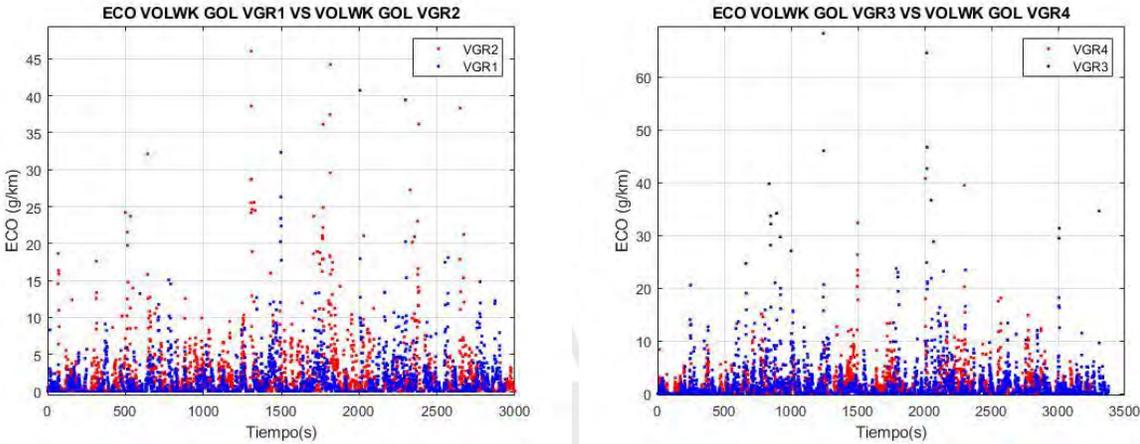


Figura 3.37 - Mediciones de factor de CO g/km en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol,

La siguiente figura 3.38 presenta la variación de los valores del factor de emisión NO_x en g/km para el vehículo Volkswagen en sus cuatro recorridos, en el caso del recorrido VGR1 se observa que los valores se dan en ciertos instantes; mientras que para el recorrido VGR3 y VGR4 se dan entre los segundos 500 a 2000, llegando a valores de hasta 11 g/km de ENOX.

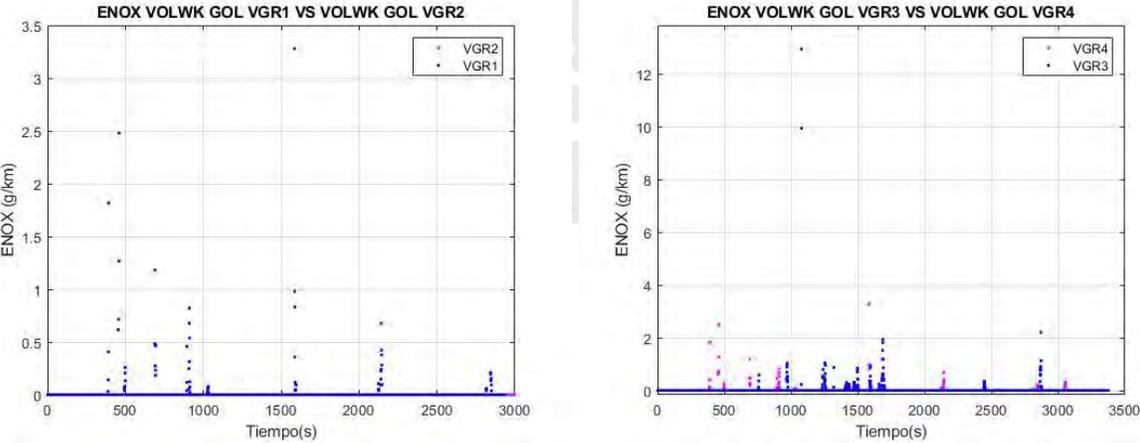


Figura 3.38 - Mediciones de factor de NO_x g/km en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol.

La figura 3.39 presenta los factores de emisión de HC en g/km del vehículo Volkswagen Gol en los cuatro recorridos VGR1, VGR2, VGR3 y VGR4.

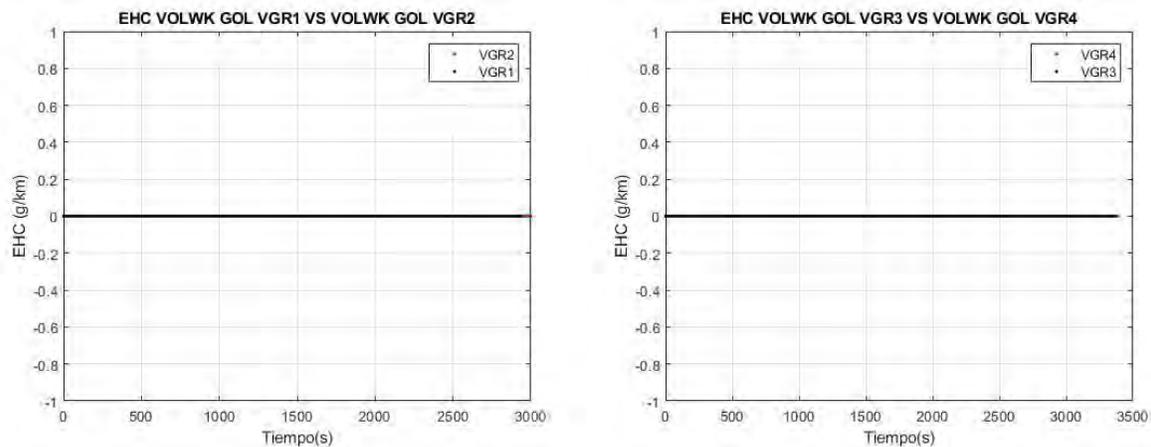


Figura 3.39 - Mediciones de factor de HC g/km en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol

La siguiente figura 3.40 muestra los valores del factor de emisión CO₂ g/km para el vehículo Volkswagen. Los valores de los recorridos VGR1 y VGR2 se encuentran entre 0 a 500 g/km de ECO₂, y algunos datos por encima de la media en ciertos instantes. El recorrido VGR3 y VGR4 presentan valores entre 0 a 500 g/km de ECO₂.

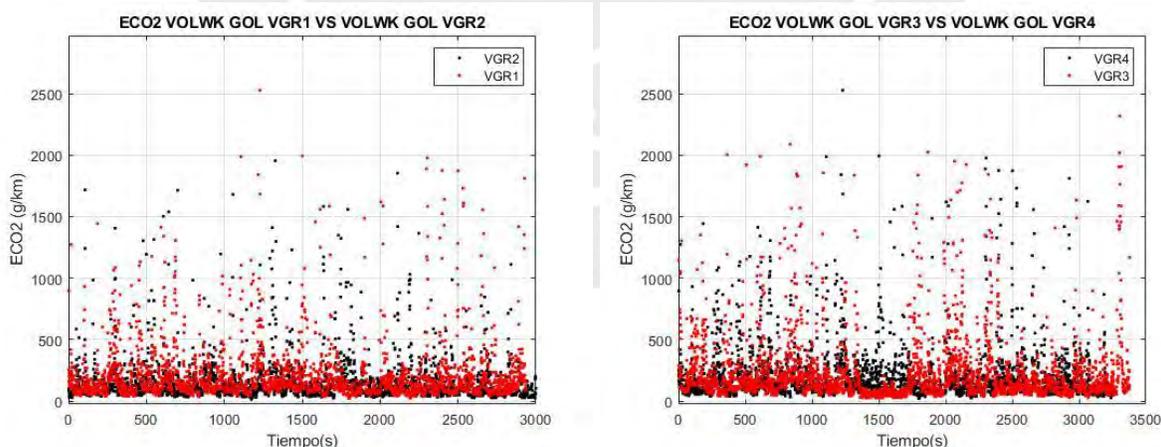


Figura 3.40 - Mediciones de factor de CO₂ g/km en condiciones de tráfico para el Volkswagen Gol.

3.2. Comparativo de factor de emisión de CO₂ entre OBDLINK MX+ y el valor obtenido por la experimentación

El presente capítulo presenta el comparativo entre los resultados obtenidos entre los datos experimentales y la medición resultados entre el sistema de diagnóstico del vehículo.

La figura 3.41 presenta el comparativo del factor de emisión de CO₂ entre el instrumento para diagnóstico vehicular (OBDLINK+) y la data procesada del sistema de adquisición de datos; los valores experimentales se encuentran por encima de los resultados del OBD con una diferencia de hasta 170 g/km para el recorrido HAR2. La metodología de cálculo para la obtención de los factores de emisión puede llevar a variaciones en los resultados, tal cual se observa en la figura 3.40. De igual manera, la calibración del equipo o la toma de datos del módulo de adquisición pueden llevar a cierto margen de error al momento de captar los datos, tal como se muestra en la figura.

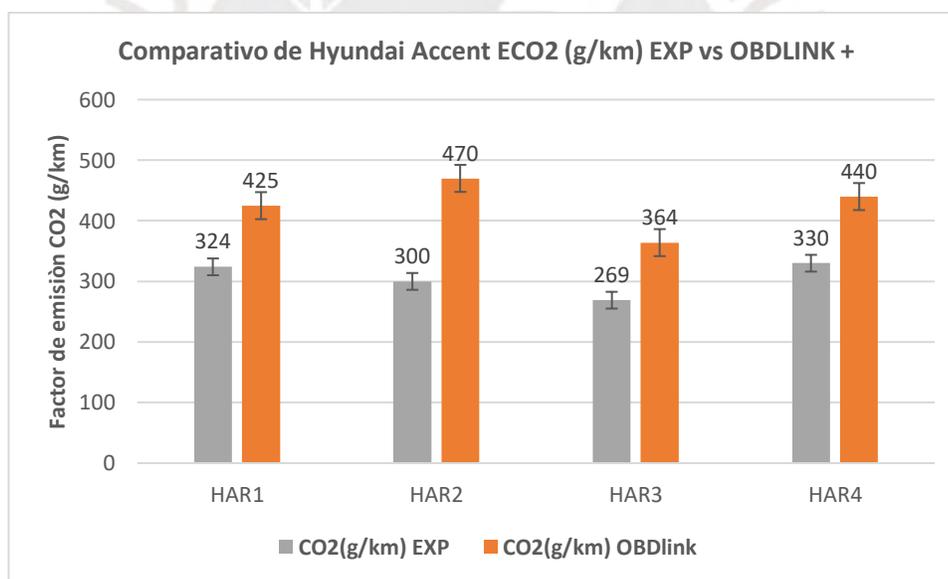


Figura 3.41 Comparativo de ECO₂ (g/km) OBDLINK + vs Experimental – Hyundai Accent

En la figura 3.42 se observa la variación del factor ECO₂ para el vehículo Hyundai Elantra. En esta figura se observa que la diferencia obtenida entre el OBD y los datos experimentales son menores, en comparación, con el modelo Hyundai Accent. Teniendo diferencias de hasta 32 g/km de ECO₂

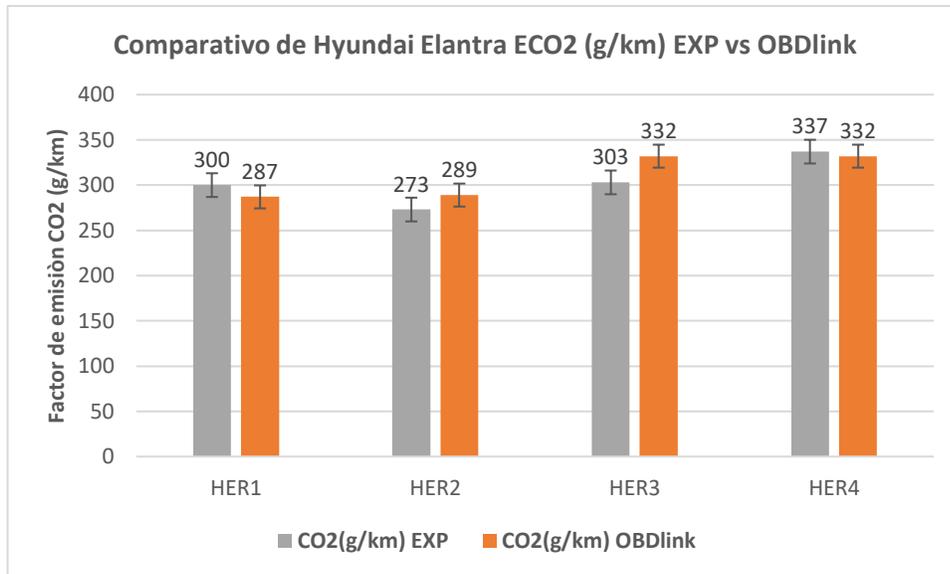


Figura 3.42 Comparativo de ECO2 (g/km) OBDLINK + vs Experimental – Hyundai Elantra.

La figura 3.43 presenta el comparativo de ECO2 entre los recorridos del vehículo Rav4, en los cuales podemos observar que los valores experimentales se encuentran por encima del OBDLINK, caso contrario con el vehículo Hyundai Accent. Los valores presentes tienen como máxima variación en 55 g/km para el recorrido TRVR4.

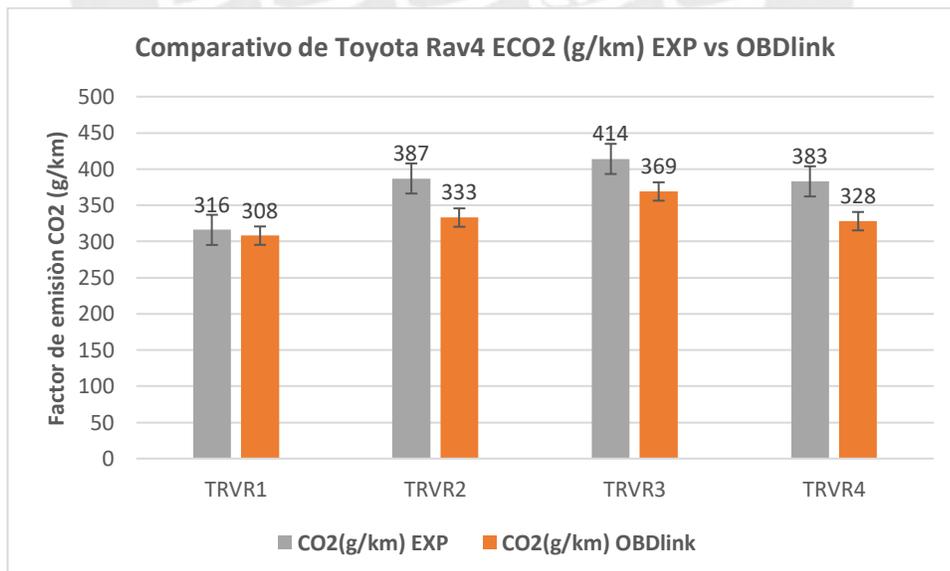


Figura 3.43 Comparativo de ECO2 (g/km) OBDLINK + vs Experimental – Toyota Rav4.

En la figura 3.44 se observa la variación del ECO_2 para el modelo Toyota Yaris, en el cual se observa que los valores se encuentran cercanos, salvo para el recorrido TYR3, el cual presenta una variación de 22 g/km de ECO_2 . Se puede observar que para el recorrido TYR1 el valor experimental está por encima del OBD, mientras que para los otros tres recorridos el valor del OBD está por encima del experimental.

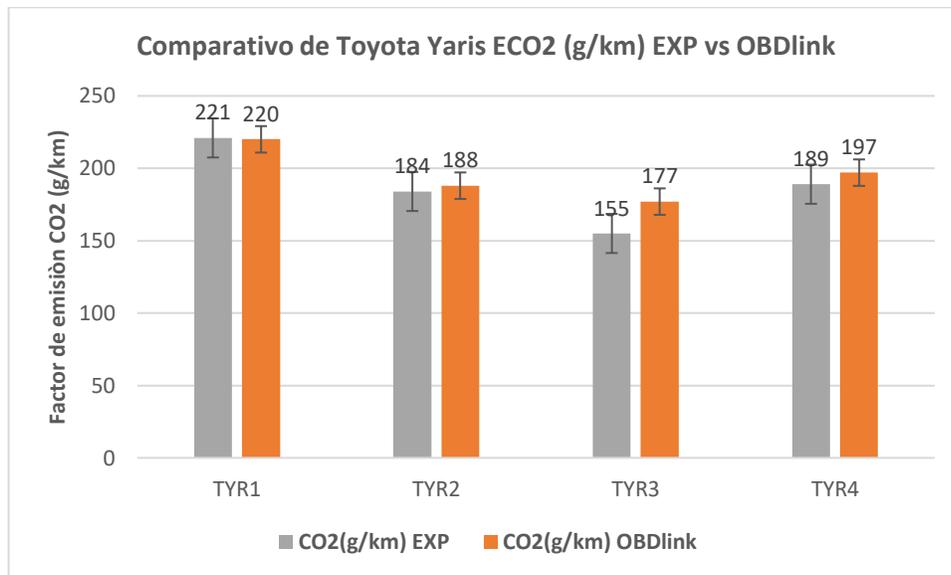


Figura 3.44 Comparativo de ECO_2 (g/km) OBDLINK + vs Experimental – Toyota Yaris.

La figura 3.45 presenta la comparativa entre el valor experimental de ECO_2 del modelo Volkswagen Gol, en el cual se observa que los valores del OBD están por encima de los experimentales; además, se observa que la variación del VGR3 es de 135 g/km de ECO_2 .

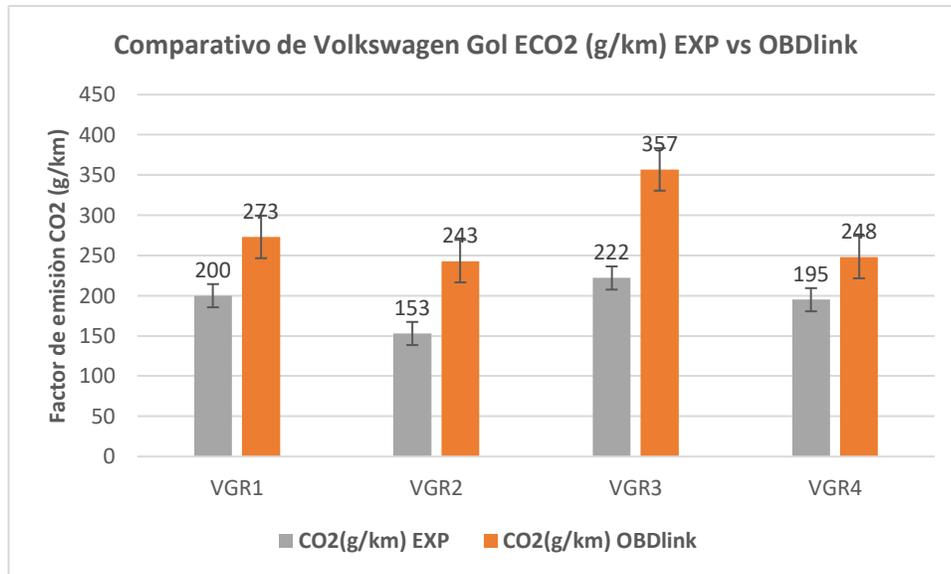


Figura 3.45 Comparativo de ECO2 (g/km) OBDLINK + vs Experimental – Volkswagen Gol.

3.3. Comparativo de factor de emisión de CO₂ entre COPERT y el valor obtenido por la experimentación

En este capítulo se presenta la comparación entre los resultados obtenidos de los datos experimentales vs el cálculo del programa COPERT.

La figura 3.46 presenta el comparativo entre el factor de emisión de CO₂ entre los resultados experimentales y el resultado obtenido por el programa COPERT. Los resultados de la experimentación son mayores al valor obtenido del cálculo del programa COPERT, la diferencia entre resultados en el recorrido HAR1 llega hasta 110 g/km, mientras que para el HAR4 de 116 g/km siendo estos los dos recorridos con mayor diferencia.

Los resultados del recorrido HAR2 presentan una diferencia de 86 g/m de ECO2 y del HAR3 de 45 g/m. El valor comparativo del programa COPERT presenta un valor constante de 214 g/km.

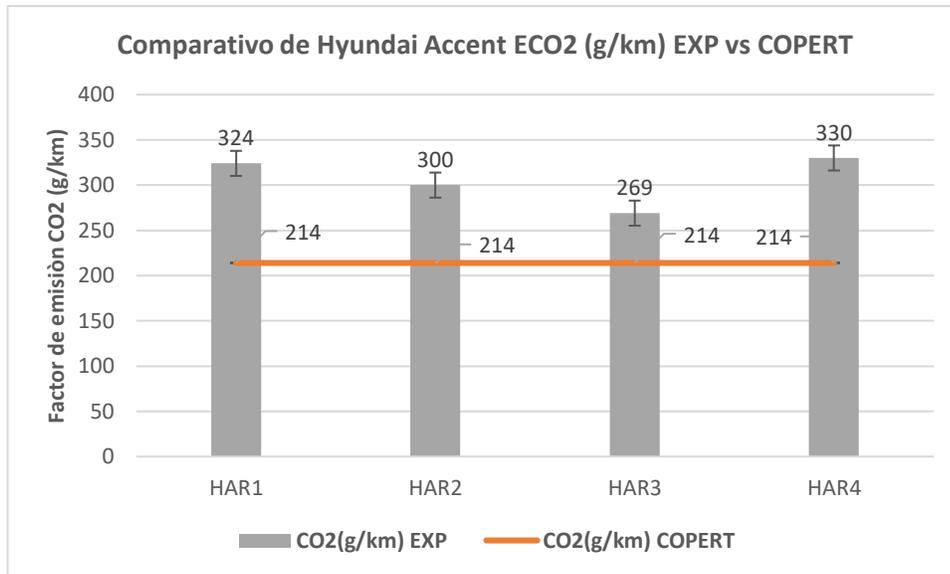


Figura 3.46 Comparativo de ECO2 (g/km) COPERT vs Experimental – Hyundai Accent.

La figura 3.47 presenta los resultados de la comparación entre los factores de emisión de CO₂ obtenidos de los datos experimentales de los cuatro recorridos del vehículo Hyundai Elantra y el resultado del cálculo obtenido del programa COPERT. El recorrido HER2 presenta una diferencia de 59 g/m de ECO₂, mientras que los recorridos HER1 y HER3 presentan una diferencia cercana de 86 y 89 g/m de ECO₂; no obstante, el recorrido HER4 una diferencia de 123 g/km, esto debido a una mayor quema de combustible, generando una mejor combustión con respecto a los otros recorridos.

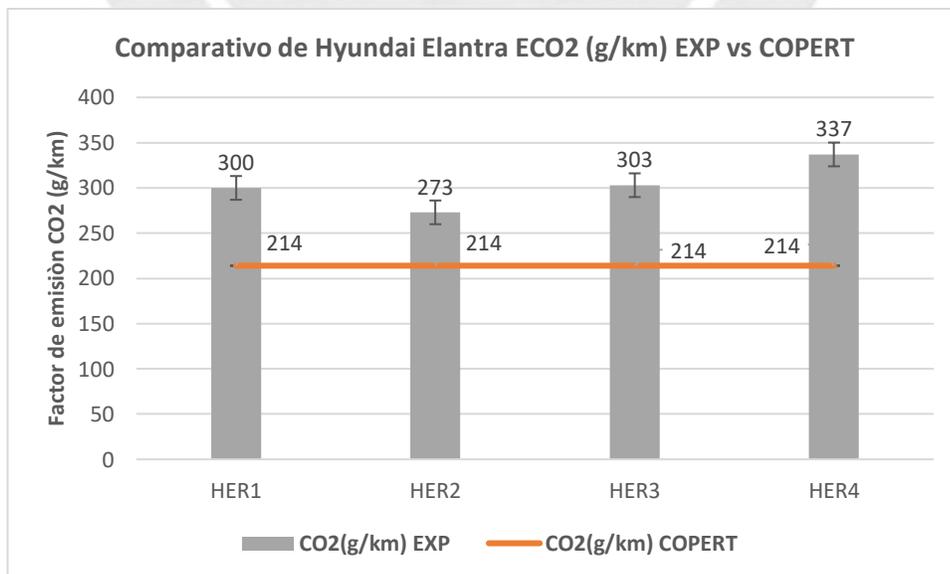


Figura 3.47 Comparativo de ECO2 (g/km) COPERT vs Experimental – Hyundai Elantra.

La figura 3.48 presenta la comparación del ECO_2 entre los recorridos del Toyota Rav4 y el resultado del programa COPERT. Los cuatro recorridos presentan una diferencia por encima de los 100 g/km de ECO_2 , siendo el mayor de estos el recorrido TRVR3 con una diferencia de 200 g/km generando una mejor combustión y mayor quema de combustible; mientras que el recorrido TRVR1 presenta una diferencia de 102 g/km siendo el menor de los cuatro recorridos.

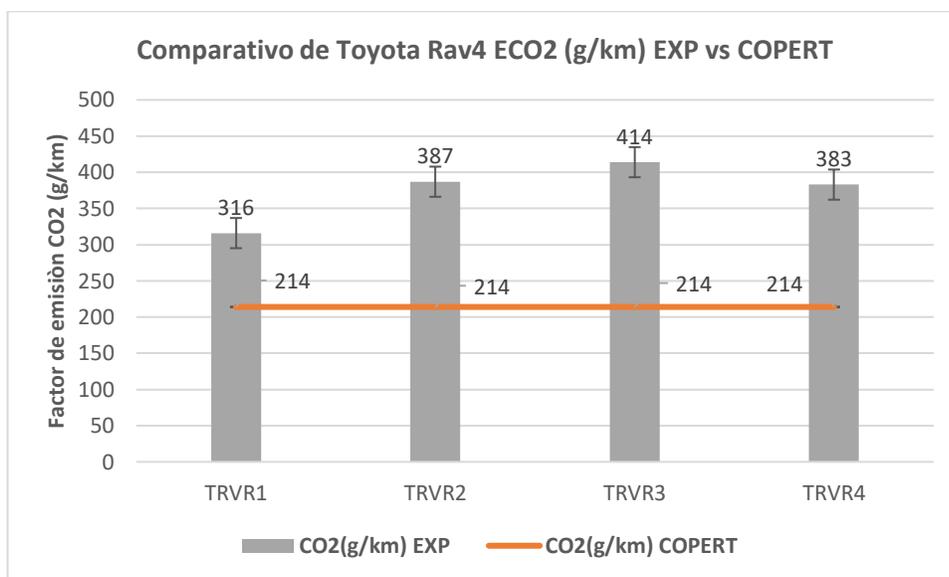


Figura 3.48 Comparativo de ECO_2 (g/km) COPERT vs Experimental – Toyota Rav4.

El comparativo entre los resultados experimentales del factor de emisión de CO_2 y los resultados del programa COPERT se visualizan en la figura 3.49, en el cual se observa los cuatro recorridos del Toyota Yaris. Los recorridos TYR2, TYR3 y TYR4 presentan valores por debajo del resultado del programa COPERT, mientras que el recorrido TYR1 por encima, siendo la diferencia de 6 g/km. La diferencia del recorrido TYR3 es de 59 g/km, siendo el valor mayor del programa COPERT.

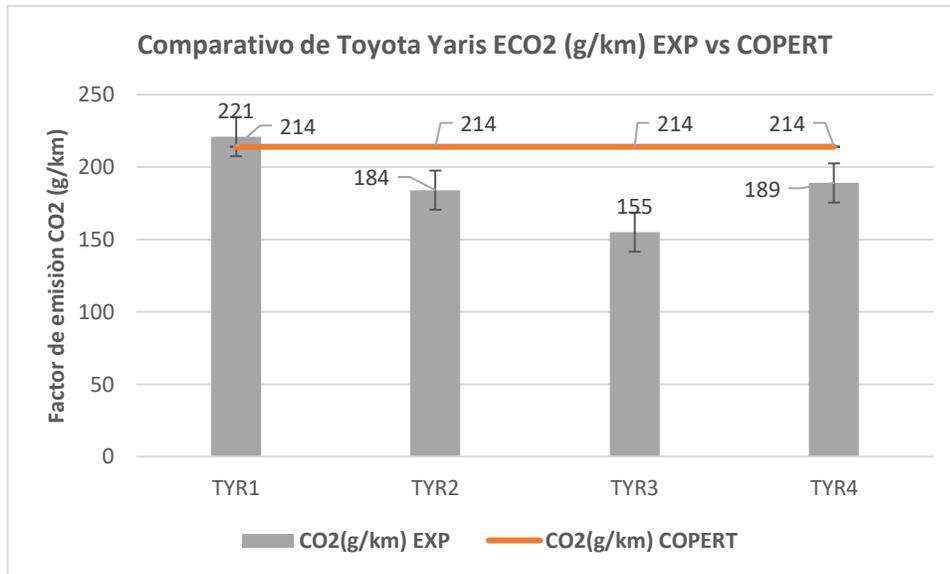


Figura 3.49 Comparativo de ECO₂ (g/km) COPERT vs Experimental – Toyota Yaris.

La figura 3.50 presenta la comparativa entre los resultados experimentales de ECO₂ con el resultado del programa COPERT. Los recorridos VGR1, VGR2 y VGR4 tienen resultados por debajo del obtenido del programa COPERT, siendo la mayor diferencia de 61 g/km de ECO₂. El resultado del recorrido VGR3 presenta una diferencia de 8 g/km de ECO₂ a favor de los resultados experimentales.

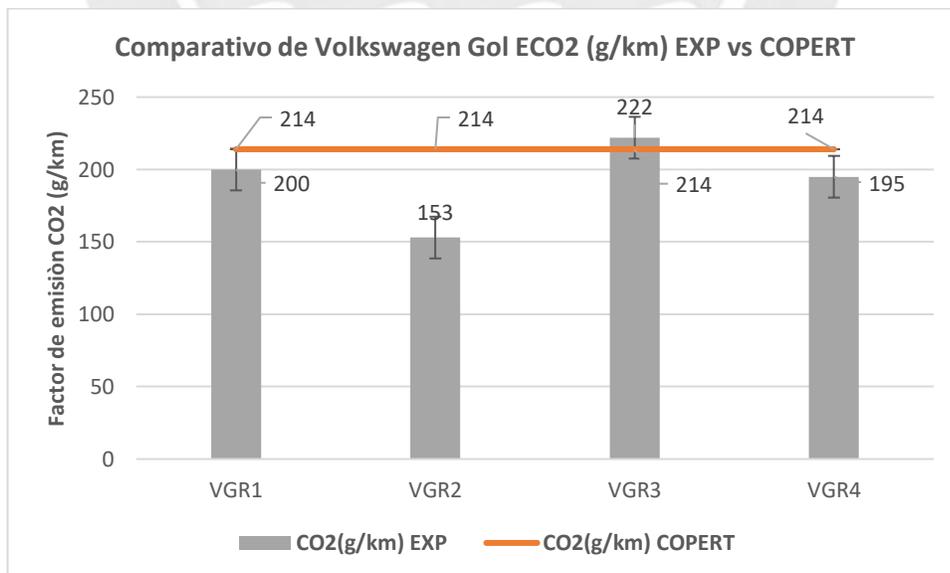


Figura 3.50 Comparativo de ECO₂ (g/km) COPERT vs Experimental – Volkswagen Gol.

CONCLUSIONES

A partir del trabajo experimental realizado se puede concluir que la viabilidad de realizar un estudio, para describir el comportamiento de los gases contaminantes emitidos por vehículos livianos a gasolina que circulan en Lima Metropolitana, genera respuestas ante la necesidad de mejorar la calidad del aire en distintos lugares de la ciudad. Por esta razón, el parque automotor es uno de los principales contribuyentes al trabajo realizado, siendo uno de los vehículos de prueba el Hyundai Accent 2012, el cual cuenta con una cilindrada de 1499 cc y fabricado en el año 2012; el vehículo Hyundai Elantra de cilindrada 1797 cc fabricado en el 2013, de igual manera el Volkswagen GOL de 1498 cc y fabricado en el 2021, siendo este el más moderno de los vehículos. El modelo Toyota Yaris fue fabricado en el 2008 de 1296 cc, siendo el vehículo con menor cilindrada, mientras que el Toyota Rav4 presenta una cilindrada de 1998 cc y fabricado en el 2014, siendo el vehículo de mayor cilindrada. El OBDLINK + y el sistema de adquisición de datos fueron compatibles con los cinco vehículos obteniendo datos de funcionamiento en condiciones reales de tránsito a diferentes horas y recorridos. Se implementó un modelo de adquisición de datos con la finalidad de medir las concentraciones de los gases de escape en tiempo real a través de un analizador de gases y estimar los factores de emisión para los análisis correspondientes.

Para el presente estudio se realizó una campaña de medición con diferentes recorridos, los cuales son mencionados en el subcapítulo 3.2, en los cuales se consideran diferentes vías y horarios. Los recorridos realizados para el modelo Hyundai Accent se encuentran en un promedio de 7200s, mientras que el Hyundai Elantra de 4100s, el Toyota Rav4 de 3100s, el Toyota Yaris de 6000s y el Volkswagen Gol de 2900s. Los recorridos se realizaron en Lima Metropolitana a diferentes velocidades y horarios manteniendo un procedimiento para una correcta medición de datos. Por ello, los resultados obtenidos, mediante la experimentación, representan datos concretos, los cuales presentan ciertas variaciones entre los vehículos, siendo la diferencia de años, el tiempo de uso de los vehículos, la cilindrada de estos, los recorridos y los tiempos promedios de medición por vehículo. La diferencia entre rutas por cada recorrido generó variaciones en las concentraciones de los gases de escape para un mejor análisis de los factores de emisión. En conclusión, la campaña de medición en diferentes vías del área metropolitana de Lima genera una variabilidad entre los recorridos, debido a las diferentes rutas y distintos horarios resultando en concentraciones diferentes. Los incrementos repentinos de velocidades, el frenado para cambio de dirección, las condiciones de tráfico, el horario, entre otros, proporcionan una mayor diversidad de datos para el análisis.

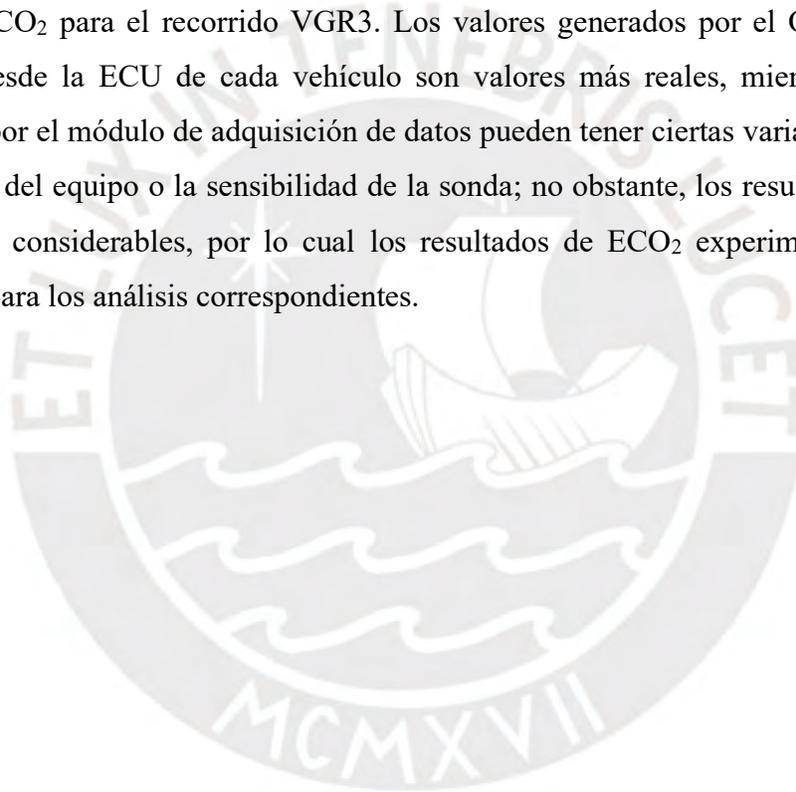
Se desarrolló el procesamiento de datos adquiridos en base al modelo de cálculo presentado en los capítulos anteriores, en el cual se utilizan las concentraciones en porcentaje obtenidas del módulo de adquisición de datos. El analizador de gases obtuvo las concentraciones de los gases, CO, CO₂, NO_x, HC, los cuales fueron procesados para obtener los factores de emisión. La mala quema de combustible generada por los motores discontinuados, sin un mantenimiento adecuado, contribuye a las altas emisiones de hidrocarburos no quemados o HC, NO_x y monóxido de carbono CO. En el estudio conducido, los vehículos más antiguos, tales como el Hyundai Accent y Toyota Yaris emiten una mayor cantidad de HC y NO_x, comparado a los vehículos más modernos, tales como el Toyota Rav4 o el Volkswagen Gol. A mayor velocidad se requerirá mayor gasto de aire-combustible, volviendo la mezcla más rica, disminuyendo el factor lambda para incrementar el dosado relativo, y con esto aumentar el combustible inyectado en la mezcla, por lo cual los vehículos con mayor cilindrada no necesariamente van a consumir mayor cantidad de combustible. Como se observa en la figura 3.36 el modelo Volkswagen Gol consume hasta 3000 g/km de combustible en ciertos instantes,

teniendo una cilindrada de 1498cc; mientras que el Toyota Rav4 de mayor cilindrada obtiene consumos de combustible de hasta 1200 g/km. Por otro lado, el vehículo Yaris presento la mayor cantidad de factores de emisión de HC y NO_x, entre los 5 vehículos, una de las posibles razones sería el año de fabricación de este, al tratarse del vehículo más antiguo de la flota. Los factores de emisión de NO_x y HC presentaron datos puntuales para los vehículos, inclusive valores de 0 para el Hyundai Elantra como se observa en la figura 3.12 y 3.14; por otro lado, el Hyundai Elantra y Volkswagen Gol presentan valores de 0 en los factores de emisión de HC para sus cuatro recorridos del Hyundai Elantra HER1/HER2/HER3/HER4 y los cuatro del Volkswagen Gol VGR1/VGR2/VGR3/VGR4.

Los gráficos elaborados de los factores de emisión, en los cuales se puede visualizar los resultados vs el tiempo, permiten el análisis de estos. Además, los factores de emisión de CO₂ obtenidos experimentalmente presentan resultados similares con los valores del programa COPERT. El programa COPERT puede retener la información de diferentes usuarios a nivel mundial, los cuales, gracias a sus experiencias y datos recopilados, promueven el uso de este programa, el cual puede aportar resultados de hasta 30 años a futuro, en comparación, con los resultados obtenidos de forma experimental, generando concentraciones instantáneas, y con esto obtener los factores de emisión contaminantes en g/km. En conclusión, los diferentes avances tecnológicos de los programas, desarrollados para la estimación de factores de emisiones contaminantes, presentan variaciones en los resultados, debido a los datos de ingreso y las condiciones a las que el vehículo va a operar; además, de las condiciones geográficas, la cantidad de vehículos y los estándares del país. Por ello, la diferencia puede ser notoria con respecto a los valores reales experimentados, como se observa en la figura 3.45, las emisiones de CO₂ llegan hasta 324 g/km para el recorrido HAR1 generando una diferencia de 110 g/km de ECO₂ con respecto al resultado del programa COPERT siendo este un valor constante de 214 g/km de ECO₂, mientras que la figura 3.47 el recorrido TRVR3 presenta una diferencia de hasta 200 g/km de ECO₂. Los resultados experimentales de los recorridos TYR y VGR son menores al resultado constante del programa COPERT, como se visualiza en la figura 3.48 y figura 3.49, teniendo una diferencia de 61 g/m para el recorrido VGR y de 59 g/km para el TYR3. Las estimaciones obtenidas de estos programas no son certeras, debido a la interfaz que estos utilizan, recopilando data por diferentes usuarios; no obstante, su funcionalidad es

competente, gracias a los valores aproximados que este genera y las tecnologías se puede obtener una línea de tendencia a futuro.

Los resultados experimentales del ECO_2 son similares a los obtenidos por el OBDLINK+ en cada recorrido. Como se observa en la figura 3.41 los valores de los recorridos HER1, HER2, HER3 y HER4 son similares a los obtenidos por el OBDLINK+, siendo la mayor diferencia de 29 g/km para el recorrido HER3; de igual manera, el recorrido TYRI presenta una diferencia de 1g/km como se observa en la figura 3.43. La figura 3.41 y figura 3.45 presentan la mayor diferencia entre comparativos, siendo de 170 g/km de ECO_2 para el recorrido HAR2 y de 135 g/km de ECO_2 para el recorrido VGR3. Los valores generados por el OBDLINK+ siendo medidos desde la ECU de cada vehículo son valores más reales, mientras que los datos obtenidos por el módulo de adquisición de datos pueden tener ciertas variaciones, debido a la calibración del equipo o la sensibilidad de la sonda; no obstante, los resultados no presentan variaciones considerables, por lo cual los resultados de ECO_2 experimentales pueden ser utilizados para los análisis correspondientes.



BIBLIOGRAFÍA

- Aliaga, R. (2016). *Evaluación comparativa del consumo de combustible e índice de emisiones de un vehículo liviano funcionando con dos mezclas de gasolina y etanol (e7.8 y. Lima)* [Tesis para obtener el título para obtener el grado de ingeniero mecánico]. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÒLICA DEL PERÚ.
- Asociación Automotriz del Perú (AAP) (2019, marzo 1). *Los efectos de un parque automotor escaso y antiguo*. Asociación Automotriz del Perú. Obtenido de: <https://aap.org.pe/aap-los-efectos-de-un-parque-automotor-escaso-y-antiguo-2/>
- Asociación Automotriz del Perú (AAP) (2019, marzo 1). *Informe del Sector Automotor*. Asociación Automotriz del Perú. Lima: Subgerencia de Comunicaciones y Marketing.
- Barin. (s/f). *Los Efectos en la Salud de los Gases de Combustión*. Barin.es. Recuperado el 17 de junio de 2023, de <https://www.barin.es/actualidad/2021/efectos-salud-gases-combustion/>
- Carrera, H. E., Portillo, J., Mejia, G. M., & Mendoza, A. (2015). *Emissions of light-duty vehicles with respect to cruising speed under real-world driving conditions*. Journal of Environmental Engineering (New York, N.Y.), 141(7). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0000935](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000935)
- Conversation, T. (15 de Setiembre de 2020). *Climate explained: does your driving speed make any difference to your car's emissions?* Obtenido de <https://theconversation.com/climate-explained-does-your-driving-speed-make-any-difference-to-your-cars-emissions-140246>
- Conversation, T. (2020). *The Conversation*. Obtenido de The Conversation: <https://theconversation.com/climate-explained-does-your-driving-speed-make-any-difference-to-your-cars-emissions-140246>
- Cuisano J., Basagoitia J., & Quirama, L. (2020). *Development of an urban driving cycle in the Lima Metropolitan Area, Perú*.
- Dercocenter. (2021 de Setiembre de 2021). *Que es velocidad crucero y como funciona en los vehículos* . Obtenido de <https://www.dercocenter.cl/noticias/que-es-velocidad-crucero-y-como-funciona-en-los-vehiculos>
- EPA. (22 de Marzo de 2015). *Air Emissions Factors and Quantification*. Obtenido de <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification#:~:text=An%20emissions%20factor%20is%20a,emitted%20with%20an%20industrial%20activity.>
- Hector, C. (2015). *Emmisions of Light-Duty Vehicles with Respect to Cruising Speed under Real World Driving Conditios*. Lima.
- Heywood, J. (1998). *Internal combustion engine fundamentals*. Massachusetts Institute of Technology.
- HONDA, W. (Setiembre de 2018). *What are the advantages and disadvantages of cruise control?* . Obtenido de <https://www.waterloohonda.com/en/news/view/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-cruise-control-/76941>
- IMT, I. M. (8 de Setiembre de 2014). *Regulación de emisiones contaminantes de los motores de combustión interna*. Obtenido de <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=396&IdBoletin=149>

- IPSOS. (26 de Marzo de 2018). *Estadística Poblacional 2016*. Obtenido de <https://www.ipsos.com/es-pe/estadistica-poblacional-2016#:~:text=Las%20principales%20ciudades%20son%20Lima,la%20poblaci%C3%B3n%20total%20del%20Per%C3%BA>.
- IQAir. (2018). *2018 World Air Quality Report*. AirVisual.
- Leonidas, N., & Zissis, S. (2000). *COPERT III computer programme to calculate emissions from road transport*.
- Lima Como Vamos. (2015). *Sexto informe informe de resultados sobre calidad de vida*.
- MINAM. (13 de Octubre de 2005). *Sistema Nacional de Información Ambiental*. Obtenido de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-general-ambiente#:~:text=Ley%20N%C2%B0%2028611%20.,%2D%20Ley%20General%20del%20Ambiente.&text=La%20presente%20Ley%20N%C2%B0,gesti%C3%B3n%20ambiental%20en%20el%20Per%C3%BA>.
- MINAM. (13 de Setiembre de 2017). *Limites Maximos Permisibles para emisiones de vehículos automotres a fin de mejorar la calidad de aire*. Obtenido de <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/2017/11/30/ministerio-del-ambiente-aprobo-limites-maximos-permisibles-para-emisiones-de-vehiculos-automotores-a-fin-de-mejorar-calidad-del-aire/>
- MINAM. (23 de 01 de 2018). *Ministerio del ambiente prepublica los índices de nocividad de combustibles para el período 2018-2019*. Obtenido de <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/ministerio-del-ambiente-prepublica-los-indices-de-nocividad-de-combustibles-para-el-periodo-2018-2019/>
- MINAM. (2021). *Calidad de combustible*. Obtenido de BICENTENARIO PERÚ : <https://infoaireperu.minam.gob.pe/indice-de-nocividad-de-combustible/#:~:text=Asimismo%2C%20establece%20la%20obligatoriedad%20de,50%20ppm%2C%20a%20nivel%20nacional>.
- MINAM. (2021). *Efectos de la contaminación del aire*. Obtenido de <https://infoaireperu.minam.gob.pe/efectos-de-la-contaminacion-del-aire/>
- MINSA. (2018). *Boltein Estadístico II*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/publicaciones/boletines/boletin_estadistico_II_semestre_2018.pdf
- Ntziachristos, L. (17 de April de 2016). *COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model*.
- Organización Mundial de la Salud OMS. (13 de Setiembre de 2018). *Calidad de aire y salud*. Obtenido de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Payri, F. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Barcelona: Reverté, S. A.
- Posada, C. (26 de Febrero de 2018). *Aumento continuo del parque automotor, un problema que urge solucionar*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://apps.camaralima.org.pe/repositori/oaps/0/0/par/r816_3/comercio%20exterior.pdf
- Roorda, A. (2015). *Development of simulated driving cycles for light, medium, and heavy duty trucks: Case of the Toronto Waterfront Area. Tranpostation Research Part D: Transport and Enviornment 34, 255-266*. Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.trd.2014*11*010

- Rondón, A. (2020). *Análisis de la relación entre la Potencia Específica vehicular y las emisiones en un vehículo liviano que opera con dos composiciones de gasolina-etanol*. [Tesis para obtener el título para obtener el grado de ingeniero mecánico] PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ .
- SENAMHI. (21 de Octubre de 2020). *Concentraciones de contaminantes del aire alcanzan sus valores históricos en lima metropolitana y el callao*. Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=lima&p=prensa&n=1218>
- SENAMHI. (2021). *Estimación de emisiones vehiculares en Lima Metropolitana* . Lima. Obtenido de https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/454/Estimaci%C3%B3n-emisiones-vehiculares-Lima-Metropolitana_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- SINIA. (2005). *Aprueban Reglamento de la Ley N° 28245, Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental (28.01.05)*. Obtenido de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/reglamento-ley-ndeg-28245-ley-marco-sistema-nacional-gestion-ambiental#:~:text=reglamenta%20la%20Ley%20N%C2%B0,ministerios%2C%20organismos%20p%C3%ABlicos%20descentralizados%20e>
- SINIA (2005). Obtenido de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/reglamento-ley-ndeg-28245-ley-marco-sistema-nacional-gestion-ambiental#:~:text=reglamenta%20la%20Ley%20N%C2%B0,ministerios%2C%20organismos%20p%C3%ABlicos%20descentralizados%20e>
- SINIA (07 de junio de 2017) . *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementaria*. Obtenido de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueban-estandares-de-calidad-ambiental-eca-para-aire-y-e-decreto-supremo-n-003-2017-minam-1529835-1/>
- SOLUTIONS, O. (2023). *OBDLINK*. Obtenido de OBDLINK: <https://www.obdlink.com/products/obdlink-mxp/>
- TOMTOM. (2022). *TOMTOM Traffic Index*. Obtenido de https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/
- Turns, S. R. (2012). *An Introduction to Combustion*. New York: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.