



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

MEDICIÓN A BORDO DE LA MASA DE CONTAMINANTES, A PARTIR DE UNA TARJETA
ADQUISIDORA DE DATOS Y DE UN ANALIZADOR COMERCIAL DE CINCO GASES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
VÁZQUEZ AGUILAR FERNANDO

TUTOR
DR. ROGELIO GONZÁLEZ OROPEZA
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO

ENERO 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Solorio Ordaz Francisco Javier
Secretario: Dr. Vicente y Rodríguez William
Vocal: Dr. González Oropeza Rogelio
1^{er}. Suplente: Dr. Jazcilevich Diamant Aron
2^{d o}. Suplente: M. en I. González Pineda Francisco

Lugar donde se realizó la tesis: Ciudad de México, Ciudad Universitaria

TUTOR DE TESIS:

Dr. Rogelio González Oropeza

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente el apoyo del Proyecto PAPIIT: IG 100914-2: **Integración de un Sistema para la Obtención y Monitoreo de Datos de Vehículos Automotores, basado en los Protocolos CAN Y OBD-II**, que ha dotado de recursos materiales a este grupo de investigación y que nos ha ayudado a los estudiantes participantes a concluir nuestros estudios.

En primer lugar, me gustaría expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en particular al Dr. Rogelio González Oropeza, director de esta investigación, por la orientación, paciencia y sobre todo por el apoyo y conocimiento que me ha brindado todo el tiempo.

A los profesores M.I. Francisco González Pineda, Dr. José Fernando García Puertos, M.I. Pedro Ignacio Rincón y M.I. Roberto Giovanni Ramírez Chavarría por el apoyo y sus consejos que me brindaron durante este proyecto.

A mis compañeros Elnatan Eder Torres González y José Froylan Hernández Arellano que invirtieron su tiempo y conocimientos para ayudarnos con este trabajo de investigación.

Y a todas aquellas personas que, de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hacemos extensivo nuestro más sincero agradecimiento.

INDICE

OBJETIVO	5
INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 1 Marco teórico	7
1.1. Contaminación atmosférica	7
1.1.1. Principales fuentes de contaminación atmosférica	7
1.1.2. Tipos de contaminantes y sus efectos	8
1.2. Analizadores de gases	12
1.2.1. Principios de funcionamiento	13
1.2.2. CVS, PEMS, FTIR	15
1.3. Dinamómetro de banco y dinamómetro de chasis	18
1.4. Sistema de Diagnóstico a Bordo	21
CAPÍTULO 2 Resumen de normas vigentes	24
2.1. Normativa internacional	24
2.2. Normativa nacional	28
CAPÍTULO 3 Diseño experimental	32
3.1. Equipo experimental	32
3.1.1. Sistema UNAM ADM	32
3.1.2. Analizador de gases	33
3.1.3. Vehículo de pruebas	35
3.2. Planeación de los ensayos	35
3.2.1. Traza de rutas	35
3.2.2. Parámetros programados	36
3.2.3. Instrumentación del ensayo experimental	37
3.2.4. Ejecución, monitoreo y almacenamiento de datos de ensayos experimentales	39
3.3. Cálculo de masa de emisiones contaminantes	40
CAPÍTULO 4 Análisis de resultados	51
CONCLUSIONES	61
REFERENCIAS	63
ANEXO A	65
ANEXO B	85

OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es medir a bordo la masa de contaminantes emitidos por un vehículo, con ayuda de un sistema adquirente de datos y un analizador comercial de cinco gases.

La Facultad de Ingeniería anteriormente tenía, entre las pocas instituciones en el país, un laboratorio de pruebas de medición de emisiones contaminantes provenientes de vehículos automotores, consumo de combustible, aditivos, dispositivos, etc. Tras ser derrumbado el laboratorio, se ha tenido la necesidad de realizar pruebas de medición de emisiones con métodos alternos.

Bajo este contexto, es indispensable desarrollar un método de medición de masa de contaminantes en ruta, y no solo medir la concentración en volumen de los gases. La concentración de las emisiones no es suficiente para determinar que vehículos contaminan más, ya que estas concentraciones no toman en cuenta la cantidad (masa) de contaminantes que arroja un vehículo, es decir, el volumen de gases que cada motor consume y emite (tamaño del motor, cilindrada y/o número de cilindros).

INTRODUCCIÓN

Como se ha mencionado desde el título, el objetivo principal a desarrollar es el cálculo de la masa de gases contaminantes provenientes de un vehículo automotor. Esto tiene relevancia y significa una aportación importante para este tipo de equipos que miden emisiones porque no se utiliza un medidor de flujo másico directamente en el tubo de escape del vehículo, sino que a partir de recopilar información de la computadora del motor por medio de una tarjeta electrónica adquirente de datos y con el uso de una banca comercial de cinco gases (Andros 6600) se puede construir el equipo que se describe con detalle más adelante.

Se han planteado los ensayos experimentales principalmente con un vehículo Toyota Corolla 2009 porque la comunicación con la computadora ha sido clara y fácil de conseguir. Dichos ensayos se realizaron en diversos circuitos dentro de Ciudad Universitaria, con el fin de que el sistema de medición tuviera repetibilidad.

El presente trabajo se divide en cuatro capítulos estructurados de la siguiente manera:

Capítulo 1: En este primer capítulo se introducen de manera breve las nociones básicas que describen un panorama general sobre emisiones contaminantes, analizadores de gases, dinamómetros de banco y chasis, sistema OBD-II, etc.

Capítulo 2: El segundo capítulo aborda las principales normas de contaminación atmosférica a causa de fuentes móviles, vehículos automotores. Las normas que se presentan son internacionales y nacionales, las cuales tienen como objetivo el regular las emisiones contaminantes mediante métodos de prueba.

Capítulo 3: El tercer capítulo está enfocado en la planeación de las pruebas experimentales, detallando las rutas de los ensayos, el equipo utilizado, instrumentación del equipo, la ejecución de los ensayos experimentales, los modelos matemáticos y las consideraciones que se tuvieron en este proyecto.

Capítulo 4: En el cuarto y último capítulo se realiza el análisis de resultados, donde se muestran los datos obtenidos durante las pruebas y gráficas de los resultados para una mejor comprensión y análisis de emisiones contaminantes.

Posteriormente, se incluyen las conclusiones del trabajo con las propuestas de mejora y trabajo a futuro.

En esta tesis también se adjunta dos anexos, Anexo A y Anexo B. En el Anexo A se incluyen mapas de funcionamiento del motor y de emisiones contaminantes en 2D, mientras que en el Anexo B se incluyen mapas 3D.

Finalmente se citan las referencias consultadas en cada uno de los cuatro capítulos.

Después de que el lector lea lo anterior tendrá un panorama más claro de la aportación de este trabajo.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica o contaminación del aire es actualmente uno de los problemas ambientales más severos a nivel mundial.

Se entiende por contaminación atmosférica a la presencia en el aire de sustancias en cantidad que alteren o impliquen riesgo para la salud de los seres vivos, dañen los recursos naturales o elementos materiales.

A pesar que se considera que siempre ha existido la contaminación atmosférica, debido a causas naturales, el hombre empezó a contribuir con este tipo de contaminación desde que descubrió el fuego, sin embargo, en un principio la contribución era escasa. A medida que el hombre ha avanzado en cuanto a tecnología la aportación ha aumentado, principalmente con la Revolución Industrial a mediados del siglo XVIII.

Existen numerosos antecedentes históricos de los graves efectos que la contaminación tiene sobre los seres humanos. Uno de los episodios más graves acontecidos fue la llamada “Niebla Asesina” en el año 1948 en Denora, Pennsylvania, que mató a 20 personas y ocasionó problemas de salud a otras debido a los gases formados por fluoruro de hidrógeno y dióxido de azufre emanados de chimeneas de empresas ubicadas en esa localidad. Años más tarde, año 1952, ocurrió un suceso más grave en la ciudad de Londres con un fenómeno nombrado “La Gran Niebla” la cual fue originada por el crecimiento incontrolado de la quema de combustibles fósiles en la industria y transporte. Se estima que “La Gran Niebla” causó la muerte de miles de londinenses y dejó otros más enfermos.

Lamentablemente México no ha sido la excepción a este tipo de eventos, en 1950 en la ciudad Poza Rica Veracruz una refinería de gas natural descargó sulfuro de hidrógeno en el aire y provocó la muerte de 22 personas y causó la hospitalización de muchos habitantes.

Este tipo tragedias y otras más alrededor del mundo dieron un importante impulso a la investigación de las emisiones contaminantes, a los efectos sobre la salud humana y recursos naturales; así como la implementación de políticas para combatir el problema de la contaminación del aire.

1.1.1. Principales fuentes de contaminación atmosférica

En la literatura existen distintos tipos de clasificaciones de las fuentes de contaminación atmosférica, sin embargo, en su mayoría se clasifican dependiendo su origen.

➤ Fuentes Naturales

Comprenden las emisiones de contaminantes generados por la actividad natural. Por lo general, sólo una pequeña fracción de los contaminantes de la atmosfera es emitida por fuentes naturales, entre éstas se

encuentran las erupciones volcánicas, incendios forestales, descargas eléctricas durante tormentas que dan lugar a la formación de óxidos de nitrógeno, evaporaciones salinas provenientes del mar, vientos que transfieren partículas, procesos biológicos de los seres vivos, entre otros.

➤ Fuentes Antropogénicas o Artificiales

Las fuentes antropogénicas o artificiales son consecuencia de la actividad humana. La mayor parte de la contaminación de estas fuentes procede de la combustión de combustibles fósiles, la cual es asociada como la principal causa de contaminación del aire. Entre las actividades humanas que causan contaminación existen las fuentes fijas y las fuentes móviles.

Las fuentes fijas son toda instalación establecida en un lugar que genere contaminación. Este tipo de fuentes están relacionadas con procesos industriales, comerciales y servicios, por ejemplo: refinerías, plantas de generación eléctrica, fábricas de pintura y disolventes, gasolineras, actividades domésticas, entre otras.

Las fuentes móviles consideran a las diversas formas de transporte que utilicen un motor de combustión para su funcionamiento, además de que arrojen emisiones evaporativas de combustible al ambiente. Este tipo de fuente engloba automóviles, autobuses, aviones, barcos y trenes.

Ambas fuentes contribuyen significativamente a la contaminación atmosférica.

1.1.2. Tipos de contaminantes y sus efectos

Diversos autores han clasificado a los diferentes tipos de contaminantes atmosféricos de distintos nombres. Entre las principales están los contaminantes primarios y secundarios.

Las sustancias que se encuentran en la atmósfera tal como fueron emitidas se conocen como contaminantes primarios. Se incluyen dentro de este grupo:

➤ Monóxido de Carbono (CO)

Es uno de los productos de la combustión deficiente. Es un gas inodoro, se diluye fácilmente en el aire y en lugares cerrados puede ser muy tóxico.

Los motores de combustión interna de los automóviles emiten grandes cantidades por lo que en las áreas muy urbanizadas tiende a haber una concentración excesiva de este gas.

En altas concentraciones el monóxido de carbono puede ser fatal. La intoxicación por este contaminante es uno de los tipos más comunes de envenenamiento, puede inhabilitar el transporte de oxígeno hacia las células y provocar mareos, dolor de cabeza, náuseas, estados de inconsciencia e inclusive la muerte.

➤ Dióxido de Carbono (CO₂)

La concentración de este contaminante está incrementando de forma constante debido al uso de combustibles fósiles como fuente de energía y es causante de producir el fenómeno efecto invernadero, incremento de la temperatura en la tierra.

➤ Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno son un grupo de siete gases que contienen oxígeno y nitrógeno. La formación de estos contaminantes se facilita a altas temperaturas durante la combustión. La familia de compuestos NO_x se enlistan a continuación [6]:

- ✓ N₂O Óxido Nitroso
- ✓ NO Óxido Nítrico o Monóxido de Nitrógeno
- ✓ N₂O₂ Bióxido de Dinitrógeno
- ✓ N₂O₃ Trióxido de Dinitrógeno
- ✓ NO₂ Bióxido de Nitrógeno
- ✓ N₂O₄ Tetróxido de Dinitrógeno
- ✓ N₂O₅ Pentóxido de Dinitrógeno

En realidad, los dos compuestos más predominantes de NO_x son el NO y NO₂.

El NO₂ tiene un efecto negativo en la salud, la exposición a altas concentraciones puede ocasionar daño pulmonar y a bajas concentraciones puede irritar las vías respiratorias o agravar los síntomas de enfermedades como bronquitis y pulmonía. No es sólo un gas dañino para la salud, sino que también reacciona en la atmósfera para crear ozono (O₃) y contribuye a la formación de lluvia ácida.

El monóxido de nitrógeno, también llamado óxido de nitrógeno u óxido nítrico, es un gas incoloro y poco soluble en agua. Este gas es muy inestable en el ambiente, se oxida rápidamente en presencia de oxígeno convirtiéndose en dióxido de nitrógeno y posteriormente tener los mismos efectos negativos en la salud y reaccionar en la atmósfera para formar los contaminantes mencionados en el párrafo anterior.

➤ Dióxido de Azufre (SO₂)

Se trata de un contaminante atmosférico primario, gaseoso y tóxico, que se origina durante la combustión de cualquier combustible que contenga azufre.

Se combina fácilmente con las partículas de agua presentes en la atmósfera para generar lluvia ácida, causante de daños en construcciones y ecosistemas. Los impactos negativos en la salud van desde irritación en ojos, nariz y garganta, y agrava los síntomas del asma y la bronquitis. La exposición prolongada al bióxido de azufre reduce el funcionamiento pulmonar y causa enfermedades respiratorias.

➤ Hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos que en su estructura química contienen carbono e hidrógeno, el uso de estos en la actividad diaria genera una gran cantidad de sustancias que tienen un efecto negativo en la salud humana y el medio ambiente.

Se distinguen dos tipos de emisiones de hidrocarburos, los llamados Hidrocarburos No Quemados y los Compuestos Orgánicos Volátiles. Los primeros son ocasionados por una combustión incompleta, dicho de otra manera combustible no quemado que generalmente proviene de vehículos automotores. Los Compuestos Orgánicos Volátiles, o simplemente llamados COV, comprenden una vasta gama de sustancias que se originan por evaporación de hidrocarburos a condiciones de temperatura y presión ambiente, tales como: benceno, acetona, formaldehído, tolueno, propano, metano, n-pentano, entre otros.

Las principales fuentes de COV son la industria de pinturas y barnices, industria de cosméticos, industria farmacéutica, vehículos automotores, uso de solventes.

Este tipo de contaminantes afectan de forma directa a la salud, algunos de sus efectos por exposición aguda se producen principalmente en vías respiratorias, mareos, irritación de ojos y garganta, colapso, también pueden entrar a través de la piel, etc. También, a largo plazo pueden causar daño renal, hepático, pulmonar, al sistema nervioso central y periférico, incluso algunos tienen efecto cancerígeno como por ejemplo el benceno.

De manera medioambiental favorecen a la formación de contaminantes secundarios, como el ozono a nivel de suelo (ozono troposférico) y contribuyen al fenómeno de la destrucción de la capa de ozono. Además, la acumulación de hidrocarburos en la atmósfera tiene la capacidad de absorber radiación solar y potenciar el efecto invernadero.

➤ Material Particulado

Son partículas que se encuentran suspendidas en el aire. Su origen puede ser natural o antropogénico, aunque existen una variedad de fuentes naturales (polen, polvo, erupciones volcánicas, incendios forestales, etc) la mayoría proceden principalmente de la actividad humana que requiere la quema de combustibles como carbón, leña y derivados del petróleo.

Se suelen catalogar por su tamaño que va desde algunas fracciones de milímetro hasta nanómetros. Dependiendo de su tamaño las partículas pueden mantenerse flotando y se conocen como partículas suspendidas totales (PST). Las partículas cuyo diámetro es menor o igual a 10 micrómetros (10 μm) se conocen como PM10, mientras que las de diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros se conocen como PM2.5.

El tamaño de la partícula determina hasta qué parte del sistema respiratorio pueden llegar, entre más fina sea la partícula será mayor la penetración en el sistema y por lo tanto se consideran más perjudiciales a la salud. Se han asociado con diversas enfermedades respiratorias que van desde irritación de las

mucosas, crisis asmática, reducción de la función pulmonar, en mujeres embarazadas puede ocasionar disminución en el tamaño del feto, muertes prematuras por afecciones respiratorias y cardiovasculares, entre otros.

En cambio, los contaminantes secundarios se forman en la atmósfera como consecuencia de reacciones químicas entre dos o más contaminantes primarios, estas reacciones son favorecidas por la radiación ultravioleta de los rayos del sol. Entre los más importantes están:

➤ Ozono, O₃

El ozono es una sustancia constituida por tres átomos de oxígeno, esta molécula se genera por la reacción fotoquímica en las que participan principalmente NO_x, COV, Oxígeno y la radiación ultravioleta.

El ozono juega dos roles importantes dependiendo la región de la atmósfera donde se encuentre. La formación de ozono en la estratósfera (aproximadamente 50 km de altitud) es similar a la que ocurre en la tropósfera (6 a 20 km de altitud), excepto que el ozono estratosférico se produce después de la disociación del oxígeno molecular, mientras que en la tropósfera se produce después de la disociación de NO_x y COV.

A nivel troposférico se convierte en un problema ya que, en concentraciones suficientes, puede provocar daños en la salud humana o en la vegetación y contribuye a generar un calentamiento en la superficie de la tierra.

La exposición al ozono se ha asociado con irritación ocular, irritación de las mucosas nasales y faringe, tos, dificultad para respirar, náuseas, incremento a desarrollar enfermedades respiratorias crónicas, reducción de la función pulmonar, incremento en la incidencia de ataques asmáticos, entre otras enfermedades.

➤ Lluvia ácida

La lluvia ácida es una forma de contaminación que hace referencia principalmente al cambio de pH de la lluvia, este cambio de pH también se puede presentar en la niebla y nieve.

El proceso de formación es simple, los contaminantes atmosféricos de características ácidas son arrastrados por la lluvia, esta precipitación adquiere un pH menor de 5.6.

Los principales precursores de los ácidos son dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x), influenciados por la temperatura y la radiación solar.

Dentro de los daños que puede causar este fenómeno se encuentran deterioro de materiales en edificios y monumentos históricos, daños en ecosistemas, alteraciones biológicas de los sistemas acuáticos y alteraciones físicas y químicas del suelo.

A pesar que no se ha comprobado que la lluvia ácida produzca efectos nocivos a la salud humana, los riesgos son identificados principalmente por la presencia de los precursores de la lluvia ácida. Para que exista un impacto directo, los valores de pH tendrían que presentarse valores considerablemente más bajos de 5.6.

➤ Nitrato de Peroxiacilo, PAN

PAN son contaminantes secundarios formados a partir de reacciones fotoquímicas de compuestos orgánicos volátiles en presencia de óxidos de nitrógeno. Estos compuestos son térmicamente inestables en la troposfera, pero son bastante estables a mayor altitud y pueden ser transportado a través de largas distancias.

Causan irritación en los ojos en concentraciones y daños en el sistema respiratorio. La exposición por inhalación produce enfisema pulmonar, daña los alveolos y como consecuencia el cuerpo no recibe la cantidad de oxígeno que necesita.

Este contaminante inhibe el proceso de la fotosíntesis en diversos tipos de plantas. Estas plantas presentan hojas decoloradas y se caen con facilidad, lo que reduce su crecimiento por la falta de alimento y las hace vulnerables a los ataques de plagas y enfermedades.

➤ Smog

Se considera al smog como una mezcla de contaminantes primarios y secundarios que, bajo ciertas circunstancias meteorológicas, se acumulan y reaccionan entre sí, aumentando la concentración de contaminantes secundarios. A la concentración y reacciones químicas de los contaminantes secundarios se denomina smog fotoquímico.

Esta mezcla tiene un aspecto de niebla amarilla y de aquí se origina su nombre, que se compone de las palabras en inglés smoke (humo) y fog (niebla).

El smog además de reducir la visibilidad, aumenta la peligrosidad para la salud de la población que está expuesta. Aunque casi en todas las ciudades del mundo existe este tipo de contaminante, empeora en las ciudades con clima seco, cálido, soleado, con muchos vehículos y aunado a esto, con dificultad de ventilación del aire.

1.2. Analizadores de gases

En la actualidad existe una gran diversidad de sistemas para el análisis de los gases contaminantes productos de la combustión.

El principio de funcionamiento de medición, que utilizan los analizadores de gases, dependerá de las propiedades de cada gas.

Algunos principios e instrumentos para la medición de contaminantes atmosféricos se mencionan en los numerales 1.2.1 y 1.2.2 respectivamente.

1.2.1. Principios de funcionamiento

La propiedad que tienen algunos gases de absorber energía infrarroja en determinadas longitudes de onda, es un principio de funcionamiento que utilizan algunos instrumentos de medición. Los principales gases que tienen la capacidad de absorber ondas de luz específicas son el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y los hidrocarburos (HC). Estos gases tienden a absorber longitudes de onda de luz mayores a la visible de 700 nm.

Aprovechando esta propiedad, los analizadores de este tipo poseen dos compartimientos, uno lleno con un gas de referencia inerte a la luz infrarroja y el otro para la muestra de gases. Estos equipos poseen un filtro óptico formado por un lente que permite solo el paso de longitudes de onda del espectro infrarrojo. La radiación infrarroja atraviesa ambos compartimientos, viéndose atenuada para el caso de los gases que absorben este tipo de energía.

Dado que una parte de la energía de este haz es absorbida por los gases en cantidad proporcional al contenido del compuesto que debe determinarse, el cambio de temperatura y presión del gas permiten obtener el porcentaje del compuesto. La ilustración 1.1 es un esquema general del método infrarrojo no dispersivo.

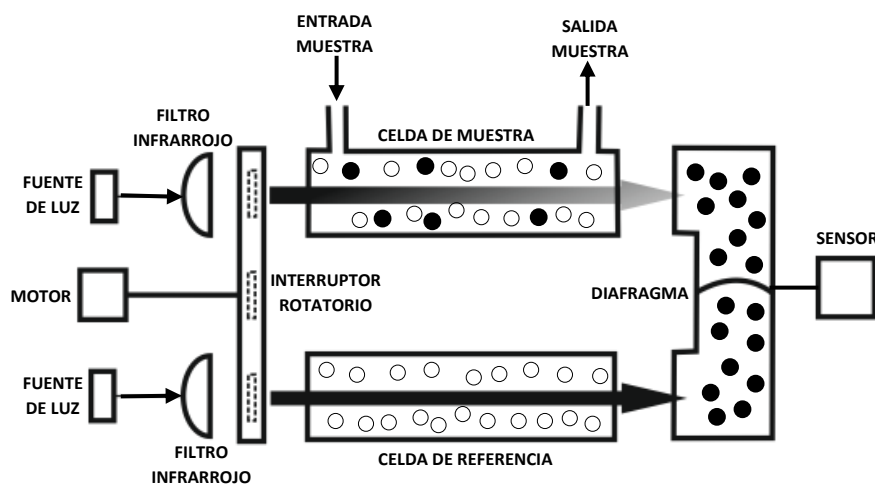
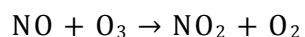


Ilustración 1.1. Esquema general del método infrarrojo no dispersivo.

En el caso de los óxidos de nitrógeno el principio de detección es distinto. El método se basa en la reacción de quimioluminiscencia, esto es, la reacción entre el monóxido de

nitrógeno y el ozono genera energía. Cuando el NO reacciona con el O₃ se forma NO₂ excitando, teniendo la siguiente reacción:



Posteriormente el NO₂ recuperará su estado estable emitiendo energía, la intensidad de luz emitida por la reacción es proporcional a la cantidad de NO que reaccionó y por lo tanto se puede determinar su concentración.

La concentración de NO₂ es medida indirectamente reduciéndolo previamente a NO. Esta reducción se logra por el uso de un convertidor, mientras que la concentración de NO₂ se calcula mediante un procesador electrónico. La ilustración 1.2 es un diagrama típico de quimioluminiscencia del monóxido de nitrógeno.

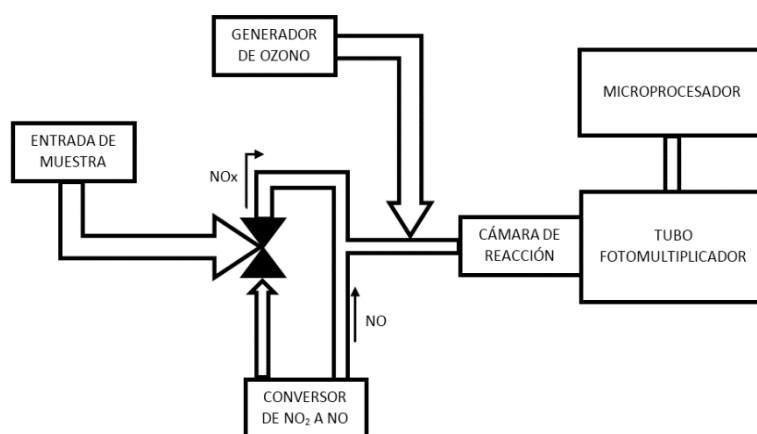


Ilustración 1.2. Diagrama general de quimioluminiscencia del monóxido de nitrógeno.

Otro método de referencia para la determinación de hidrocarburos es el de ionización de flama. Este método consiste en introducir una muestra de aire en una columna separadora la cual remueve agua, bióxido de carbono e hidrocarburos no metano. El metano y el monóxido de carbono son pasados cuantitativamente a una columna de cromatografía de gases donde son separados. Primero, el metano es arrastrado y es pasado sin alteración a través de un tubo de reducción catalítica dentro del detector de ionización de flama. El monóxido de carbono es arrastrado del tubo de reducción catalítica en donde es reducido a metano antes de pasar a través del detector. Entre cada análisis la columna separadora es sometida a contraflujo para prepararla para el análisis subsecuente. La concentración de hidrocarburos corregidos por metano es determinada por la substracción del metano a los hidrocarburos totales. La ilustración 1.3 es un esquema general del método de ionización de flama.

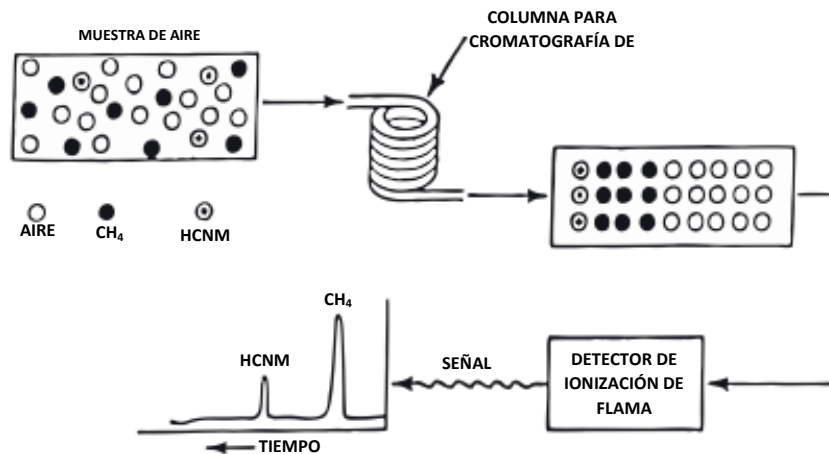


Ilustración 1.3. Esquema general del método de ionización de flama para la detección de hidrocarburos. [7]

1.2.2. CVS, PEMS, FTIR

El Muestreo a Volumen Constante (CVS por sus siglas en inglés) es un sistema empleado para captar la totalidad de los gases de escape emitidos por el vehículo durante la secuencia de manejo y diluirlos en aire ambiente, manteniendo un caudal constante de gases diluidos. Esta metodología de muestreo permite disminuir la amplia y rápida variación que se produce en el caudal de gases emitidos al emplear diferentes regímenes de marcha del motor.

El procedimiento general consta de lo siguiente:

- I. Los gases de escape se diluyen con aire filtrado a fin de reducir su temperatura y para evitar, al mismo tiempo, la condensación de agua.
- II. El gas que sale del escape del vehículo en conjunto con el aire ambiente empleado para su dilución son ingresados hacia el CVS por el vacío generado a través de un ventilador centrífugo, así el gas de escape diluido es conducido por un tubo flexible a través de un venturi que mantiene el caudal total constante, posteriormente el ventilador centrífugo expulsa el gas hacia el exterior.
- III. Durante el paso del gas de escape una sonda de muestreo extrae un pequeño caudal que es continuamente dirigido hacia el banco de analizadores.
- IV. Se dispone de un conjunto de bombas que permiten recolectar continuamente fracciones constantes de gases de escape y aire de dilución en bolsas plásticas y acumular así las emisiones durante la secuencia.

- V. Lecturas instantáneas de la caída de presión en el venturi, así como de temperatura y presión ambiental permiten la lectura y seguimiento de los caudales máscicos totales.

Con esto se pretende simular las condiciones reales de dilución de los gases de escape en el aire de la atmósfera. La ilustración 1.4 es un diagrama del sistema CVS, mientras que la ilustración 1.5 muestra fotografías de un laboratorio automotriz de BMW instrumentado para realizar ensayos de Muestreo a Volumen Constante.

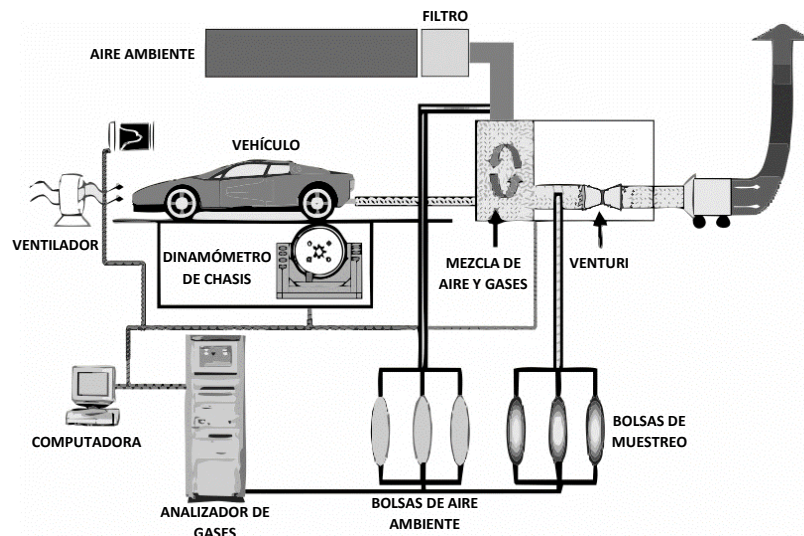


Ilustración 1.4. Esquema general del sistema CVS.



Ilustración 1.5. Laboratorio automotriz de BMW instrumentado con un sistema CVS, München Alemania.

En los últimos años se han desarrollado sistemas que se pueden instrumentar en los vehículos y que permiten hacer una medición de las emisiones contaminantes en ruta. Estos sistemas se conocen como Sistema Portátil de Medición de Emisiones o simplemente PEMS, por sus siglas en inglés Portable Emissions Measurement System. Los PEMS son otra alternativa a los sistemas de medición dentro de los laboratorios, sobre rodillos y en condiciones ideales.

El objetivo principal de usar un PEMS es saber cuánto consume y cuánto emite de una forma relativamente más sencilla y rápida un coche en carretera abierta, y no dentro de un laboratorio, sobre rodillos y en condiciones ideales.

Debido a que un PEMS es capaz de ser transportado fácilmente de un sitio de trabajo a otro, y la instrumentación del equipo, en la mayoría de los casos, no necesita de modificaciones al vehículo, al motor o al sistema de escape; los proyectos de pruebas de emisiones requeridas son económicamente viables. En pocas palabras, más pruebas pueden realizarse con mayor rapidez, por menos trabajadores, lo que aumenta considerablemente la cantidad de pruebas realizadas en un determinado período de tiempo.

Los PEMS generalmente están compuestos de una banca de gases, sensores de temperatura, sensores de presión y una computadora encargada de registrar los datos obtenidos durante las pruebas.

Un aspecto importante que debe ser evaluado en este tipo de equipos es la seguridad, el mismo equipo y sus aditamentos necesitan ser examinados para evitar accidentes durante las pruebas en la vía pública.

La fuente de energía para un PEMS también es una preocupación, ya que sólo una cantidad limitada puede ser tomada del sistema eléctrico del vehículo. Baterías externas han sido consideradas como fuentes de alimentación externa, sin embargo, contribuyen con un potencial de riesgo significativo.

La siguiente ilustración muestra la instrumentación de un PEMS marca Horiba en un vehículo de prueba.



Ilustración 1.6. PEMS marca Horiba, modelo OBS-2200, instrumentado en un vehículo de prueba.

Otro equipo importante de mencionar en el análisis de emisiones contaminantes es el denominado Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR, Fourier Transform Infrared Spectrometry), el cual basa su funcionamiento en la teoría de absorción

de radiación infrarroja molecular. Una molécula de un compuesto vibra a una frecuencia específica, en consecuencia, al absorber el espectro infrarrojo se puede identificar la sustancia a partir de qué tipo de frecuencia. Para obtener los espectros, un ordenador procesa estos datos en tiempo real usando un algoritmo de transformada de Fourier. Estos espectros revelan información sobre la composición de las sustancias, temperatura, concentración y dimensiones.

Este dispositivo puede analizar simultáneamente más de 50 gases diferentes en concentraciones bajas (ppm) o altas (%). El FTIR es un instrumento ideal para la investigación y desarrollo de motores y convertidores catalíticos. La ilustración 1.7 es una fotografía de un equipo FTIR marca CAI.

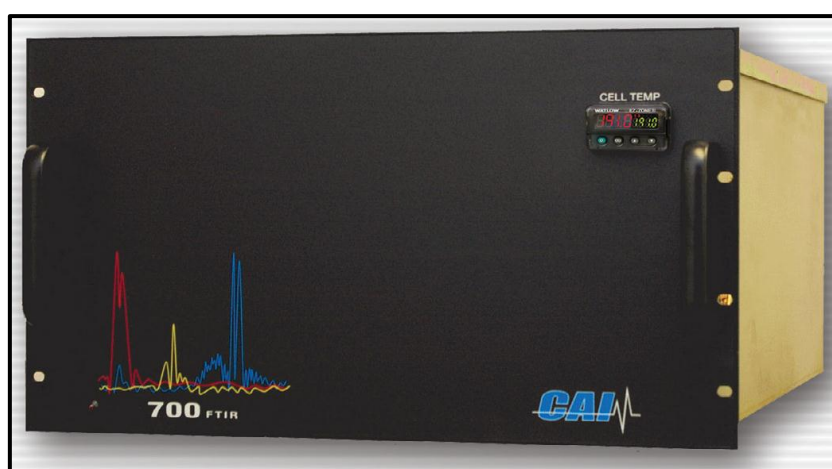


Ilustración 1.7. Analizador FTIR marca CAI, modelo 700 Series.

1.3. Dinamómetro de banco y dinamómetro de chasis

Aunado a los analizadores de gases, anteriormente mencionados, existe equipo que complementa las pruebas para la medición de emisiones, estos equipos de suma importancia son los dinamómetros y existen dos tipos: dinamómetro de banco y dinamómetro de chasis.

Ambos dinamómetros son una herramienta que se utiliza en la industria automotriz y en centros de investigación para conocer el estado de un motor, optimizar su rendimiento, torque, potencia, consumo de combustible, emisiones contaminantes, entre otros.

El dinamómetro de banco, también conocido como dinamómetro de motor, se caracteriza por su configuración típica de acoplamiento directo entre el motor y la unidad de absorción de potencia (PAU) mediante una flecha. La ilustración 1.8 es un esquema general de un dinamómetro de banco y la ilustración 1.9 es una fotografía del equipo del Laboratorio de Control de Emisiones.

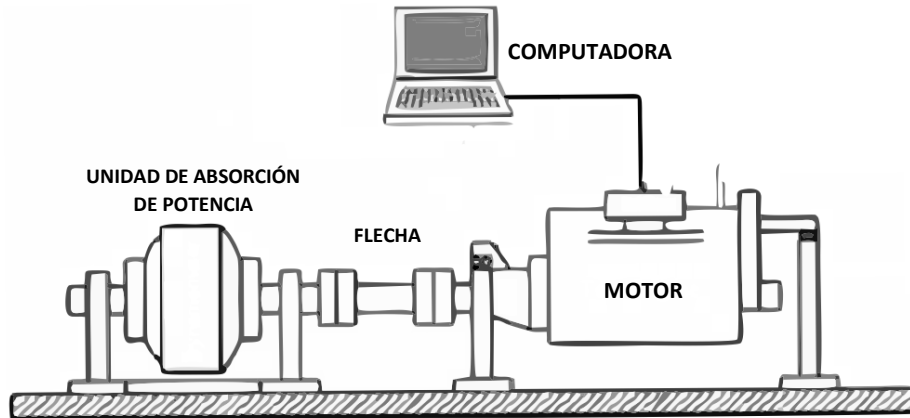


Ilustración 1.8. Esquema general de un dinamómetro de banco.



Ilustración 1.9. Fotografía del dinamómetro de banco del Laboratorio de Control de Emisiones.

De forma contraria, los dinamómetros de chasis no requieren quitar el motor del vehículo. Se asegura al vehículo completo en una celda de pruebas, donde se colocan las ruedas de tracción sobre rodillos, en estos rodillos la PAU está acoplada. La ilustración 1.10 muestra los componentes principales de un dinamómetro de chasis.

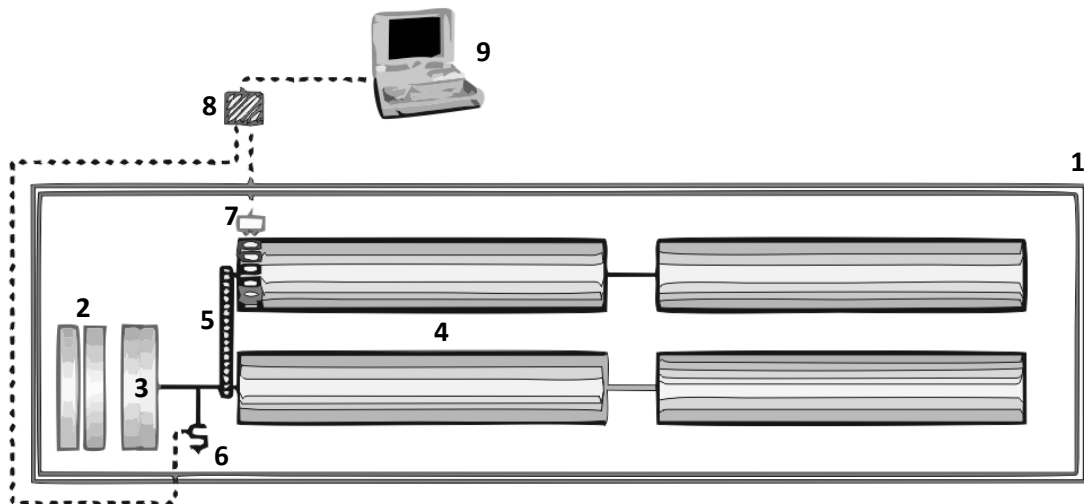


Ilustración 1.10. Diagrama con los componentes principales de un dinamómetro de chasis.

Componentes

- 1) Chasis, marco de acero estructural
- 2) Masas inerciales
- 3) Unidad de Absorción de Potencia
- 4) Rodillos
- 5) Banda dentada
- 6) Celda de carga
- 7) Sensor de rpm
- 8) Módulo de control
- 9) Computadora



Ilustración 1.11. Dinamómetro de chasis marca MAHA.

Un elemento en común entre los dos tipos de dinamómetros es la Unidad de Absorción de Potencia (PAU), este componente es el encargado de oponer resistencia al giro de los

rodillos o a la flecha acoplada al motor, dependiendo del tipo de dinamómetro. Por su principio de operación se distinguen dos tipos principales de PAU, hidráulicos y electromagnéticos.

La principal diferencia entre ambos es cómo se genera la fuerza de oposición al movimiento angular.

Las unidades de tipo hidráulicas, la fuerza de frenado es producida por la fricción de un fluido, generalmente agua, y un rotor. En el caso de los electromagnéticos, también llamados corrientes Eddy o corrientes parásitas, la acción de frenado se produce mediante la inducción de corriente a una serie de bobinas que generan un campo magnético, este campo magnético es el encargado de frenar el rotor.

1.4. Sistema de Diagnóstico a Bordo

A finales de la década de los 80s, la Comisión de Recursos del Aire de California (California Air Resources Board - CARB) determinó que todos los coches a gasolina debían contar con un Sistema de Diagnóstico a Bordo (On Board Diagnostic, OBD) que controlara los límites máximos de emisiones de los vehículos.

Tras la implementación del sistema OBD I surgió una directriz que obligaba a ampliarlo, apareciendo el OBD II (ilustración 1.12). El OBD II empezó a ser obligatorio para vehículos nuevos de gasolina a partir del año 1996 y para vehículos diésel a partir de 1997. Una adaptación del sistema OBD II a las normativas anticontaminación que rigen en la Unión Europea es el sistema EOBD, la norma que a partir del 13 de octubre de 1998 establece la implementación obligatoria del sistema EOBD para todos los países miembros es la UE 98/69/CE.



Ilustración 1.12. Conector OBD II hembra-macho.

El Sistema de Diagnóstico a Bordo tiene como funciones principales las siguientes:

- Vigilar todos los componentes importantes para la calidad de los gases de escape, como son: sonda lambda, sistema de inyección, entrada de aire al motor, fallas en la combustión, entre otros.
- Proteger el catalizador ante un posible peligro del mismo.

- Avisar visualmente al conductor, mediante una luz en el tablero del vehículo, si hay componentes relacionados con los gases de escape que presentan fallos en su funcionamiento.
- Memorizar averías.
- Posibilitar el diagnóstico.

La lámpara indicadora de mal funcionamiento (MIL), denominada también Check Engine, es la señal que alerta al conductor del mal funcionamiento y de la necesidad de un servicio de los sistemas de control de emisiones. Para cada fallo existe un código asignado.

Los códigos generados se basan bajo los estándares SAE J2Q12, se trata de un código de 5 dígitos que comienzan por la letra. El primer dígito representa el origen de la falla, de acuerdo a lo siguiente:

- P: Motor y Transmisión (Powertrain)
- B: Carrocería (Body)
- C: Chasis (Chasis)
- U: No definido (Undefined)

El segundo dígito indica la organización responsable de definir el dígito.

- 0: SAE código común a todas las marcas
- 1: El fabricante del vehículo

El tercer dígito representa una función específica del vehículo.

- 0: sistema electrónico completo
- 1 y 2: control del aire y combustible
- 3: sistema de encendido
- 4: control emisión auxiliar
- 5: control de velocidad y ralentí
- 6: ECU y entradas y salidas
- 7: transmisión

El cuarto y quinto dígito sirven para identificar los componentes y el sistema.

Por ejemplo, el código P0131 indica un problema en el motor (P), definido por SAE (0) y común a cualquier vehículo, relacionado con el sistema de encendido (3) y el componente involucrado es el sensor de oxígeno antes del catalizador.

Las averías se pueden consultar por medio de una herramienta electrónica llamada escáner automotriz (ilustración 1.13). Aunque dependiendo del vehículo puede cambiar de lugar, la conexión del OBD suele estar ubicada en la zona de los pies del conductor, ya sea debajo del volante, o en la caja de fusibles. Otros fabricantes sitúan la conexión OBD en la parte

del cenicero o incluso en el asiento del copiloto. La ilustración 1.14 muestra la ubicación del conector OBD II en un Infiniti Q50.



Ilustración 1.13. Escáner automotriz Autel Ds708 Maxidas.



Ilustración 1.14. Ubicación del conector OBD II en un Infiniti Q50.

Para poder leer los datos por medio del OBDII de un vehículo, se necesita que la interfaz decodifique la información que posee la computadora del vehículo (Engine Control Unit, ECU). La comunicación entre la interfaz y la ECU se realiza mediante protocolos estandarizados, estos protocolos de comunicación los escogen los mismos fabricantes automotrices. Básicamente los protocolos que se utilizan son los siguientes:

- ❖ ISO 9141
- ❖ ISO 14230
- ❖ SAE J1850 VPW que significa Ancho de Pulso Variable (Variable Pulse Width)
- ❖ SAE J1850 PWM que indica Modulación Ancho de Pulso (Pulse Width Modulación)
- ❖ ISO 15765 (CAN BUS)

Prácticamente, la diferencia entre los protocolos de comunicación son los voltajes, frecuencias y velocidades de transmisión que utiliza cada uno de estos.

CAPÍTULO 2. RESUMEN DE NORMAS VIGENTES

A consecuencia de la problemática de contaminación atmosférica que se ha enfrentado en distintas partes del mundo en las últimas décadas, se han creado medidas legales para limitar los niveles de emisiones contaminantes producto de la combustión.

Las legislaciones que establecen los niveles de contaminantes basan sus procedimientos en diferentes métodos de prueba para medir las emisiones contaminantes en motores y vehículos. Algunos ejemplos de normativas internacionales y nacionales son presentados a continuación.

2.1. Normativa internacional

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) establece las normas federales de emisiones para motores y vehículos, incluidas las normas de emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, el estado de California tiene el derecho de crear sus propias regulaciones de emisiones, que a menudo son más estrictas que las reglas federales. Las regulaciones de vehículos y motores son aprobadas por la Junta de Recursos del Aire de California (ARB), un organismo regulador dentro de la EPA de California.

California es el único estado con la autoridad para desarrollar sus propias regulaciones de emisiones. Otros estados tienen la opción de implementar las normas federales, o bien adoptar los requisitos de California.

El desarrollo de las normas de emisión de motores se realiza de acuerdo con los procedimientos del proceso de reglamentación estadounidense. Los nuevos reglamentos se publican por primera vez como reglas propuestas. Después de un período de discusión pública, la nueva regla se finaliza y se convierte en ley. Las regulaciones consolidadas pasan a formar parte del Código de Regulaciones Federales (CFR).

Un ejemplo de una norma federal de emisiones vigente para vehículos es la Tier3, esta normativa se convirtió en ley el 3 de marzo de 2014. Los estándares Tier3 están estrechamente ligados con los de California, la normativa LEV III (Low Emission Vehicle III). Ambas normas establecen sus niveles de emisiones bajo el procedimiento de prueba FTP75.

El FTP75 (Federal Test Procedure 75) se ha utilizado para la certificación de la emisión y la prueba de la economía de combustible de vehículos en los Estados Unidos. Este

procedimiento es un ciclo de manejo que representa un perfil de velocidad del vehículo en función del tiempo y simula la forma típica de conducir de una zona.

El ciclo FTP75 consta de dos fases transitorias, una al principio con arranque en frío y otra al final de arranque caliente, a la mitad de la prueba hay una conducción llamada etapa estabilizada. El recorrido total mide 17.77 km, con una duración de 1877 segundos, a una velocidad promedio de 34.12 km/h y alcanzando una velocidad máxima de 91.25 km/h. La ilustración 2.1 muestra el perfil de velocidad contra tiempo de la prueba.

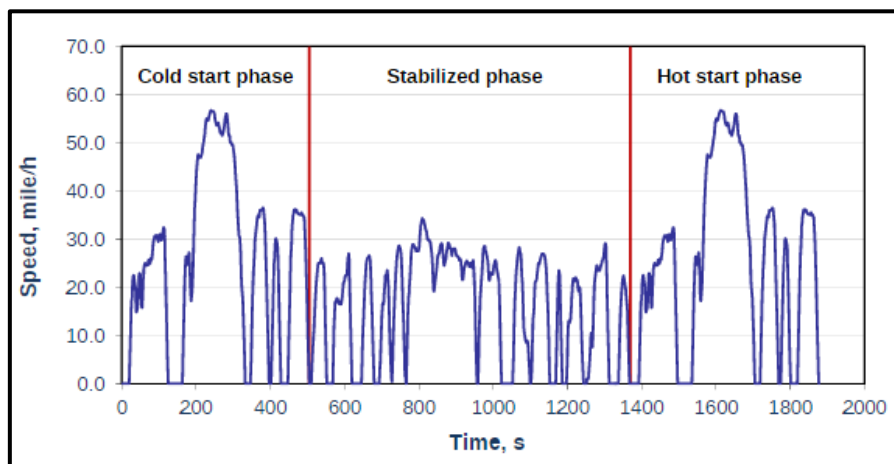


Ilustración 2.1. Ciclo de manejo FTP75, EPA US.

La Unión Europea también ha establecido un conjunto de normas, estas normas llamadas Euro fueron creadas y aprobadas como medida de control en materia de contaminación desde su introducción en el año 1992 con la Euro I y se han ido actualizando periódicamente, siendo la Euro VI la última, con nuevos requisitos para poder disminuir tanto la cantidad como el tipo de gases contaminantes emitidos a la atmósfera.

Similar al FTP75, para la homologación de emisiones existe un ciclo de manejo llamado NEDC (*New European Driving Cycle*) que reproduce condiciones de circulación que combinan cuatro tramos de conducción urbana (prueba ECE15) con uno extraurbano (EUDC).

El ciclo ECE (ilustración 2.2) fue ideado para representar las condiciones de conducción de una ciudad, por ejemplo, París o Roma. Se caracteriza por velocidades bajas del vehículo, cargas bajas del motor y temperatura bajas de los gases de escape.

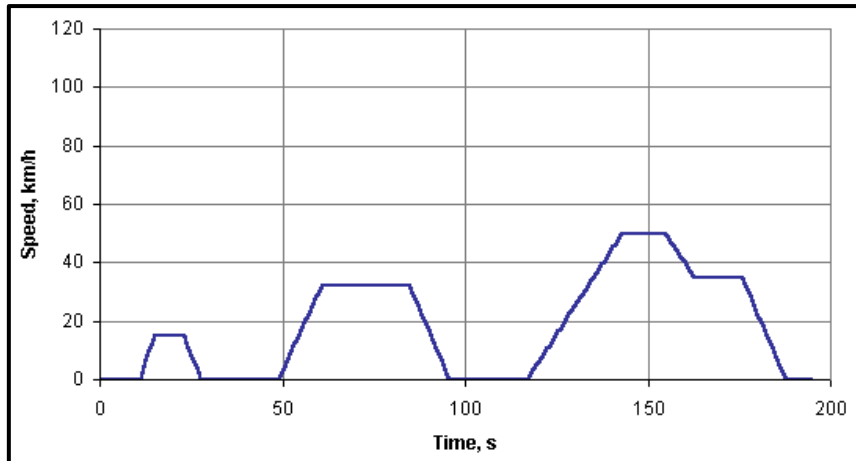


Ilustración 2.2. Ciclo ECE15, etapa urbana de la prueba NEDC.

El segmento EUDC (Extra Urban Driving Cycle) se ha añadido después del cuarto ciclo ECE15, con modos de conducción más agresivos y velocidades más altas. La velocidad máxima del ciclo EUDC es de 120 km/h (ilustración 2.3), también se ha definido un ciclo alternativo de EUDC para vehículos de baja potencia con una velocidad máxima de 90 km/h (ilustración 2.4).

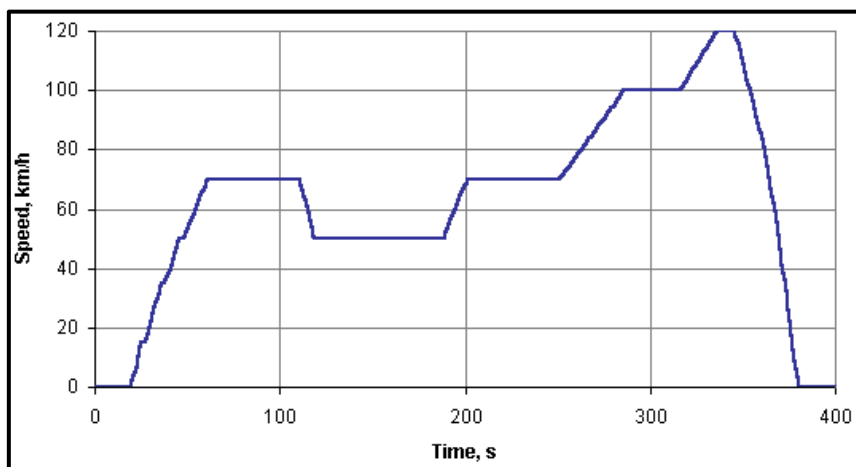


Ilustración 2.3. Ciclo EUDC 120 km/h, etapa extraurbana de la prueba NEDC.

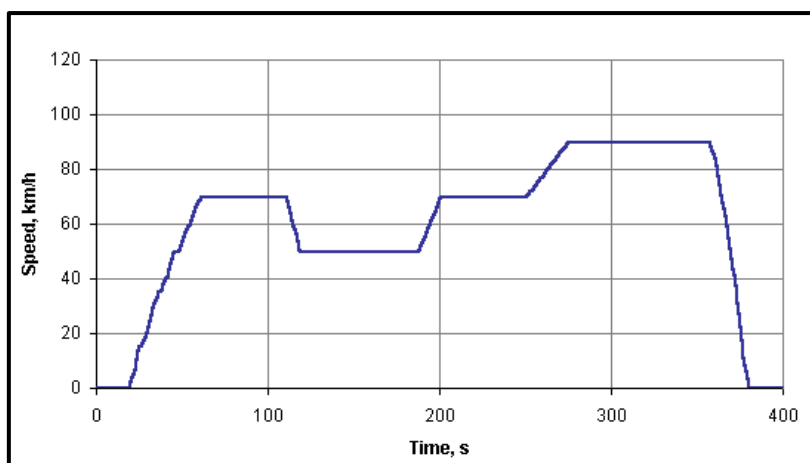


Ilustración 2.4. Ciclo EUDC 90 km/h, etapa extraurbana de la prueba NEDC.

La siguiente tabla resume distancias, tiempos, velocidades, entre otros, de los ciclos ECE15, EUDC y NEDC.

	ECE15	EUDC	NEDC*
Distancia (km)	0.994	6.954	10.931
Tiempo total (seg)	195	400	1180
Velocidad promedio (km/h)	18.35	62.59	33.35
Velocidad máxima (km/h)	50	120	120
Aceleración promedio (m/s ²)	0.599	0.354	0.506
Aceleración máxima (m/s ²)	1.042	0.833	1.042

*Considerando cuatro repeticiones ECE15 y una EUDC

Tabla 2.1. Parámetros del ciclo NEDC y sus etapas ECE15 y EUDC.

El NEDC fue actualizado por última vez en 1997 y será reemplazado por el WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure). Los requisitos de prueba de emisiones serán introducidos gradualmente a partir del año 2017.

El procedimiento WLTP incluye tres ciclos de prueba que se aplican a tres categorías de vehículos, estas categorías están basadas en la relación entre la potencia nominal del vehículo y la masa del vehículo.

La Clase 3 representa relación más alta de potencia-masa. Es representativa de los vehículos que circulan en Europa y Japón. La velocidad y la aceleración del vehículo se muestran en la ilustración 2.5.

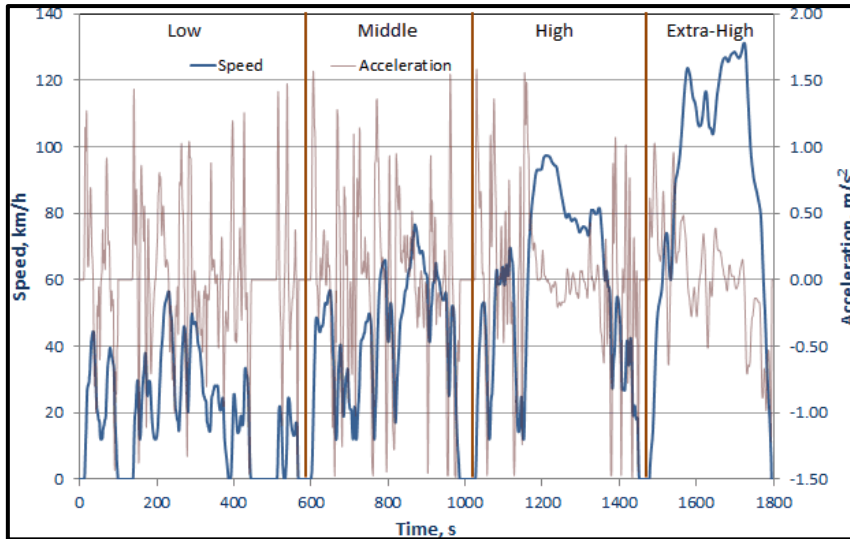


Ilustración 2.5. Ciclo WLTP Clase 3.

El ciclo de manejo para la Clase 2 es representativa de vehículos conducidos en la India y de vehículos de baja potencia en Japón y Europa (ilustración 2.6).

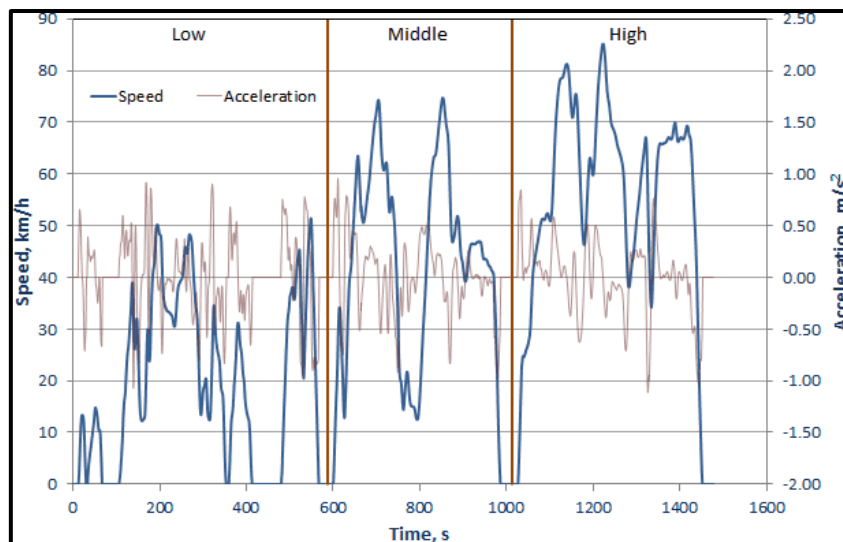


Ilustración 2.6. Ciclo WLTP Clase 2.

La Clase 3 tiene la relación potencia-masa más baja y también es representativa de los vehículos que circulan en la India. La ilustración 2.7 muestra la velocidad y la aceleración del vehículo.

2.2. Normativa nacional

En relación con normatividad mexicana, en tema de calidad del aire, la dependencia encargada de expedir normas es la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Esta dependencia ha emitido normas para el monitoreo ambiental, las emisiones de fuentes fijas, las características de combustibles y las emisiones de fuentes móviles. Las Normas Oficiales Mexicanas en materia de fuentes móviles son las siguientes:

NOM-041-SEMARNAT-2015: Establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.

NOM-042-SEMARNAT-2003: Establece los límites máximos permisibles de emisión de Hidrocarburos totales o no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3,857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel, así como de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del Sistema de combustible de dichos vehículos.

NOM-044-SEMARNAT-2006: Establece los límites máximos permisibles de Emisión de hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, Partículas y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor de 3,857 Kilogramos, así como para unidades nuevas con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos equipadas con Este tipo de motores.

NOM-045-SEMARNAT-2006: Vehículos en circulación que usan diesel como combustible límites máximos permisibles de opacidad, procedimiento de prueba y Características técnicas del equipo de medición.

NOM-047-SEMARNAT-2014: Establece las características del equipo y el procedimiento de medición para la verificación de los límites de emisión de contaminantes, provenientes de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos.

NOM-048-SEMARNAT-1993: Establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono y humo, provenientes del escape de las motocicletas en circulación que utilizan gasolina o mezcla de gasolina-aceite como combustible.

NOM-049-SEMARNAT-1993: Establece las características del equipo y el procedimiento de medición, para la verificación de los niveles de emisión de gases contaminantes, provenientes de las motocicletas en circulación que usan gasolina o mezcla de gasolina-aceite como combustible.

NOM-050-SEMARNAT-1993: Establece los niveles máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos como combustible.

NOM-076-SEMARNAT-1995: Establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno provenientes del escape, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y otros combustibles alternos y que se utilizaran para la propulsión de vehículos automotores, con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos nuevos en planta.

NOM-077-SEMARNAT-1995: Establece el procedimiento de medición para la verificación de los Niveles de emisión de la opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación que usan diesel como combustible.

En el año de 1990 inició el Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica en el Valle de México, este programa actualmente llamado Programa de Verificación Vehicular Obligatoria (PVVO), tiene como objetivo regular y mantener dentro de la norma los niveles de emisiones contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación para preservar la calidad del aire y la salud de la ciudadanía.

A raíz del incremento de concentraciones de ozono durante el primer semestre del año 2016 en la Ciudad de México, las autoridades competentes han publicado una norma de emergencia para tratar de revertir la situación. La nueva norma de verificación NOM-EM-167-SEMARNAT-2016, se aplica en los seis estados que integran la Megalópolis (Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo, Morelos, Puebla y Tlaxcala).

Esta norma actualiza los procedimientos de verificación vehicular, incorpora una revisión del Sistema de Diagnóstico a Bordo para vehículos 2006 y posteriores. El proceso de verificación vehicular consta de lo siguiente:

- 1) **Prueba Visual:** Esta prueba consiste en una revisión rápida del sistema de escape (presión positiva), filtros de aire, tapón de aceite, tapón de combustible, fuga de fluidos, conexión de mangueras, bayoneta, entre otros.
- 2) **Prueba OBD:** En esta etapa se revisa que la Lámpara de Mal Funcionamiento este apagada, además, el Sistema de Diagnostico a Bordo debe contener cinco monitores, los cuales para verifican el adecuado funcionamiento de los componentes relacionados con el control de las emisiones de gases contaminantes. Los monitores que contempla la norma son los siguientes: Monitor de Sistemas de Detección de Condiciones Inadecuadas de Ignición de Cilindros, Monitor del Sistema de Sensores de Oxígeno, Monitor del Sistema de Combustible, Monitor del Sistema de Componentes Integrales y Monitor de Sistema de Eficiencia del Convertidor Catalítico.

- 3) **Prueba de humo:** Después de la prueba OBD, el vehículo se monta en los rodillos del dinamómetro de chasis y a una velocidad de 24 km/h durante 60 segundos se revisa que no emita humo.
- 4) **Prueba dinámica:** En esta última prueba, se realiza la medición de gases (HC, CO, CO₂, NO_x y O₂) bajo condiciones de velocidad y aplicación de carga externa aplicada por el dinamómetro. Estas condiciones consisten en dos etapas, la primera a 24 km/h con 50% de carga y la segunda a 40 km/h con 25% de carga, las dos etapas tienen la duración de 60 segundos.

Los vehículos automotores deberán aprobar cada una de las pruebas y, dependiendo de los límites máximos permisibles de emisiones contaminantes establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas, se entregará una constancia de verificación vehicular que está conformado por un informe o certificado de la prueba y un holograma que tiene como objetivo controlar la circulación de la flota vehicular y las emisiones vehiculares. Este programa que trata de controlar la circulación de los vehículos automotores es el Programa Hoy No Circula.

A pesar de este tipo de medidas que se han implementado para controlar emisiones contaminantes, y que han mostrado resultados sustanciales, presentan limitantes que derivan en la necesidad de ajustar a las condiciones actuales de los programas. Este es el caso de la última modificación que tuvo el PVVO.

Los sistemas electrónicos que contienen actualmente los vehículos son distintos, esto se debe a que cada marca automotriz elige la normativa internacional para instrumentar dichos sistemas en sus vehículos, aunado a la inmensa diversidad de modelos de vehículos que existe, complica la elaboración e implementación de normas de emergencia para el control de emisiones contaminantes provenientes de fuentes móviles.

A consecuencia de lo anterior, durante este segundo semestre del PVVO se ha visto que no es tan sencillo implementar los lineamientos de la norma emergente relacionados con el Sistema de Diagnóstico a Bordo debido a la gran diversidad que se mencionó anteriormente. Además, existen contradicciones en los lineamientos al requerir un Sistema de Diagnóstico a Bordo OBDII o EOBD, siendo que para muchos vehículos con EOBD se componen de cuatro monitores y no de cinco como lo requiere dicha norma.

Es importante realizar una investigación a fondo adecuada para poder implementar normativas de control ambiental, ya que de otro modo traerá consecuencias negativas y no un beneficio.

CAPÍTULO 3. DISEÑO EXPERIMENTAL.

Como se mencionó anteriormente el objetivo del presente trabajo es medir la masa de contaminantes emitidos por un vehículo en un recorrido con ayuda de un sistema adquisidor de datos y un analizador de cinco gases.

Este capítulo describe detalladamente como se realizaron las pruebas experimentales, las condiciones consideradas y el equipo utilizado, con lo cual se logró el objetivo de esta propuesta.

3.1. Equipo experimental

El equipo utilizado en los ensayos experimentales fue el siguiente:

- a) Sistema UNAM ADM
- b) Analizador de gases
- c) Vehículo de pruebas

3.1.1. Sistema UNAM ADM

Una tarjeta electrónica adquisidora de datos (ilustración 3.1) fue diseñada con el propósito de almacenar la información enviada por los sensores a la ECU del vehículo. Esta tarjeta es capaz de comunicarse con la computadora de vehículos que usen distintos protocolos, además de que puede almacenar información de los sensores que se requiera. Por esta razón, se le nombró tarjeta electrónica UNAM Adquisidora de Datos Múltiples o simplemente UNAM ADM.



Ilustración 3.1. Tarjeta electrónica UNAM ADM.

Este dispositivo cuenta con un cable OBDII-VGA que se conecta al vehículo de prueba y un puerto USB para la transferencia de datos a la computadora, ilustración 3.2.



Ilustración 3.2. Tarjeta electrónica y conectores.

Un programa hecho en LabVIEW fue el encargado de monitorear y guardar la información de los sensores obtenida de la ECU por la tarjeta.

Cabe mencionar que la UNAM ADM y el programa en LabVIEW fueron desarrollados por compañeros en un trabajo de investigación anterior.

3.1.2. Analizador de gases

El analizador de gases que se usó en los ensayos experimentales posee una banca comercial de cinco gases. Esta banca de gases es Andros6600, los gases que mide esta banca son: oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos no quemados y óxidos de nitrógeno. La ilustración 3.3 muestra una fotografía exterior del gabinete y otra donde se observa en un panorama general el interior del analizador, mientras que la ilustración 3.4 muestra la banca de cinco gases Andros6600.



Ilustración 3.3. Fotografías del analizador de gases.



Ilustración 3.4. Banca de cinco gases Andros6600.

Andros6600 cuenta con su propio software de calibración de equipo y medición de concentración de gases. Host6600, nombre del software, únicamente se utilizó para la calibración de gases y no para la medición de estos.

La calibración del analizador de gases garantizó el correcto funcionamiento del equipo, el patrón de referencia para la calibración es un tanque con concentraciones de gases conocidas de CO₂, CO, HC, NO_x. La ilustración 3.5 muestra el tanque con las concentraciones de los cuatro gases.

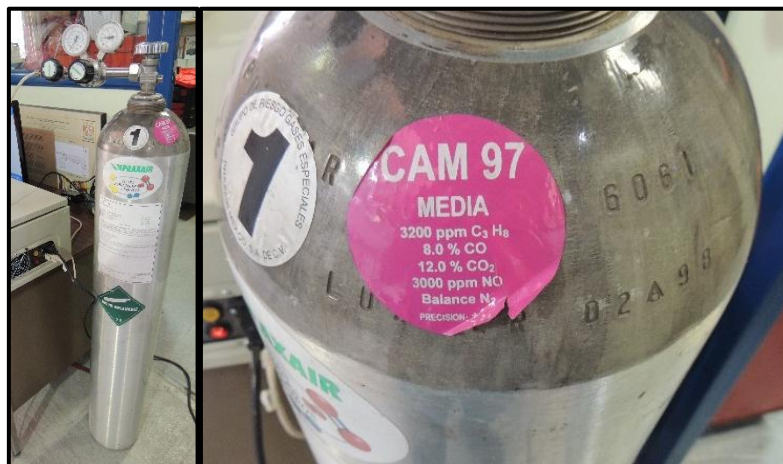


Ilustración 3.5. Fotografía del tanque con las concentraciones de gases.

La medición de gases se hizo con un programa en LabVIEW, esto con la finalidad de sincronizar los datos obtenidos de las concentraciones de gases de escape y la información de los sensores del vehículo adquirida por la tarjeta electrónica. Todos estos datos son guardados en una computadora portátil, los cuales serán procesados para realizar el cálculo de las emisiones de contaminantes en masa.

Para efectuar la calibración de gases, que se describe a detalle en el numeral 3.2.3, se utilizó un tanque con concentraciones de gases conocidas que componen la mezcla.

3.1.3. Vehículo de pruebas

Los ensayos experimentales se realizaron con un vehículo Toyota Corolla 2009 (ilustración 3.5) con características de motor que se especifican en la tabla 3.1.



Ilustración 3.5. Vehículo de pruebas Toyota Corolla 2009.

MOTOR	
Modelo	1ZZ-FE
Desplazamiento	1.794 cm ³ (109.5 in ³)
Diámetro de pistón	79 mm (3.11 in)
Carrera de pistón	91.5 mm (3.6 in)
Combustible	Gasolina
Ciclos	4

Tabla 3.1. Especificaciones de motor de un Toyota Corolla 2009.

El protocolo de comunicación que utiliza este vehículo es CAN, es decir, ISO15765.

Los PIDs que se pueden obtener de la ECU de este vehículo se enlistan en el apartado 3.2.2 de este trabajo.

3.2. Planeación de los ensayos

3.2.1. Traza de rutas

Se planearon dos tipos de rutas para los ensayos experimentales, cada una se repitió cuatro veces con la finalidad de tener las mismas condiciones de las pruebas.

La primera ruta considera diversos puntos del circuito escolar de Ciudad Universitaria, este recorrido se nombró “ruta con tráfico” o simplemente RCT, se eligió esta ruta debido a sus características típicas de circulación. A lo largo de esta ruta se puede transitar por varios semáforos, cruces peatonales y diversos puntos de aglomeración vehicular. La ilustración 3.6 muestra un mapa de la ruta.

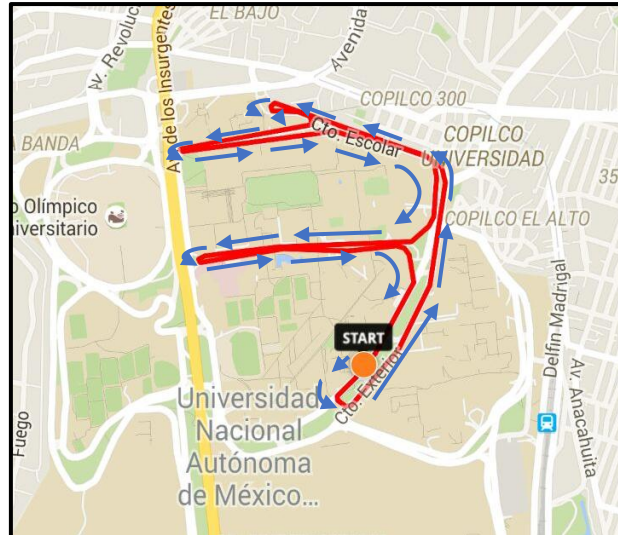


Ilustración 3.6. Mapa de la "ruta con tráfico" dentro del circuito de Ciudad Universitaria.

Por otra parte, el segundo recorrido fue elegido con características totalmente distintas al primero, con vías más rápidas y sin tanta concentración de vehículos y peatones. Esta ruta se nombró "ruta sin tráfico" o RST y comprende el circuito de la zona deportiva y el estadio olímpico. La ilustración 3.7 muestra un mapa de la "ruta sin tráfico".



Ilustración 3.7. Mapa de la "ruta sin tráfico", Circuito Zona Deportiva.

3.2.2. Parámetros programados

Antes de realizar pruebas experimentales se investigó que parámetros relacionados con el funcionamiento del motor se pueden obtener del Toyota Corolla 2009, esto se hizo conectando la tarjeta electrónica al vehículo.

Específicamente para esta marca y modelo de vehículo se pueden obtener 37 parámetros de funcionamiento relacionados con el motor. No todos los parámetros fueron programados en la tarjeta electrónica, únicamente cinco se utilizaron para el cálculo de la masa de contaminantes.

Los PIDs programados fueron los siguientes:

- 1) Régimen de giro del motor [rpm]
- 2) Velocidad del vehículo [km/h]
- 3) Flujo de aire MAF [g/s]
- 4) Sensor de oxígeno voltaje relación aire-combustible (voltaje)
- 5) Sensor de oxígeno relación aire-combustible (corriente)

Cabe resaltar que los PIDs 4 y 5 pueden dar valores de voltaje y corriente respectivamente, sin embargo, se programaron para que registraran el valor de la relación lambda, es decir, el dosado relativo.

La ilustración 3.8 ilustra los parámetros programados en LabVIEW para el cálculo de masa de contaminantes.

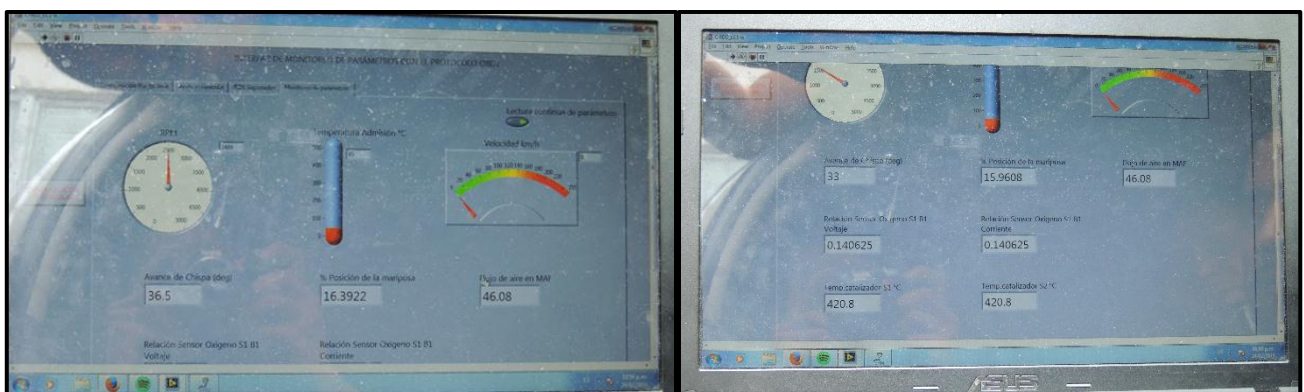


Ilustración 3.8. Fotografía de los parámetros programados en LabVIEW.

3.2.3. Instrumentación del ensayo experimental

Antes de iniciar las pruebas experimentales se instrumentó todo el equipo dentro del vehículo de prueba para realizar los recorridos en el circuito de Ciudad Universitaria.

Con el motor del vehículo apagado, se conectó la tarjeta electrónica por medio del cable OBDII-VGA. El conector OBDII del vehículo de prueba se localiza al costado izquierdo del conductor, como se muestra en la ilustración 3.9.



Ilustración 3.9. Conexión OBDII del vehículo de pruebas, Toyota Corolla 2009.

El extremo del cable, conexión VGA, se ubicó en la parte trasera del vehículo para ser conectado a la tarjeta adquisidora de datos, que a su vez se conecta por medio de un cable USB a la computadora portátil (ilustración 3.10).



Ilustración 3.10. Conexión de la tarjeta adquisidora de datos.

Por otra parte, el analizador de gases se colocó en la parte trasera del copiloto. Para energizar el analizador se utilizó una batería de 12V independiente a la que posee el vehículo y se utilizó un inversor de corriente para prender dicho analizador. La ilustración 3.11 muestra la instrumentación del analizador de gases.

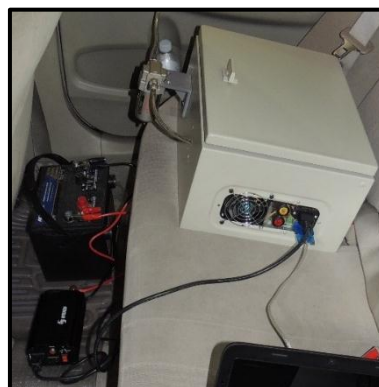


Ilustración 3.11. Instrumentación del analizador de gases.

La sonda del analizador fue introducida en el tubo de escape del vehículo, el resto de la manguera se acomodó de tal manera que pueda entrar por la ventana trasera del copiloto y conectarse al analizador, ilustración 3.12.

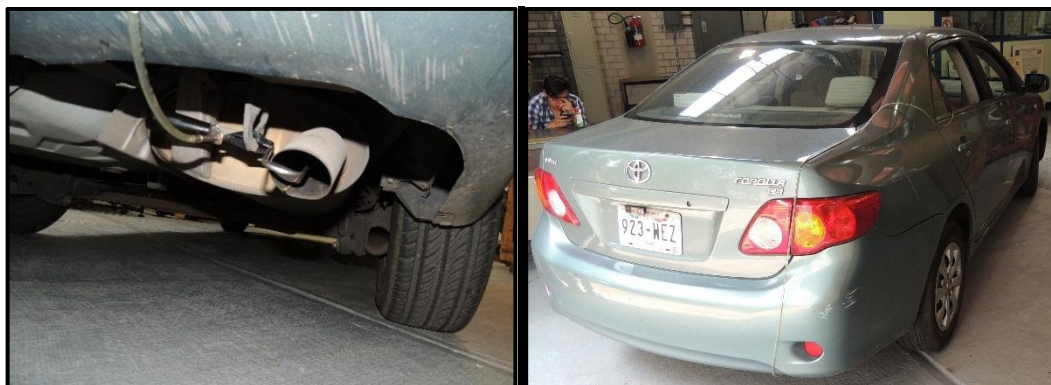


Ilustración 3.12. Instrumentación del analizador de gases.

3.2.4. Ejecución, monitoreo y almacenamiento de datos de ensayos experimentales

Para la ejecución del ensayo experimental se prendió todo el equipo (inversor de corriente, analizador, computadora y vehículo) y, posteriormente, se inició el programa de LabVIEW donde se reciben las señales de la tarjeta electrónica y del analizador. Los valores de las concentraciones de los gases de escape y los datos de los parámetros del motor adquiridos por la tarjeta electrónica fueron guardados en archivos con formato xls.

Primero se hicieron los ensayos experimentales de las RCT en un horario aproximado entre las 13 y 14 horas. Se escogió este horario debido que existe una mayor presencia de vehículos y peatones, lo cual dificulta el tránsito en el Circuito Universitario. La ilustración 3.13 es una fotografía tomada desde el interior del vehículo mientras se realiza este recorrido.



Ilustración 3.13. Fotografía desde el interior del vehículo a la altura de la Facultad de Derecho.

Pese a que los ensayos de las RST se hicieron en el mismo horario, estas vías no presentan una gran cantidad de vehículos ni peatones como se muestra en la ilustración 3.14.



Ilustración 3.14. Fotografía desde el interior del vehículo en el Circuito Zona Deportiva.

Durante los recorridos se monitoreaban los datos registrados por la tarjeta electrónica y el analizador de gases, los datos fueron guardados en lapsos de tiempo variables que van desde cada segundo hasta diez. Sin embargo, cuando el programa no almacenaba información en un periodo de tiempo mayor al mencionado anteriormente, se volvía a repetir la prueba desde el inicio.

Finalizada la ruta, se detuvo la ejecución del programa y automáticamente quedan grabados los datos en el archivo previamente creado.

Concluidos los ensayos, se realizó el análisis de la información obtenida y los cálculos correspondientes de la masa de contaminantes.

3.3. Cálculo de masa de emisiones contaminantes

Los datos experimentales deben ser sistematizados con el propósito de simplificar y ordenar los resultados obtenidos de cada una de las pruebas. Esta organización de resultados se detalla tomando como ejemplo el primer ensayo experimental, las consideraciones y cálculos son exactamente los mismos para el resto de las pruebas. Así mismo, las ilustraciones y gráficas que se presentan pertenecen a la primera prueba.

Cuando se inicia el ensayo experimental las primeras lecturas de los equipos no se toman en consideración debido a que se los primeros datos a considerar son cuando el vehículo avanza por primera vez, es decir, cuando la velocidad es mayor a cero. La ilustración 3.15 es una imagen capturada del archivo de datos, donde se resaltan en un cuadro rojo los valores discriminados para los cálculos.

Hora	CO2	CO	HC	O2	NOX	RPM	Vel. km/h	Flujo aire MAF	Rel. O2 S1 B1 Volt	Rel. O2 S1 B1 Corr.
02:12:44 p. m.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	690	0	1.57	0.998779	0.999054
02:12:47 p. m.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	698	0	1.57	1.002	1.001
02:12:50 p. m.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	702	0	1.48	0.988	0.989
02:12:53 p. m.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	688	0	1.48	1.007	1.008
02:12:56 p. m.	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	704	0	1.46	1.003	1.002
02:12:59 p. m.	0.0	0.0	-32768.0	0.0	0.0	694	0	1.48	1.000	1.000
02:13:02 p. m.	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	689	0	1.46	0.997	0.997
02:13:06 p. m.	0.0	0.0	0.0	-32768.0	0.0	713	0	1.50	1.003	1.002
02:13:09 p. m.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	695	0	1.48	0.996	0.996
02:13:12 p. m.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	698	0	1.46	1.001	1.000
02:13:14 p. m.	0.0	0.0	0.0	20.9	3.0	699	0	1.46	0.998	0.998
02:13:15 p. m.	0.0	0.0	0.0	20.9	5.0	689	0	1.46	0.998	0.999
02:13:17 p. m.	0.0	0.0	0.0	-30679.0	1.0	693	0	1.48	1.001	1.000
02:13:20 p. m.	0.0	0.0	0.0	20.9	1.0	665	0	1.46	0.999	0.999
02:13:21 p. m.	0.0	0.0	0.0	20.9	-1.0	716	0	1.56	0.991	0.994
02:13:23 p. m.	0.0	0.0	0.0	20.9	1.0	734	0	1.53	1.001	0.998
02:13:26 p. m.	0.0	0.0	0.0	20.9	1.0	700	0	1.46	0.998	0.999
02:13:27 p. m.	0.0	0.0	0.0	20.9	1.0	712	0	1.48	1.010	1.009
02:13:29 p. m.	0.0	0.0	0.0	20.9	1.0	701	0	1.46	1.004	1.003
02:13:32 p. m.	2.5	0.0	0.0	20.9	-1.0	693	0	1.46	0.998	0.998
02:13:33 p. m.	4.7	0.0	0.0	20.9	3.0	695	0	1.46	0.996	0.996
02:13:35 p. m.	8.6	0.0	0.0	20.3	1.0	702	0	1.46	0.998	0.998
02:13:38 p. m.	12.1	0.0	0.0	15.7	5.0	698	0	1.48	0.994	0.994
02:13:39 p. m.	12.7	0.0	0.0	13.9	-1.0	691	0	1.46	1.003	1.002
02:13:41 p. m.	13.2	0.0	0.0	10.5	-3.0	683	0	1.48	0.999	1.000
02:13:44 p. m.	13.6	0.0	0.0	6.6	1.0	711	0	1.48	1.002	1.001
02:13:45 p. m.	15.3	0.0	0.0	5.7	3.0	700	0	1.46	0.999	0.999
02:13:47 p. m.	13.7	0.0	0.0	4.3	1.0	697	0	1.46	0.999	1.000
02:13:50 p. m.	14.1	0.0	0.0	3.0	1.0	712	0	1.48	0.998	0.997
02:13:51 p. m.	14.1	0.0	0.0	2.7	3.0	719	0	1.48	0.997	0.996
02:13:56 p. m.	14.2	0.0	-1.0	1.7	-1.0	696	0	1.48	0.999	0.999
02:13:59 p. m.	14.2	0.0	-1.0	1.4	-1.0	708	0	1.48	0.998	0.998
02:14:08 p. m.	14.4	0.0	-1.0	-32674.0	-1.0	2377	26	12.59	1.010	0.999
02:14:20 p. m.	14.6	0.2	3.0	0.6	685.0	2233	21	5.93	0.882	0.873
02:14:21 p. m.	14.6	0.4	4.0	0.6	641.0	3031	28	26.46	1.009	1.005

Ilustración 3.15. Valores discriminados para el cálculo de masa de contaminantes.

Como se puede observar en la ilustración 3.15 existen valores negativos de concentraciones remarcados en color rojo. Estos valores negativos de concentraciones se registran de esta manera principalmente por dos razones: la primera es debido a que son concentraciones muy bajas que tienden a cero, cuando sucede esto los datos se registran con valores negativos entre -1 y -20, y la segunda razón es por error del sistema en la conversión numérica que realiza el computador del analizador presentando valores negativos alrededor de -3000.

Para el primer caso se consideró los valores entre -1 y -20 igual a cero, mientras que en el segundo caso se hizo un análisis de los valores anteriores y posteriores, cuando estos no presentaban un cambio significativo se promediaron dichos valores o en caso de presentar una diferencia relevante simplemente se discriminaban.

Después de realizar las consideraciones anteriores y de organizar la información, se pudo determinar los parámetros que no se obtienen directamente de la computadora del vehículo.

Antes de calcular la masa de contaminantes, se hizo el cálculo de la distancia recorrida aproximada y el tiempo de duración de cada una de las rutas a partir de la hora y la velocidad del vehículo registrada en la tarjeta electrónica. Para obtener la distancia del recorrido se multiplicó la velocidad por cada intervalo de tiempo registrado, como lo muestra la ecuación 1.

$$d = V * t * \frac{1000}{3600} \quad (1)$$

Donde:

d: distancia (m)

V: velocidad $\left(\frac{km}{h}\right)$

t: tiempo (seg)

$\frac{1000}{3600}$: factor de conversión de unidades

La ecuación 1 se introdujo en una hoja de cálculo para obtener la distancia recorrida de cada intervalo de datos registrados y posteriormente sumarlos para obtener el tiempo y la distancia total de la prueba, la ilustración 3.16.

Hora	Tiempo (seg)	Vel. km/h	Distancia [m]
12:57:20		4	
12:57:21	1	3	$=((B3*D3)/3600)*1000$
12:57:23	2	4	2.57
12:57:24	1	5	1.61
12:57:26	2	4	2.57
12:57:27	1	5	1.61
12:57:29	2	4	2.57
12:57:30	1	4	1.29

Ilustración 3.16. Cálculo de la distancia de la primera prueba para la ruta con tráfico.

Este procedimiento se hizo para cada una de las rutas, la tabla que resume los periodos de duración y distancia de las pruebas se presenta más adelante.

Para la estimación de la masa de contaminantes se consideró a los gases de escape como una mezcla de gases ideales. Los componentes de esta mezcla se limitaron a oxígeno, monóxido de carbono, bióxido de carbono, monóxido de nitrógeno, bióxido de nitrógeno, hidrocarburos no quemados y nitrógeno.

Existen otros productos resultados de la combustión, pero no son considerados en los cálculos debido a que representan un valor menor al 1% del total de los gases de escape.

Partiendo de la ecuación de estado, o también denominada ecuación de gas ideal, se tiene la siguiente ecuación:

$$PV = mRT \quad (1)$$

Donde:

P: Presión del gas

V: Volumen del gas

m: Masa del gas

R: Constante del gas

T: Temperatura del gas

La constante del gas R es distinta para cada gas y se determina a partir de la ecuación 2.

$$R = \frac{R_u}{M} \quad (2)$$

Donde:

Ru: Constante universal de los gases

M: masa molecular

Aplicando la ecuación 1 para cualquier gas producto de la combustión, se reescribe de la siguiente manera:

$$P_i V_i = m_i R_i T_i \quad (3)$$

Donde i es igual a CO, CO₂, NO_x y HC.

De forma similar, aplicando la ecuación de estado, pero ahora para la mezcla de gases de escape originados por la combustión, se obtiene la ecuación 4.

$$P_{ge} V_{ge} = m_{ge} R_{ge} T_{ge} \quad (2)$$

Dividiendo la ecuación 3 entre 4, obtenemos la ecuación 5:

$$\frac{P_i V_i}{P_{ge} V_{ge}} = \frac{m_i R_i T_i}{m_{ge} R_{ge} T_{ge}} \quad (5)$$

Sustituyendo 2 en 5, obtenemos:

$$\frac{P_i V_i}{P_{ge} V_{ge}} = \frac{m_i T_i \frac{R_u}{M_i}}{m_{ge} T_{ge} \frac{R_u}{M_{ge}}} \quad (6)$$

Considerando que la temperatura de cada gas es la misma que la temperatura de toda la mezcla, la ecuación 6 se simplifica de la siguiente manera:

$$\frac{P_i V_i}{P_{ge} V_{ge}} = \frac{m_i M_{ge}}{m_{ge} M_i} \quad (7)$$

En una mezcla de gases ideales, las moléculas de gas se comportan como si estuvieran solas, ocupan todo el volumen y contribuyen con su presión a la presión total ejercida. La predicción del comportamiento P-v-T de mezcla de gases suele basarse en dos modelos: ley de Dalton de las presiones aditivas y la ley de Amagat de volúmenes aditivos.

- **Ley de Dalton de presiones aditivas:** La presión de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones que cada gas ejercería si existiera sólo a la temperatura y volumen de la mezcla. [36]

$$P_m = \sum_{i=1}^k P_i(T_m, V_m) \quad (8)$$

La presión del componente ejercida por un gas en una mezcla de gases ideales, en virtud de la ley de Dalton, puede expresarse como:

$$P_i = \frac{N_i R_u T_m}{V_m} \quad (9)$$

Donde T_m y V_m son la temperatura y el volumen de la mezcla. La presión total de la mezcla de gases ideales está dada por la expresión 10.

$$P_m = \frac{N_m R_u T_m}{V_m} \quad (10)$$

Dividiendo la ecuación 9 entre la ecuación 10 se obtiene una relación entre la presión P_i y su fracción molar y_i .

$$\frac{P_i}{P_m} = \frac{\frac{N_i R_u T_m}{V_m}}{\frac{N_m R_u T_m}{V_m}} = \frac{N_i}{N_m} = y_i \quad (11)$$

➤ **Ley de Amagat de volúmenes aditivos:** *El volumen de una mezcla de gases es igual a la suma de los volúmenes que cada gas ocuparía si existiera sólo a la temperatura y presión de la mezcla. [36]*

$$V_m = \sum_{i=1}^k V_i(T_m, P_m) \quad (12)$$

El volumen ocupado por un gas ideal en una mezcla de gases está dado por la expresión 13.

$$V_i = \frac{N_i R_u T_m}{P_m} \quad (13)$$

Donde T_m y P_m son la temperatura y la presión de la mezcla. El volumen total de la mezcla de gases ideales está dada por la expresión 14.

$$V_m = \frac{N_m R_u T_m}{P_m} \quad (14)$$

Dividiendo la ecuación 13 entre la ecuación 14, se obtiene:

$$\frac{V_i}{V_m} = \frac{\frac{N_i R_u T_m}{P_m}}{\frac{N_m R_u T_m}{P_m}} = \frac{N_i}{N_m} = y_i \quad (15)$$

Claramente se puede deducir de las ecuaciones 11 y 15 que:

$$\frac{V_i}{V_m} = \frac{P_i}{P_m} = \frac{N_i}{N_m} = y_i \quad (16)$$

Para mezclas de gases ideales la fracción molar, la fracción volumétrica y la fracción entre la presión del componente y la presión total son iguales para un estado determinado.

Por lo tanto, sustituyendo la fracción volumétrica en la ecuación 7 se tiene:

$$\frac{V_i}{V_{ge}} \frac{V_i}{V_{ge}} = \frac{m_i M_{ge}}{m_{ge} M_i} \rightarrow \left(\frac{V_i}{V_{ge}} \right)^2 = \frac{m_i M_{ge}}{m_{ge} M_i} \quad (17)$$

Despejando m_i de la ecuación 17 se obtiene el modelo matemático para el cálculo de la masa de cada contaminante, ecuación 18.

$$\dot{m}_i = \left(\frac{V_i}{V_{ge}} \right)^2 * \frac{M_i}{M_{ge}} * \dot{m}_{ge} \quad (18)$$

Donde \dot{m}_i y \dot{m}_{ge} están en g/s .

La fracción volumétrica de la ecuación 18 es la concentración de gas medida por el analizador, el resto de los elementos que componen la ecuación tienen que ser calculados.

$$\dot{m}_i = (\%V_i)^2 * \frac{M_i}{M_{ge}} * \dot{m}_{ge} \quad (19)$$

Como se mencionó anteriormente, se consideró que la mezcla de gases de escape está compuesta por oxígeno, monóxido de carbono, bióxido de carbono, monóxido de nitrógeno, bióxido de nitrógeno, hidrocarburos no quemados y nitrógeno. Esta consideración se hizo con la finalidad de calcular la masa molar de la mezcla y de cada componente.

La masa molecular de un compuesto es igual al peso molecular del mismo y que es la relación que guarda entre la masa y la cantidad de sustancia del mismo (g/mol o kg/kmol). A su vez la masa molecular es la suma de las masas atómicas de los elementos que componen la molécula [38]. La tabla 4.1 concentra los valores de las masas atómicas que se necesitan para el cálculo de la masa molar.

Elemento	Símbolo	Masa Atómica (u*)
Carbono	C	12.01
Hidrógeno	H	1.008
Nitrógeno	N	14.01
Oxígeno	O	16.00

Tabla 3.2. Masas atómicas de los elementos [38].

*unidad de masa atómica

Por ejemplo, la masa molecular del CO₂ es:

$$1 \text{ (masa atómica de C)} + 2 \text{ (masa atómica del O)} = 1 (12.01) + 2 (16.00)$$

por lo tanto,

$$M_{CO_2} = 44.01 \text{ g/mol}$$

El procedimiento de cálculo de la masa molecular es el mismo para oxígeno, monóxido de carbono y nitrógeno. Sin embargo, para el cálculo de la masa molar de óxidos de nitrógeno, hidrocarburos no quemados y mezcla de gases de escape se tuvieron algunas consideraciones.

Se contempló que la masa molecular total de óxidos de nitrógenos es la suma de la masa molecular de monóxido de nitrógeno y bióxido de nitrógeno.

$$M_{NO_x} = M_{NO} + M_{NO_2} \quad (20)$$

$$1 \text{ (masa atómica de N)} + 1 \text{ (masa atómica del O)} = 1 (14.01) + 1 (16.00)$$

$$M_{NO} = 30.01 \text{ g/mol}$$

$$1 \text{ (masa atómica de N)} + 2 \text{ (masa atómica del O)} = 1 (14.01) + 2 (16.00)$$

$$M_{NO_2} = 46.01 \text{ g/mol}$$

Sustituyendo los valores de cada masa molar en la ecuación 20:

$$M_{NO_x} = 30.01 \text{ g/mol} + 46.01 \text{ g/mol}$$

$$M_{NO_x} = 76.02 \text{ g/mol}$$

En el caso de los HC, la composición de la molécula y el valor de la masa molecular de la gasolina PEMEX Magna, combustible utilizado durante las pruebas, no es proporcionada por PEMEX [39]. Como una solución, se realizó una aproximación con base en el valor del número de octano de la gasolina PEMEX Magna y la composición de las moléculas de los combustibles iso-octano y n-heptano, combustibles de referencia para asignar el octanaje de las gasolinas.

El número de octano es un valor asignado a las gasolinas para indicar la capacidad antidetonante en los motores de combustión interna. Esta capacidad antidetonante se mide usando una escala arbitraria, donde el iso-octano (C_8H_{18}) tiene un índice de 100 (poco detonante) y el n-heptano (C_7H_{16}) un índice de 0 (muy detonante). Si una gasolina presenta propiedades antidetonantes similares a una mezcla de 95% de iso-octano y 5% de n-heptano, se considera que tiene un número de octano de 95 [40].

El número de octano de la gasolina PEMEX Magna es de 87, lo cual implica que tiene propiedades similares a una mezcla de 87% de iso-octano y 13% n-heptano. Con lo anterior, se hizo la siguiente una aproximación en la composición de la molécula de la gasolina Magna, teniendo lo siguiente:

$$C_{Mag} = 0.87(C_{oct}) + 0.13(C_{hept}) \quad (21)$$

Donde:

C_{Mag} : Número de carbonos que componen la molécula de la gasolina PEMEX Magna.

C_{oct} : Número de carbonos que componen la molécula de iso-octano.

C_{hept} : Número de carbonos que componen la molécula de n-heptano.

$$H_{Mag} = 0.87(H_{oct}) + 0.13(H_{hept}) \quad (22)$$

Donde:

H_{Mag} : Número de carbonos que componen la molécula de la gasolina PEMEX Magna.

H_{oct} : Número de carbonos que componen la molécula de iso-octano.

H_{hept} : Número de carbonos que componen la molécula de n-heptano.

$$C_{Mag} = 0.87(8) + 0.13(7) = 7.87$$

$$H_{Mag} = 0.87(18) + 0.13(16) = 17.74$$

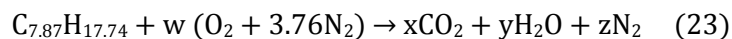
por lo tanto, la composición aproximada de la molécula de la gasolina es $C_{7.87}H_{17.74}$.

El procedimiento de cálculo de la masa molecular es el mismo con el que se ejemplifico utilizando el bióxido de carbono.

Finalmente, para la masa molecular de la mezcla de gases de escape se hizo un balance químico entre los reactivos y los productos de la combustión. La gasolina reacciona con el aire para producir bióxido de carbono, agua y nitrógeno.

El aire está compuesto principalmente de 78% de N_2 , 21% de O_2 y 1% de otros gases. Con fines de simplificar los cálculos, se consideró una composición de 79% de N_2 y 21% de O_2 , con otras palabras, la proporción de nitrógeno respecto al oxígeno es de 3.76 a 1.

La ecuación para el balance químico es la siguiente:



Haciendo el balance de la ecuación 23, se tiene:

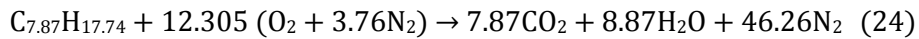
$$C: \quad 7.87 = x$$

$$H: \quad 17.74 = 2y \quad \rightarrow \quad y = \frac{17.74}{2}, \quad y = 8.87$$

$$O: \quad 2w = 2x + y \quad \rightarrow \quad w = \frac{2x+y}{2} = \frac{2(7.87)+8.87}{2}, \quad w = 12.305$$

$$N_2: \quad 3.76w = z \quad \rightarrow \quad z = 3.76(12.305), \quad z = 46.2668$$

Por lo tanto, la ecuación balanceada queda de la siguiente manera:



La parte izquierda de la ecuación 24 representa la mezcla aire-combustible que es igual a la mezcla de gases de escape, por consiguiente, la masa molecular M_{ge} es la suma de las masas moleculares del combustible y aire, por lo tanto se tiene:

$$M_{ge} = M_{combustible} + M_{aire} \quad (25)$$

$$M_{ge} = 7.87(12.01) + 17.74(1.008) + 12.305[2(16) + 3.76(2)(14.01)]$$

$$M_{ge} = 1802.56 \text{ g/mol}$$

La tabla 3.3 resume las masas moleculares de todos los compuestos.

Compuesto	Masa Molecular (g/mol)
CO ₂	44.01
CO	28.01
NO _x	76.02
HC	112.4
Mge	1802.56

Tabla 3.3 Masas moleculares de compuestos.

El otro parámetro que no se puede obtener directamente es el gasto total de gases de escape, para obtenerlo se tiene que calcular el flujo másico de combustible inyectado en la cámara de combustión. Para obtener el gasto de combustible se emplearon los valores de los sensores MAF y los sensores de oxígeno relación aire-combustible.

Los sensores de oxígeno relación aire-combustible proporcionan el valor del dosado relativo, que para fines de cálculos se referirá como coeficiente lambda (λ). Teniendo en cuenta que por cada kilogramo de gasolina se necesitan 14.7 de aire, conocido como relación estequiométrica, tenemos lo siguiente:

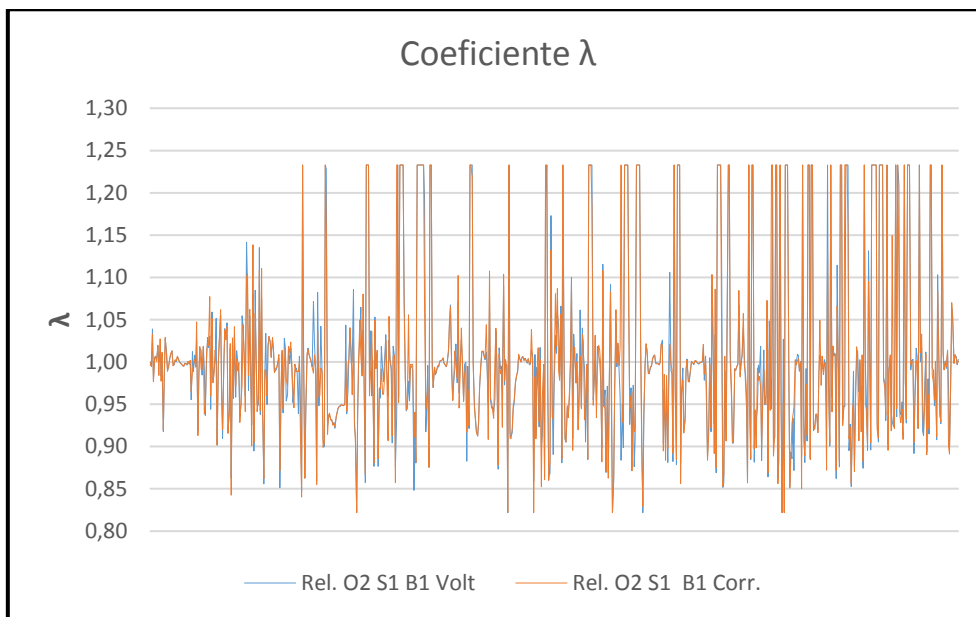
$$\lambda = \frac{\text{Cantidad real de aire/gasolina}}{\text{Relación estequiométrica de aire/gasolina}} = \frac{MAF/\dot{m}_c}{14.7} \quad (26)$$

Donde MAF es el gasto másico de aire en gramos por segundo (g/s) y \dot{m}_c es el gasto másico de combustible inyectado. Despejando el gasto de combustible de la ecuación 26 tenemos:

$$\dot{m}_c = \frac{MAF}{14.7\lambda} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (27)$$

Antes de ingresar la ecuación 21 en la hoja de cálculo de Excel y sustituir los valores correspondientes, se hizo una comparación de los datos registrados de los sensores de oxígeno.

Como se mencionó en el apartado 3.2.2, los PIDs 4 y 5 se programaron para que registraran el coeficiente lambda. La gráfica 3.1 ilustra los valores obtenidos durante la primera prueba RCT.



Gráfica 3.1. Valores discriminados para el cálculo de masa de contaminantes.

De la gráfica 3.1 se puede observar que ambos sensores registran prácticamente valores idénticos, por lo tanto, para fines de cálculo se utilizaron los valores registrados del PID 4.

La ecuación 27 se introdujo en una hoja de cálculo para obtener el gasto másico de combustible en gramos por segundo. La siguiente ilustración muestra algunos ejemplos de los valores obtenidos en la hoja de Excel.

Flujo aire MAF	Rel. O2 S1 B1 Volt	mc (g/s)
2.1	0.98	=15/(14.7*15)
2.1	1.01	0.140
2.0	1.01	0.137
2.0	1.00	0.136
2.0	1.02	0.132
2.0	1.00	0.137
5.0	1.01	0.333
4.0	0.98	0.277

Ilustración 3.17. Cálculo del gasto de combustible inyectado a la cámara de combustión en gramos por segundo.

Teniendo el gasto másico de combustible y aire, el cálculo del caudal de gases de escape se deduce de la ecuación 28.

$$\dot{m}_{ge} = \dot{m}_c + \dot{m}_a = \dot{m}_c + MAF \quad (28)$$

La siguiente ilustración ejemplifica el cálculo de la masa total de contaminantes en Excel.

Flujo aire MAF	mc (g/s)	mge (g/s)
2.1	0.144	=K5+I5
2.1	0.140	2.2
2.0	0.137	2.2
2.0	0.136	2.1
2.0	0.132	2.1
2.0	0.137	2.1

Ilustración 3.18. Cálculo del gasto total de gases de escape.

Obteniendo el flujo total de gases de escape, se tienen todos los datos necesarios para sustituirlos en la ecuación 19 y obtener la masa de cada contaminante durante el recorrido. Por ejemplo, la masa emitida de CO₂ durante la primera prueba (RCT1) se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{CO_2} = (\%V_{CO_2})^2 * \frac{M_{CO_2}}{M_{ge}} * \dot{m}_{ge} \quad (29)$$

mge (g/s)	CO2 (%V)	CO2 (g/s)	MCO2	Mm (g/mol)
	15		44	468.75
2.68	15	=((G3/100)^2)*(M52/N52)*F3		
2.28	15	0.0048		
2.21	15	0.0047		
2.21	15	0.0047		

Ilustración 3.19. Cálculo del gasto másico de CO₂.

El mismo procedimiento se realiza para el resto de las emisiones.

El análisis de resultados y algunas gráficas que muestran el comportamiento de cada contaminante durante las pruebas, se presentan en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se consideró el análisis de resultados en un capítulo con el objetivo de presentar detalladamente las emisiones contaminantes estimadas a partir de los datos obtenidos de las pruebas experimentales. Los apartados de este capítulo consideran la sistematización de datos experimentales, cálculo de masa de emisiones contaminantes y gráficas.

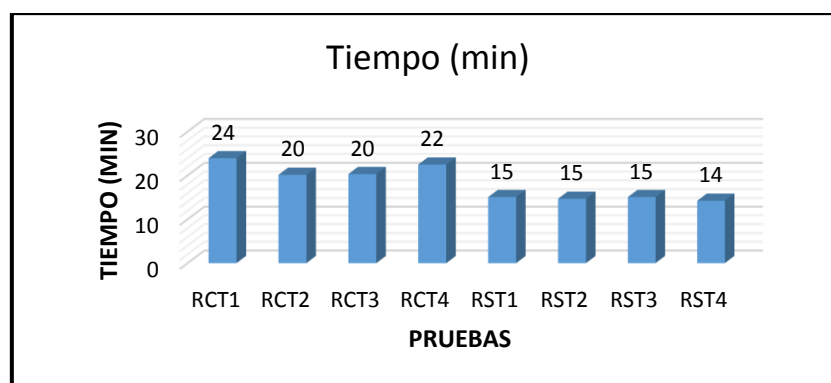
Como se estableció anteriormente, se realizaron dos tipos de rutas distintas. La primera considerada como ruta con tráfico (RCT) y la segunda como ruta sin tráfico (RST). La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de tiempo, distancia y emisiones totales durante los ocho ensayos realizados.

	Tiempo (min)	Distancia (km)	CO ₂ (g)	CO (mg)	HC (µg)	NO _x (µg)
RCT1	24	8.07	4.6	0.26	1.19	----
RCT2	20	8.03	4.2	0.26	1.34	109
RCT3	20	7.84	4.2	0.84	1.34	95
RCT4	22	7.81	5.0	0.25	----	7
RST1	15	9.69	5.3	8.17	----	96
RST2	15	10.00	6.6	6.45	0.20	98
RST3	15	9.68	5.1	2.88	1.16	86
RST4	14	9.65	5.0	2.85	1.63	81

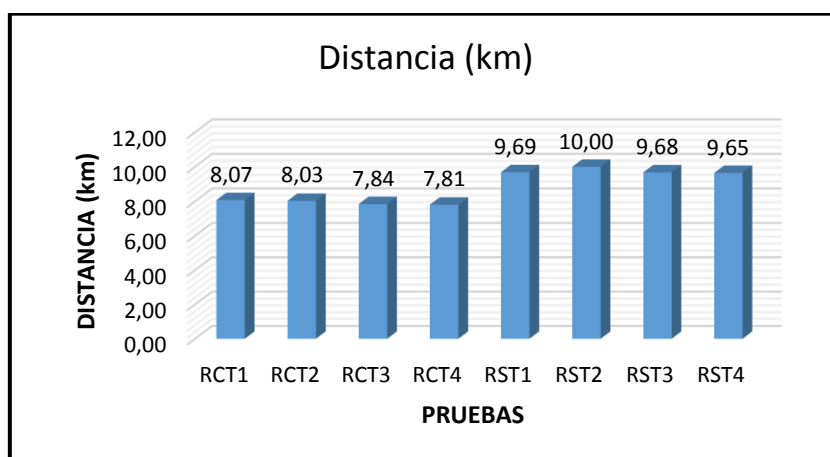
Tabla 4.1. Resultados totales de los ensayos.

En la tabla 4.1 no hay resultados de NO_x para la prueba RCT1 y de HC para las pruebas RCT4 y RST1, esto es debido a que el equipo registró una gran cantidad de datos negativos, los cuales no pudieron ser promediados o filtrados.

Las distancias y tiempo de los recorridos fueron distintos entre RCT y RST, siendo las primeras de menor distancia, pero con un mayor tiempo de recorrido. Las gráficas 1 y 2 muestran la diferencia entre tiempo y distancias de las pruebas.



Gráfica 1. Tiempos totales de las pruebas experimentales.

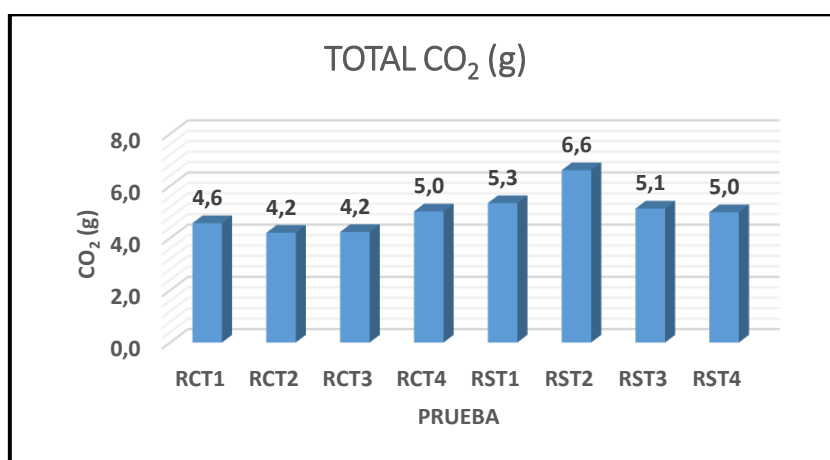


Gráfica 2. Distancias totales de las pruebas experimentales.

Se puede observar de la gráfica 2 que las distancias entre el mismo tipo de ruta son diferentes. En el caso de las rutas RCT la distancia mayor fue de 8.07 km y de 7.81 km para la de menor recorrido, teniendo una diferencia de 260 m en los cálculos. Por otro lado, la diferencia entre el recorrido de mayor distancia y el menor, 10 y 9.65 km respectivamente, fue de 350 m. Estas diferencias se atribuyen a la precisión y exactitud de la medición de los equipos, lo cual repercute en los resultados de los cálculos.

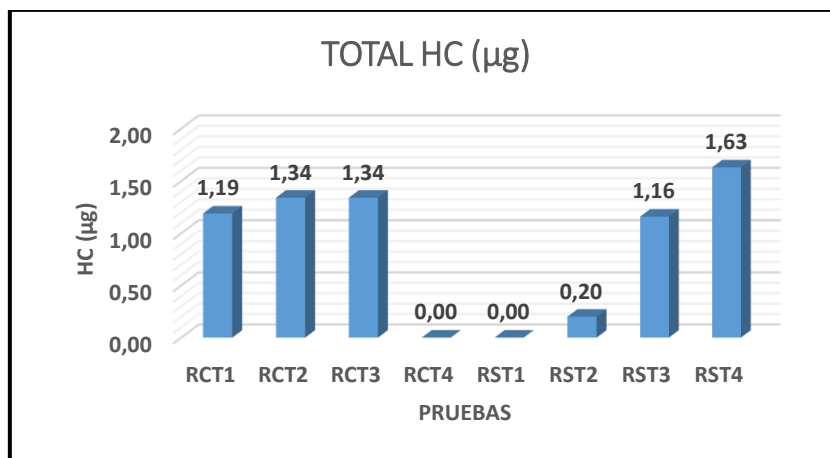
En el caso de las emisiones se obtuvo que el CO₂ es el de mayor magnitud, mientras que los HC (gasolina no quemada) se emiten en menor proporción.

Para las emisiones de CO₂, los resultados muestran que no existe una diferencia significativa entre el tipo de prueba pese a la desigualdad de distancia y tiempo. En la gráfica 3 se observa una diferencia de 2.4 g entre la prueba RST2, donde se emitió 6.6 g (mayor cantidad de CO₂), y las pruebas RCT2 y RCT3, donde se emitieron 4.2 g (menor cantidad de CO₂).



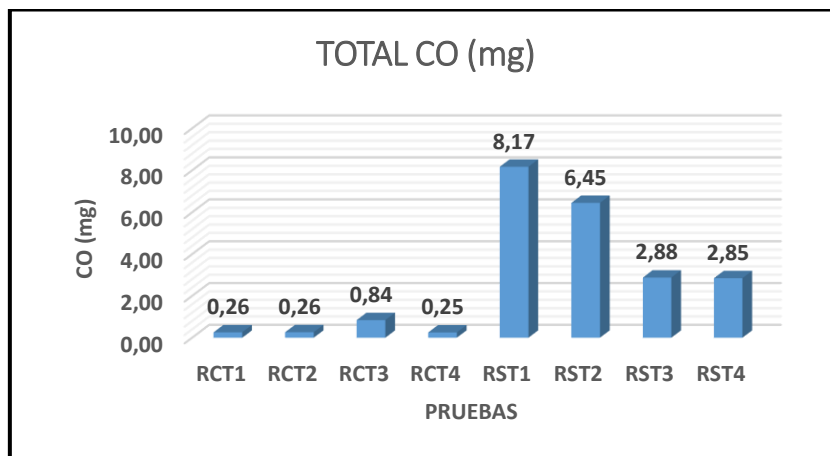
Gráfica 3. Gramos totales de CO₂ emitido en cada prueba experimental.

Por otra parte, únicamente se tuvieron tres pruebas de comparación por cada tipo de ruta para los HC (gráfica 4). Los niveles de emisión obtenidos en las pruebas RST muestran un incremento, por otra parte las emisiones de las pruebas RCT no muestran una variación significativa.



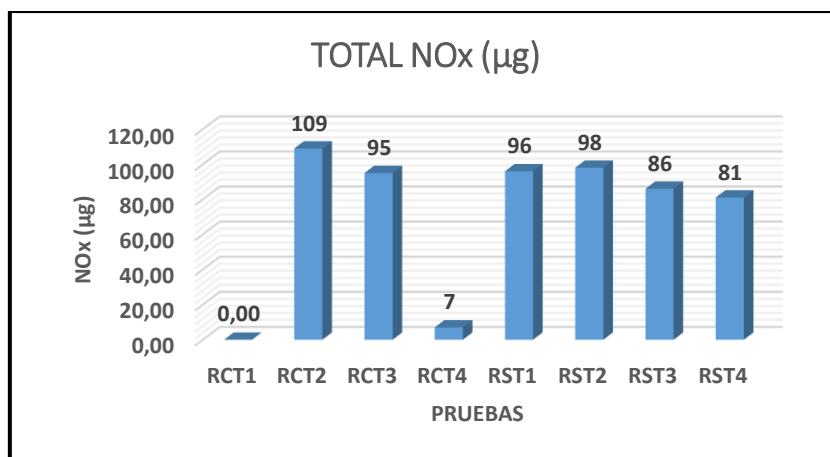
Gráfica 4. Microgramos totales de HC emitidos en cada prueba experimental.

De manera contraria a los HC, los niveles de CO fueron más altos en las pruebas RST. Se percibe que la cantidad emitida durante las pruebas con tráfico no es la mitad de los valores de las rutas sin tráfico, inclusive, la masa de CO de las dos primeras pruebas RST son las más elevadas. En la gráfica 5 se observa los valores de CO en miligramos.



Gráfica 5. Miligramos totales de CO emitidos en cada prueba experimental.

La masa de NOx, en microgramos, fue muy variada para cada una de las pruebas, sin importar el tipo de ruta. Los niveles más altos se presentaron en la prueba RCT3 con un total de 3.85 mg, sin embargo, para este mismo tipo de ruta con tráfico se tuvieron las emisiones más bajas en la prueba RCT4 con un total de 0.05 mg. En la gráfica 6 se pueden observar el resto de los valores obtenidos durante las pruebas, con excepción de la prueba RCT1, donde no se tuvieron suficientes datos para calcular la masa emitida de NOx.

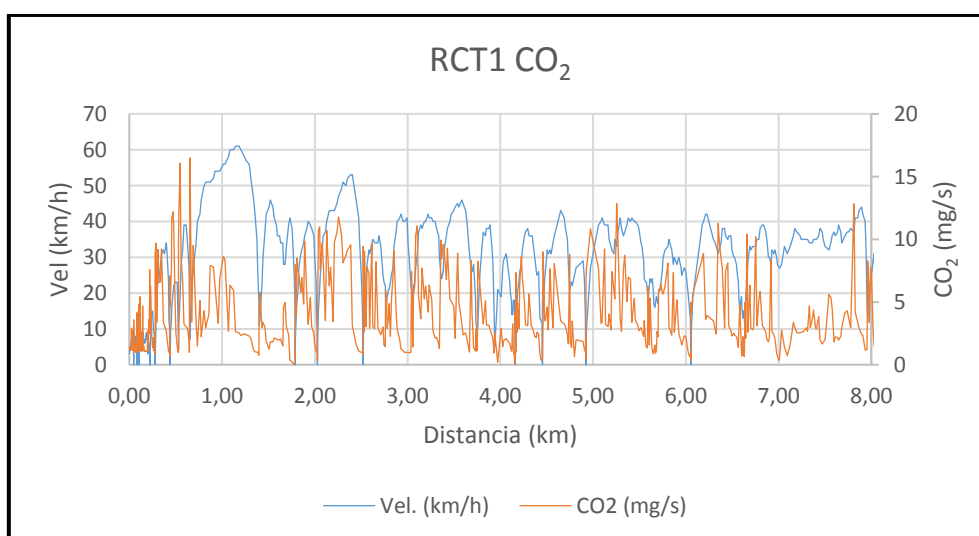


Gráfica 6. Miligramos totales de NOx emitidos en cada prueba experimental.

Es difícil concluir sobre el comportamiento de las emisiones durante las pruebas, debido a que estas se ven afectadas por muchas variables, por ejemplo: la forma de conducir, la tecnología del vehículo, la calidad del combustible, parque vehicular, tipo de camino, condiciones de operación del motor, entre otras. Sin embargo, con los datos obtenidos por el equipo instrumentado no sólo se puede calcular la masa de contaminantes, también se pueden realizar gráficas del comportamiento de variables durante las rutas.

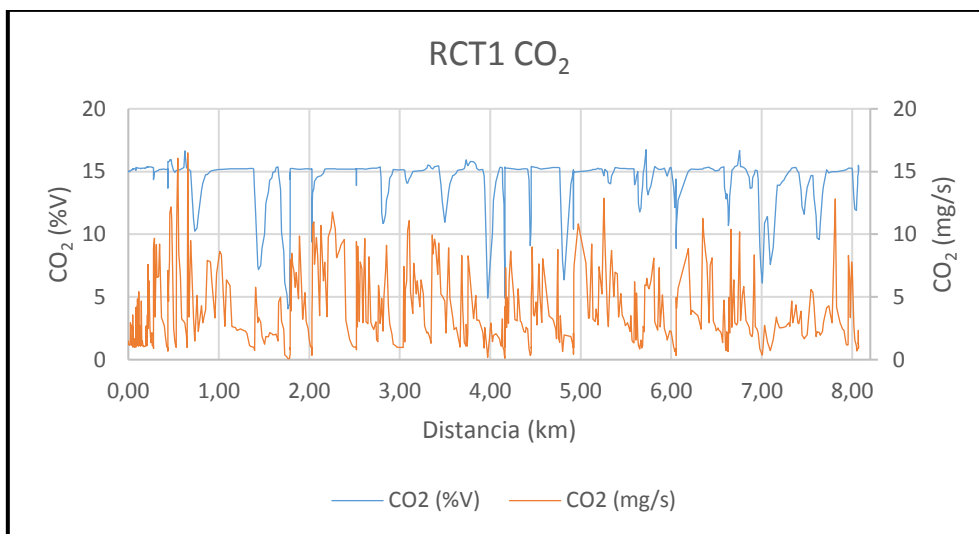
Únicamente como ejemplo, se presentan algunas gráficas de comportamiento del gasto másico de contaminantes de distintas rutas, el resto de las gráficas se adjuntan en el Anexo A del presente trabajo.

La variación del gasto másico de emisiones de CO₂ durante la ruta RCT1 se muestra en la gráfica 7. Esta variación de CO₂ se puede comparar con los cambios de velocidad que se tuvieron durante los casi 8 km de la ruta.



Gráfica 7. Velocidad y gasto másico de CO₂ durante la ruta RCT1.

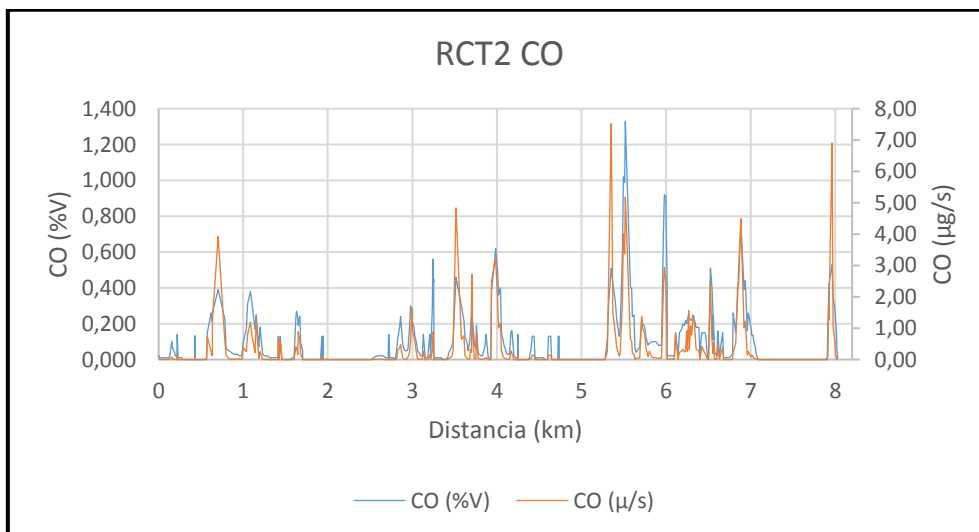
Este comportamiento en el gasto másico de CO₂ es lógico debido a todos los procesos transitorios en el motor del vehículo, sin embargo, la comparación de las concentraciones este gas y el flujo másico fueron totalmente distintas, como se muestra en la gráfica 8.



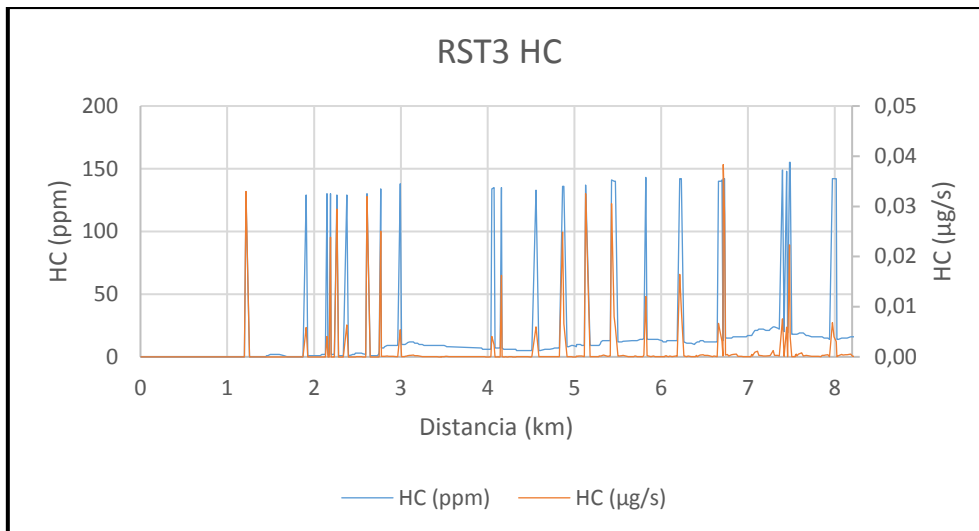
Gráfica 8. Concentración en volumen y gasto másico de CO₂ durante la ruta RCT1.

Resultados similares de CO₂ se obtuvieron en todos los ensayos, pruebas en ruta con tráfico y sin tráfico, lo cual hizo pensar en un inicio que se tenía algún error en el cálculo de la masa o alguna consideración que no se tuvo.

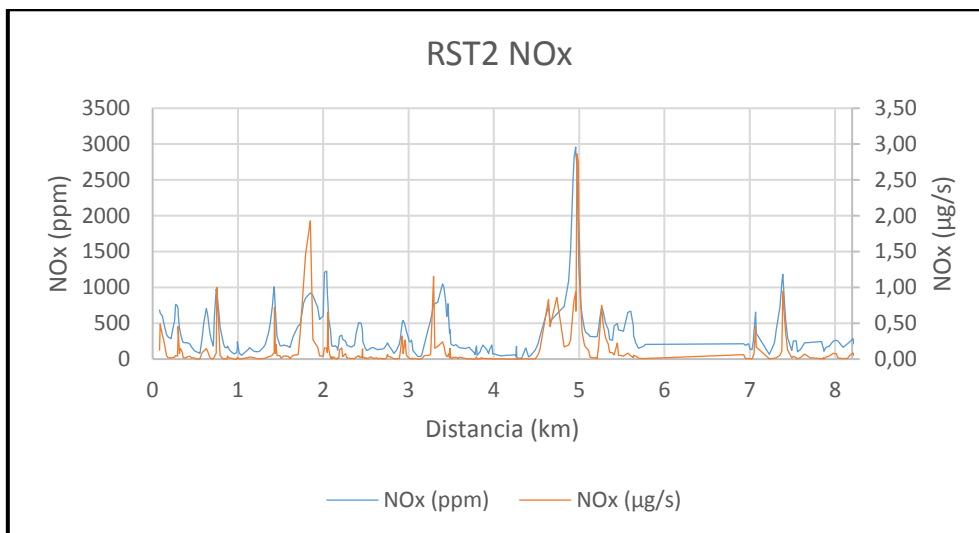
Analizando los resultados del resto de las emisiones, presentan comportamientos esperados entre la concentración y el gasto másico para los dos tipos de rutas. Las gráficas 9, 10 y 11 muestran dicho comportamiento para CO en la ruta RCT2, HC en la ruta RST3 y NO_x en la ruta RST2 respectivamente.



Gráfica 9. Concentración en volumen y gasto másico de CO durante la ruta RCT2.



Gráfica 10. Concentración en volumen y gasto másico de HC durante la ruta RST3.



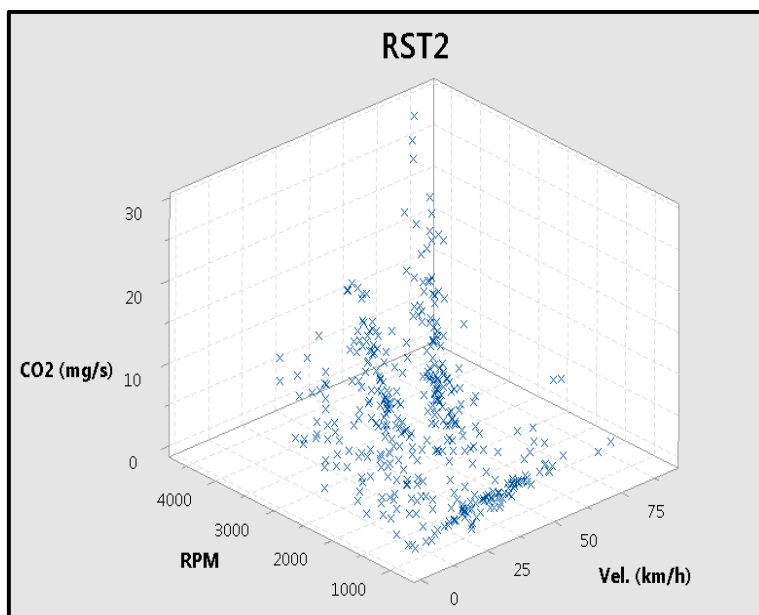
Gráfica 11. Concentración en volumen y gasto másico de NOx durante la ruta RST2.

Es importante recalcar que a pesar de los comportamientos de concentraciones y gasto másico de estos tres últimos contaminantes tienen una relación proporcional, las velocidades de cada tipo de ruta fueron distintas (ver Anexo A). La velocidad promedio en las pruebas con tráfico fue de 22 km/h y la máxima de 61 km/h en la prueba RCT1, en cambio, el promedio para las rutas sin tráfico fue de 40 km/h y la máxima de 94 km/h en la prueba RST4.

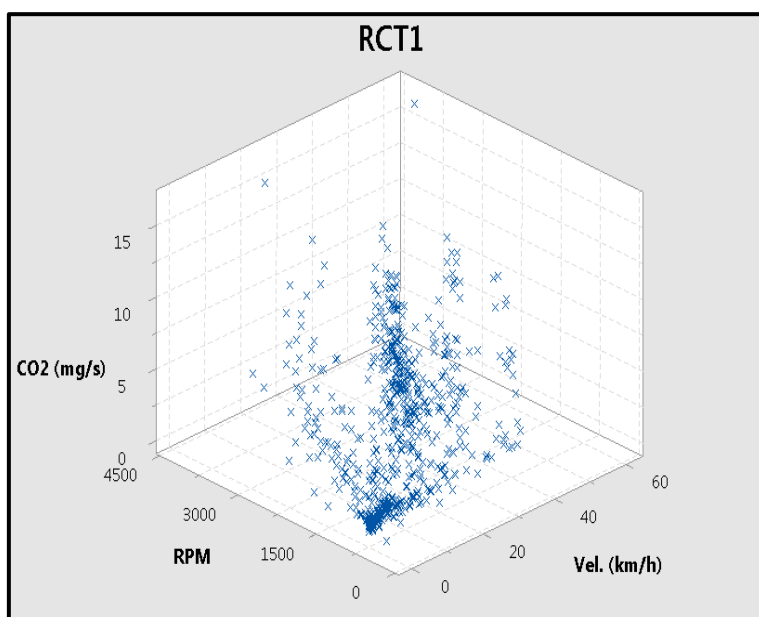
Además de las gráficas presentadas anteriormente, también se incluyen mapas 3D en el Anexo B. Los mapas 3D que se realizaron tienen la finalidad de comprender en que puntos de operación del motor o condiciones de manejo se presentan la mayor incidencia de emisiones.

En el caso del CO₂, presenta una dispersión de emisiones para distintos valores de velocidad y revoluciones del motor durante las pruebas sin tráfico. Para las rutas con tráfico existe una mayor incidencia a velocidades de 30 a 40 km/h y en ralentí, es decir, cuando el vehículo está en alto total y el

motor trabaja a bajas revoluciones. El mapa 1 muestra el mapa 3D de la ruta RST2, mientras que el mapa 2 muestra el mapa 3D de la ruta RCT.

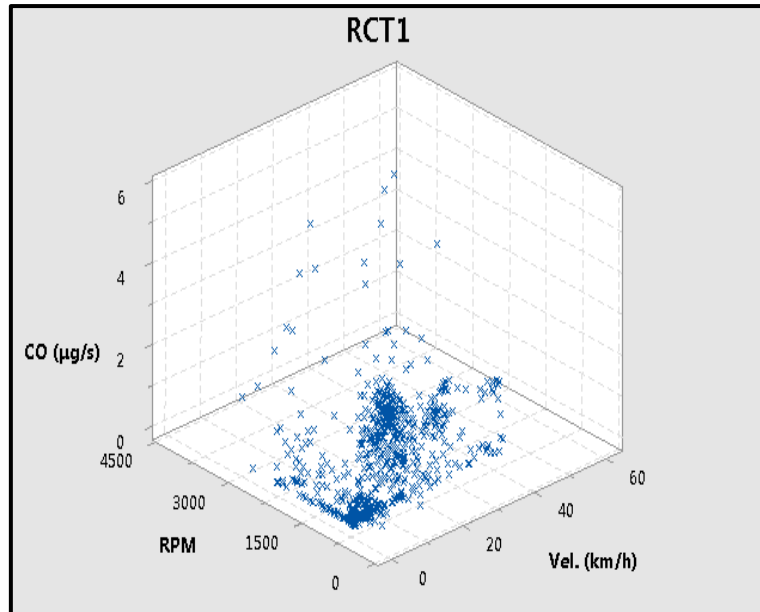


Mapa 1. Mapa 3D de la masa en gramos de CO₂ durante la ruta RST2.

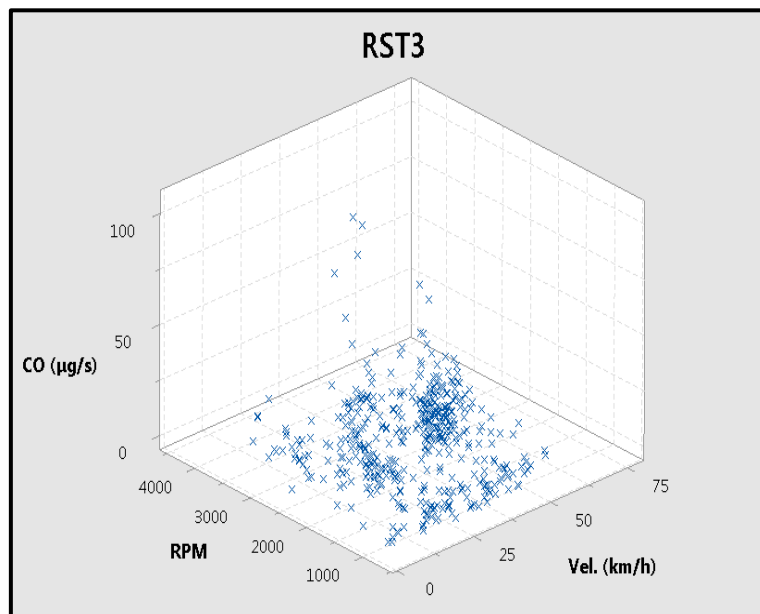


Mapa 2. Mapa 3D de la masa en gramos de CO₂ durante la ruta RCT1.

Un comportamiento similar se observa en los mapas de CO, la mayoría de las pruebas con tráfico presentan una mayor incidencia en ralentí y una dispersión en las pruebas sin tráfico, a diferencia de que el flujo másico de CO ($\mu\text{g/s}$) es mucho menor en comparación del CO₂ (mg/s), mapas 3 y 4 respectivamente.

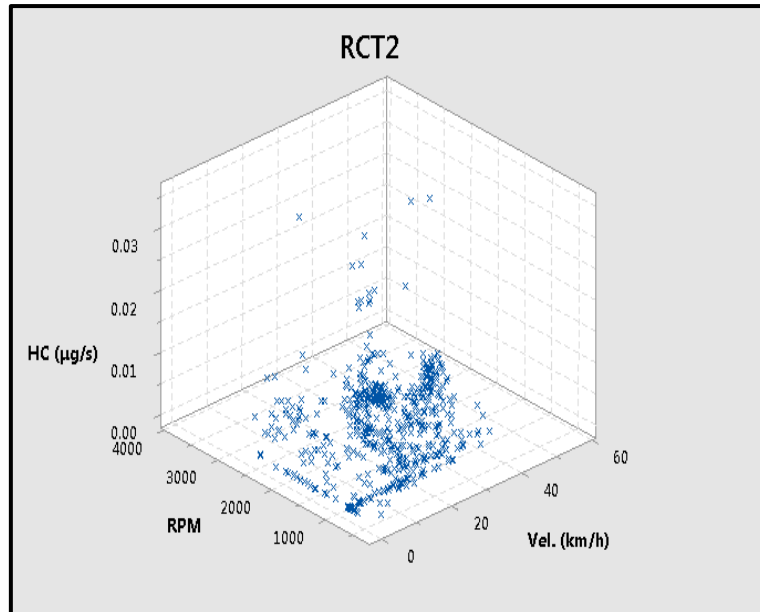


Mapa 3. Mapa 3D de la masa de CO durante la ruta RCT1.

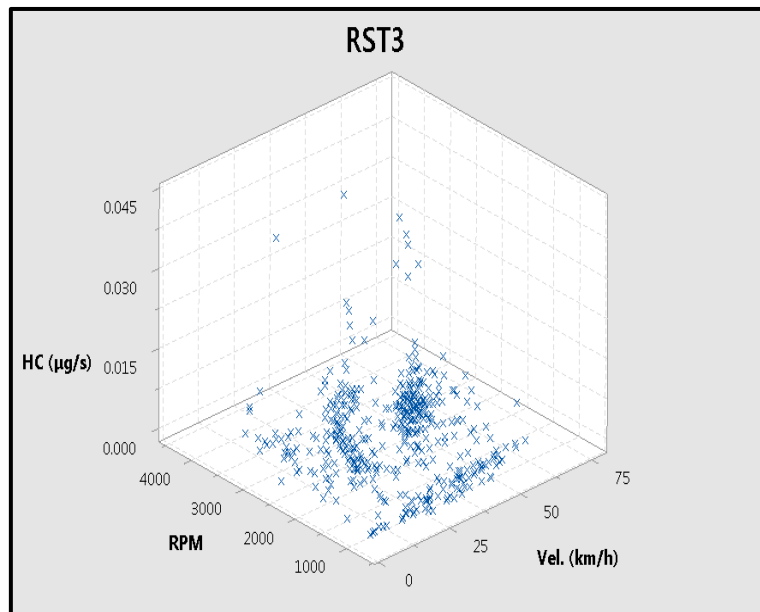


Mapa 4. Mapa 3D de la masa de CO durante la ruta RST3.

En el caso de los HC, existen concentraciones de puntos en distintas pruebas y a distintos valores de velocidad y rpm, como son las pruebas RCT2 y RST3 (mapas 5 y 6), donde se aprecia emisiones en velocidades aproximadas de 30 a 40 km/h y revoluciones entre 2000 y 3000 rpm.

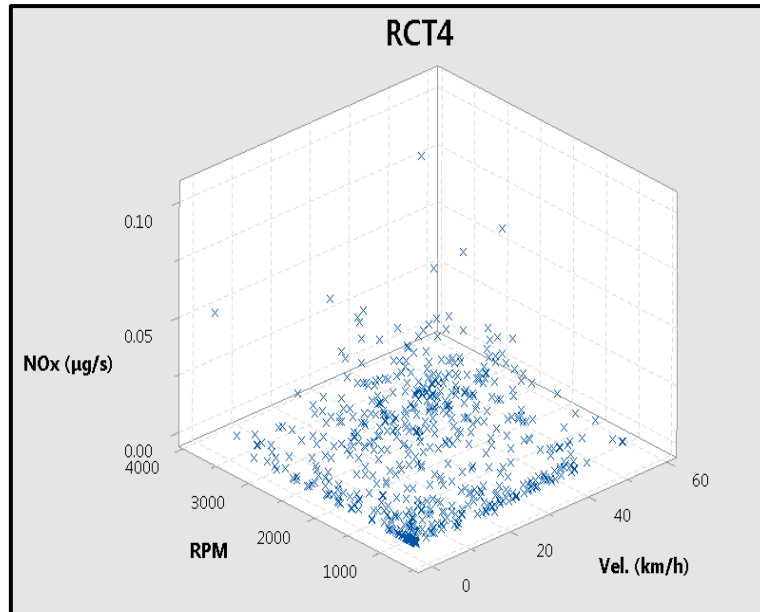


Mapa 5. Mapa 3D de HC de la prueba RCT2.

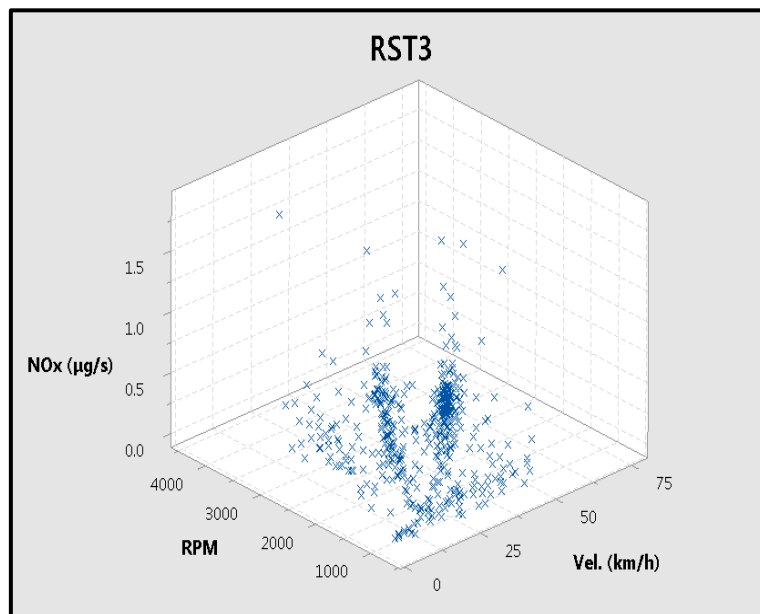


Mapa 6. Mapa 3D de HC de la prueba RST3.

Finalmente, hay dos casos distintos en la incidencia de emisiones de NOx. El primero se presenta en valores de ralentí en la ruta RCT4 y el segundo para valores aproximados de 50 km/h y 2000 rpm en la prueba RST3.



Mapa 7. Mapa 3D de NOx de la prueba RCT4.



Mapa 8. Mapa 3D de NOx de la prueba RST3.

Las gráficas y mapas 3D mostrados son algunos ejemplos de distintos tipos de gráficas que se pueden realizar con los datos obtenidos y calculados con este sistema.

CONCLUSIONES

El presente trabajo propuso un método para la medición a bordo de la masa de contaminantes productos de la combustión de un vehículo automotor en ruta. Con los datos obtenidos de la computadora electrónica del motor a través de la tarjeta UNAM ADM y utilizando las concentraciones de los gases (CO_2 , CO, HC y NO_x), aunado a las consideraciones de cálculo que se tuvieron, se realizó un cálculo aproximado de la masa emitida por un Toyota Corolla 2009 para dos tipos de rutas distintas dentro del circuito de Ciudad Universitaria.

Los resultados obtenidos de la masa de contaminantes presentan un orden de magnitud (para cada uno de ellos) congruente con los que se reporta en la literatura. Sin embargo, los valores no son iguales para cada contaminante y prueba realizada, esto era de esperarse debido a todas las variables que afectan a la formación de dichos gases medidos (condiciones de la ruta, forma de conducir, revoluciones del motor, renovación de la carga, etc).

La masa total emitida de CO_2 en cada una de las pruebas fue muy similar, el resto de las emisiones no presentan niveles similares como en estos casos. El CO tuvo niveles más altos para las rutas sin tráfico, mientras que los NO_x presentan un decremento para las rutas sin tráfico y los HC un incremento en mismo tipo de ruta. Cabe recordar que se recorrió una mayor distancia en menor tiempo para las rutas sin tráfico.

Además del cálculo de la masa de contaminantes, se pudo graficar parámetros de funcionamiento, por ejemplo, el sensor de oxígeno (sonda lambda), velocidad del vehículo y revoluciones del motor. Esto ayuda a identificar en qué condiciones de manejo u operación se presentan los niveles más altos o donde existe una mayor incidencia de emisiones.

En las gráficas 2D se puede apreciar que el CO_2 tiene la mayor variación en su comportamiento de emisiones; mientras que el CO, HC y NO_x presentan un incremento en su emisión cuando se desacelera el vehículo, es decir, cuando se frena. Otro comportamiento que se puede notar en los mapas 3D es que en varias pruebas se presenta una mayor incidencia de emisiones bajas cuando el vehículo está en alto total o velocidades muy bajas.

Las variables de las gráficas 2D y los mapas 3D únicamente son ejemplos de lo que se puede realizar, no obstante, existen otros parámetros que se pueden obtener directamente o indirectamente (calculados) con el sistema diseñado para poder graficarlos y hacer un análisis de las emisiones.

A pesar que se logró el objetivo de calcular la masa de contaminantes a bordo a partir de los sistemas anteriormente mencionados, presenta algunas limitantes que se tienen que resolver. Una de estas limitantes es que no se tiene acceso a todos los datos de la ECU de los vehículos, únicamente son proporcionados cierta cantidad y tipo de parámetros. Esto depende de los protocolos de comunicación y la arquitectura electrónica que tiene cada marca y modelo de vehículo.

Como trabajo a futuro y mejora de este método de estimación de emisiones, se menciona lo siguiente:

- 1) Encontrar un método de obtener los parámetros, esenciales en el cálculo de la masa de contaminantes, de vehículos que por fabricación únicamente proporcionan ciertos datos.
- 2) Mejorar la sincronización de los datos de la tarjeta UNAM ADM y el analizador de gases, para que por lo menos se tengan valores de cada segundo.
- 3) Solucionar el error en la conversión numérica que presenta el sistema en los niveles de concentración de gases.
- 4) Programar los modelos matemáticos que se presentaron en el sistema, con la finalidad de que se presenten automáticamente los niveles de masa de contaminantes.
- 5) Realizar pruebas con un vehículo que tenga un motor con una capacidad mayor (cilindrada y/o número de cilindros).
- 6) Realizar graficas 2D y mapas 3D con otros parámetros para un análisis más profundo del comportamiento de emisiones.

REFERENCIAS

Capítulo 1

- 1) Caselli, M. (2000). *La contaminación atmosférica. Causas y fuentes. Efectos sobre el clima, la vegetación y los animales*. (6 ed.) México: Siglo Veintiuno.
- 2) Bravo, A.H. (1987). *La contaminación del aire en México*. México: Fundación Universo Veintiuno.
- 3) Stern, C. A. (1973). *Fundamentals of air pollution*. Nueva York Estados Unido: Academic Press.
- 4) Rico Méndez, F. G., López Castañares, R. y Jaimes Figueroa, E. (2001). *Daños a la salud por contaminación atmosférica*. Toluca México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- 5) Manahan, S.E. (2007). *Introducción a la química ambiental*. (1 ed.) España: Reverté Ediciones.
- 6) Reporte técnico. (1999). *Óxidos de Nitrógeno (NOx), ¿por qué y cómo se controlan?* Environmental Protection Agency. Center on Air Pollution. United States.
- 7) Bravo, A.H., Sosa, E.R. y Torres, J.R. *Los criterios y metodologías para medir la calidad del aire. La Contaminación Atmosférica en México, sus causas y efectos en la salud*. México.
- 8) Parker, A. (1983). *Contaminación del aire por la industria*. España: Reverté Ediciones.
- 9) Alarcón Jiménez, A. L. (2012). *Lluvia ácida en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Evaluación y trascendencia*. México: Tesis de maestría Universidad Nacional Autónoma de México.
- 10) Cusano, A., Arregui, F. J., Giordano, M. y Cutolo, A. (2013). *Optochemical Nanosensors*. Estados Unidos: Taylor and Francis Group.
- 11) González Pindea, F. (2013). *Diseño de un laboratorio para evaluar emisiones contaminantes y prestaciones de vehículos y motores*. México: Tesis de maestría Universidad Nacional Autónoma de México.
- 12) González Calleja, D. (2012). *Motores térmicos y sistemas auxiliares*. Madrid España: Ediciones Paraninfo.

Capítulo 2

- 13) Payri, F. y Desantes, J.M. (2005). *Temas avanzados en motores de combustión interna. Influencia de los parámetros de inyección y la recirculación de gases de escape sobre el proceso de combustión en un motor diesel*. España: Editorial Reverté.
- 14) <https://www3.epa.gov/>
- 15) <https://www.arb.ca.gov/testmeth/testmeth.htm>
- 16) <https://www.dieselnets.com/>
- 17) <https://www.gob.mx/semarnat>
- 18) <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/>
- 19) <http://sma.edomex.gob.mx/>
- 20) <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/>
- 21) <http://www.gob.mx/comisionambiental>
- 22) NOM-045-SEMARNAT-2006
- 23) NOM-047-SEMARNAT-2014
- 24) NOM-048-SEMARNAT-1993
- 25) NOM-049-SEMARNAT-1993
- 26) NOM-050-SEMARNAT-1993
- 27) NOM-076-SEMARNAT-1995
- 28) NOM-077-SEMARNAT-1995
- 29) NOM-EM-167-SEMARNAT-2016

Capítulo 3

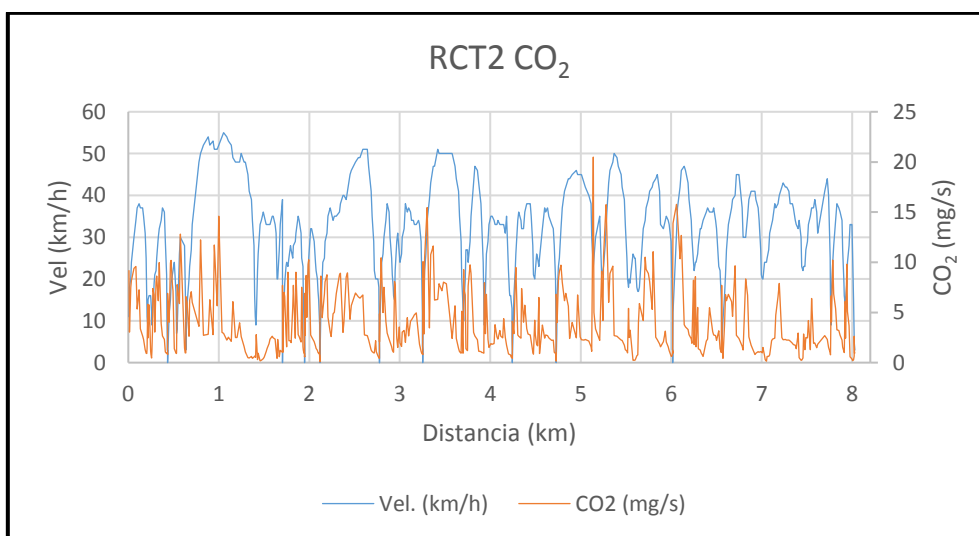
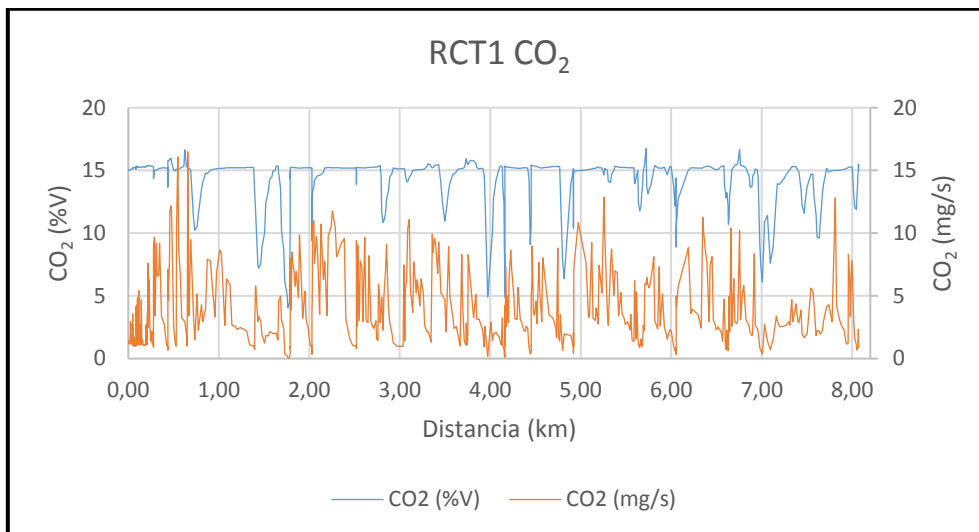
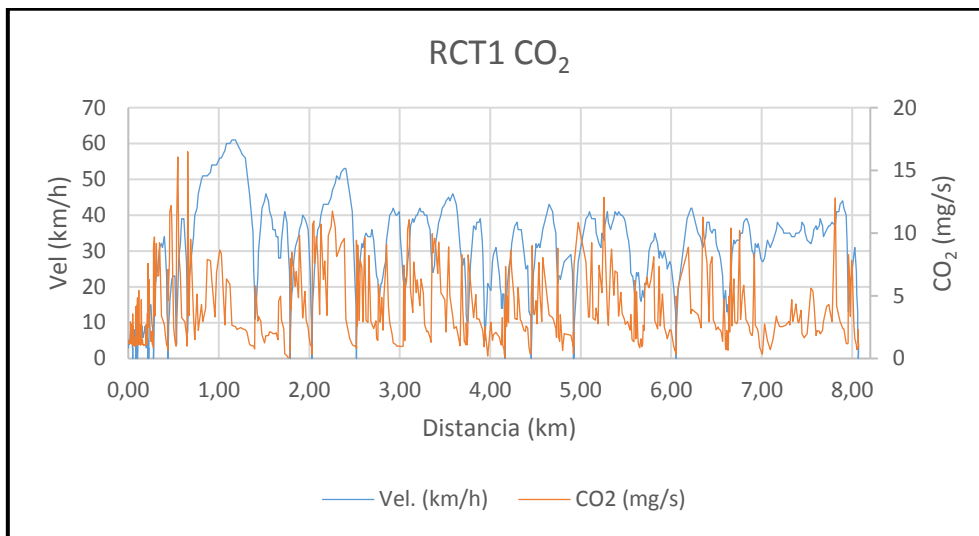
- 30) Duffy, J. E. (2014). *Modern Automotive Technology*. (8 ed.) Estados Unidos: The Goodheart-Willcox Company.
- 31) García Puertos, J.F. (2014). *Emisiones contaminantes de las mezclas de combustibles convencionales con biocombustibles, criterio y no reguladas*. México: Tesis de doctorado Universidad Nacional Autónoma de México.
- 32) Vázquez Aguilar, F. (2012). *Protocolo de ensayos con biodiesel en dinamómetro de banco simulando condiciones reales de un vehículo*. México: Tesis de licenciatura Universidad Nacional Autónoma de México.
- 33) International Standard ISO 15765-4. Diagnostics on Controller Area Network (CAN). Part 4: Requirements for emissions related systems.
- 34) Ramos Coria, D. A. (2014). *Diseño de un Sistema de Monitoreo OBDII con comunicación GSM*. México: Tesis de licenciatura Universidad Nacional Autónoma de México.
- 35) Giancoli, D.C. (2006). *Física, principios con aplicaciones*. (6 ed.) México: Pearson Educación.
- 36) Wark, K. (2001). *Termodinámica*. (6 ed.) España: Mc-Graw-Hill
- 37) Çengel, Y. A. y Boles, M. A. (2012). *Termodinámica*. (7 ed.) D.F., México: McGraw-Hill.
- 38) Chang, R. (2002). *Química*. (7 ed.) D.F., México: McGraw-Hill.
- 39) PEMEX - MAGNA. Hoja de Datos de Seguridad. Núm. Versión: 5, NOM-018-STPS-2000
- 40) Severns, W.H., Degler, H.E. y Miles, J.C. (2007). *Energía mediante vapor, aire o gas*. España: Editorial Reverté.
- 41) Zúñiga López, I. y Crespo del Arco, E. (2010). *Meteorología y Climatología*. Madrid, España: Editorial UNED.

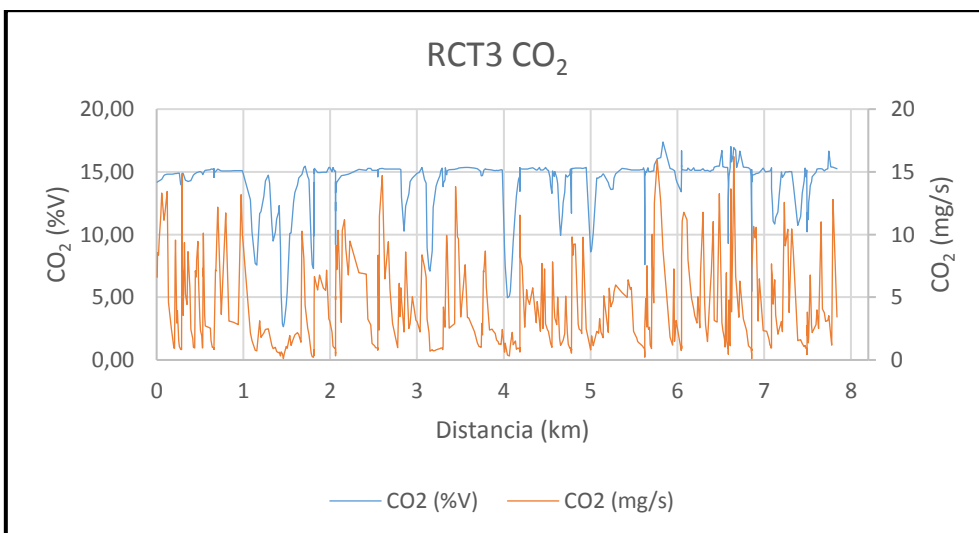
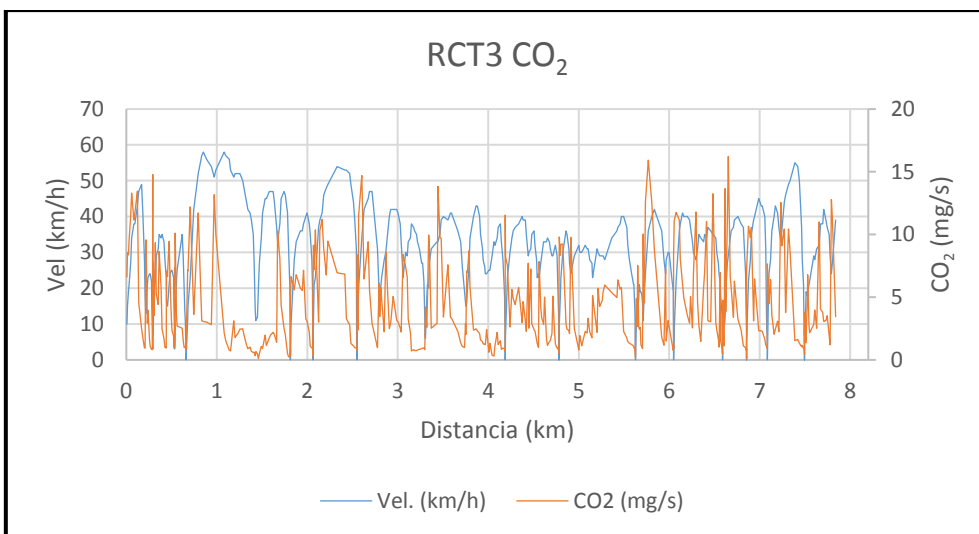
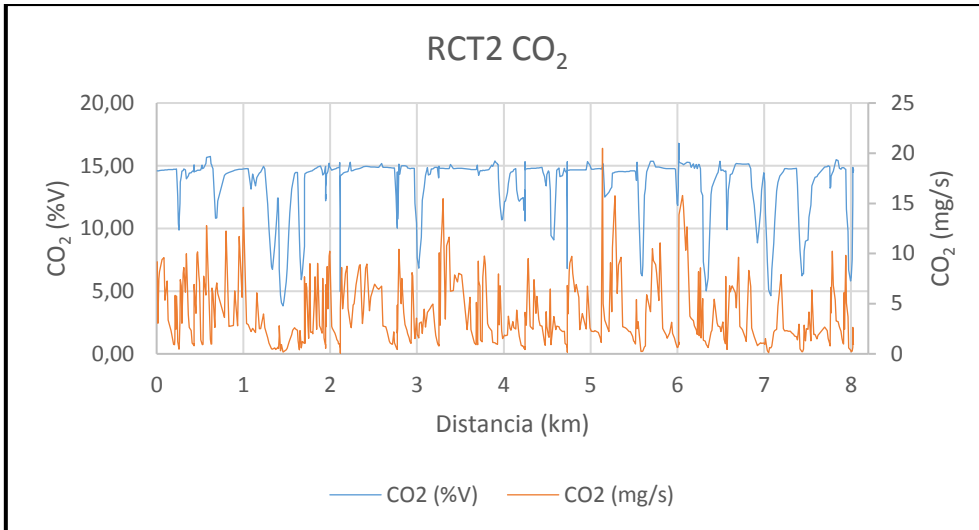
Capítulo 4

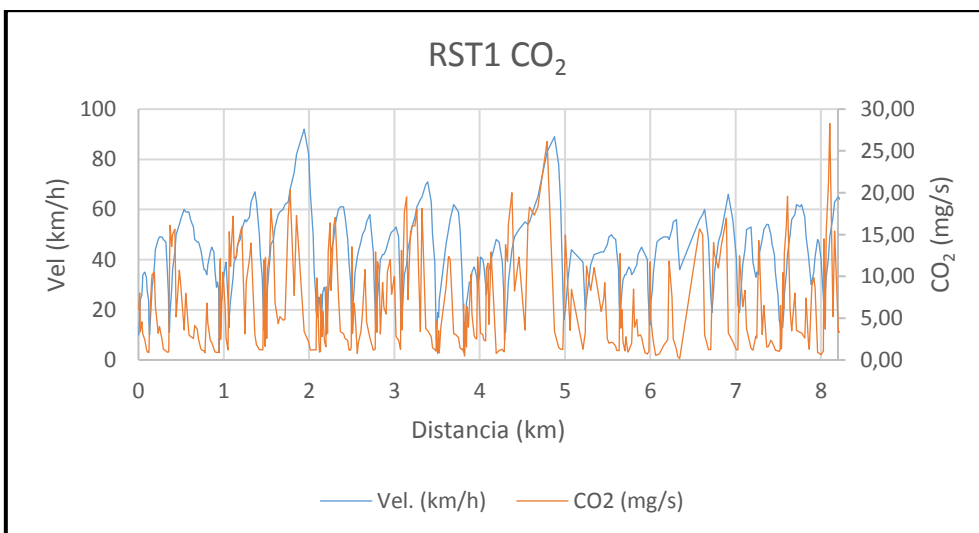
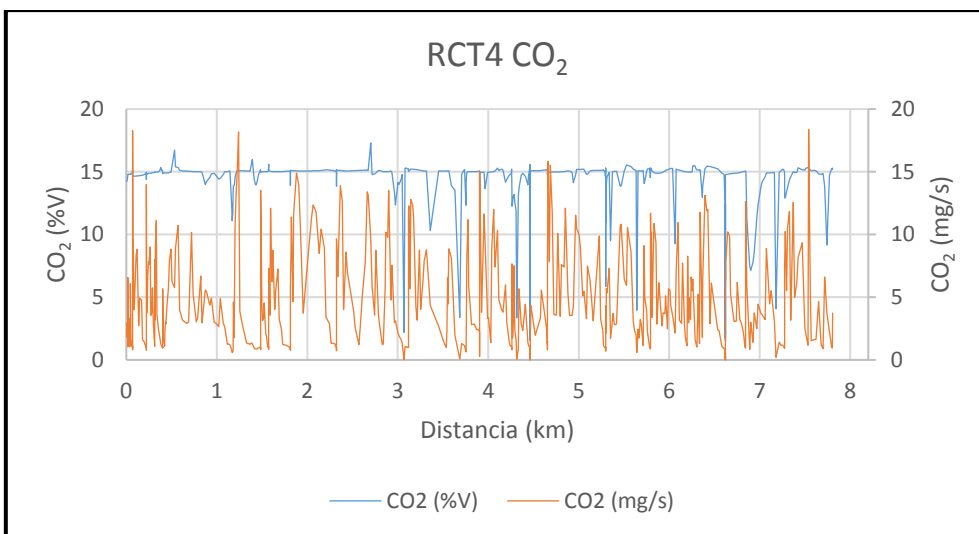
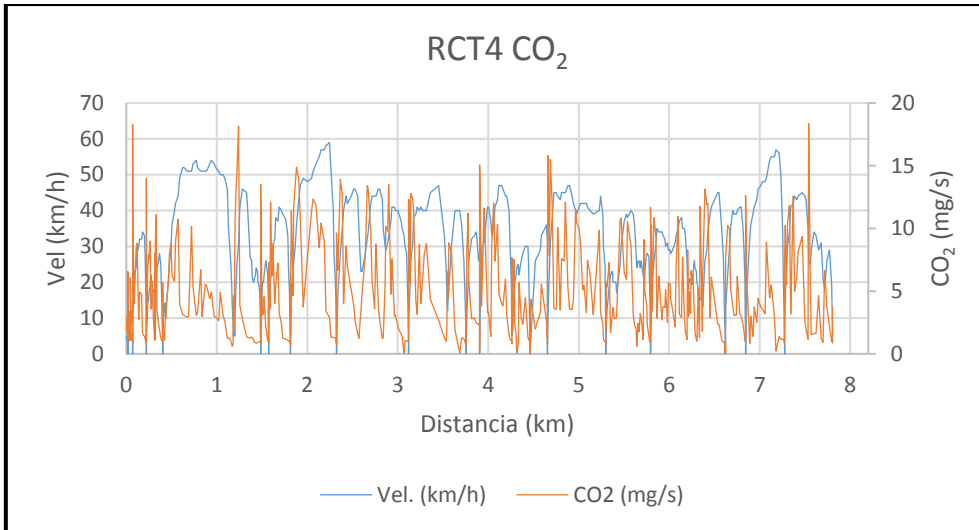
- 42) Payri, F. y Desantes, J.M. (2011). *Motores de combustión alterna alternativos*. España: Editorial Reverté.
- 43) Heywood, J. B. (1998). *Internal combustion engine fundamentals*. Unated States: McGraw-Hill.

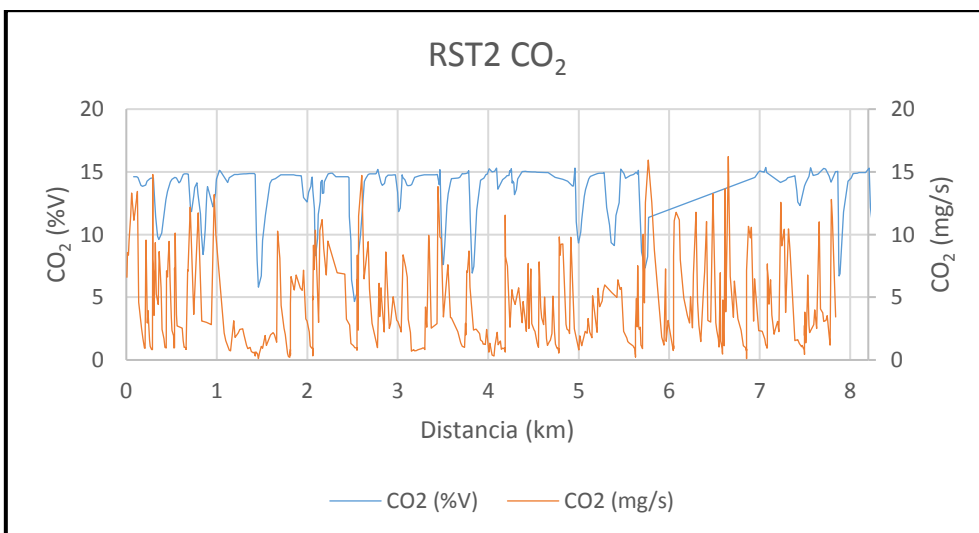
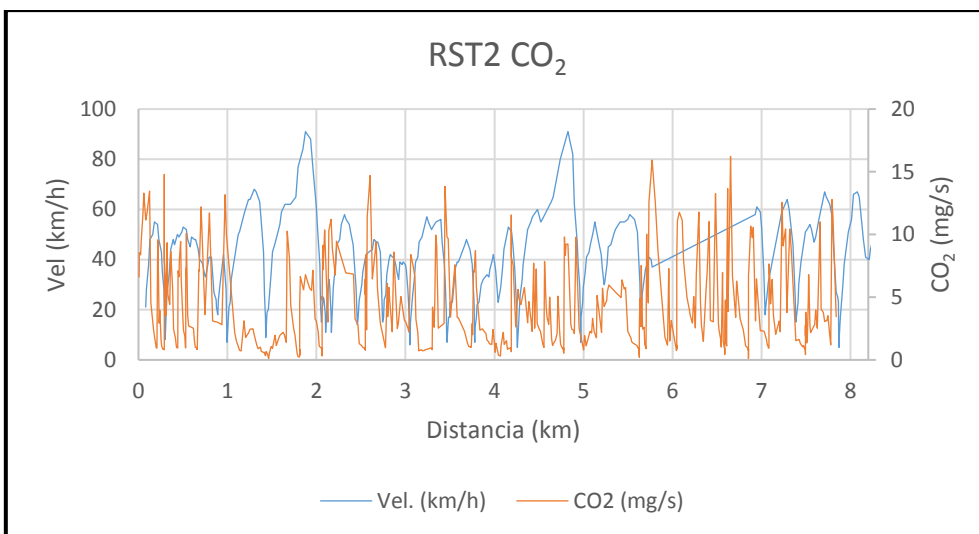
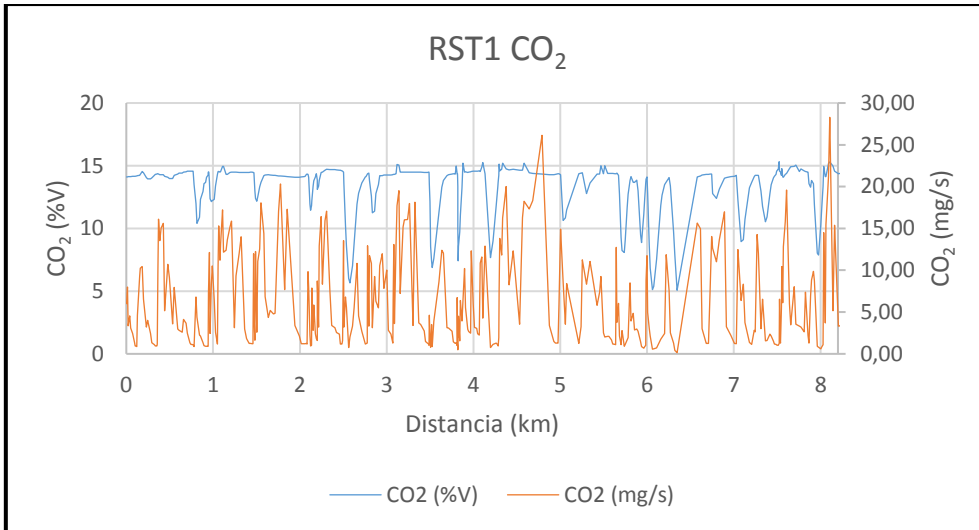
ANEXO A

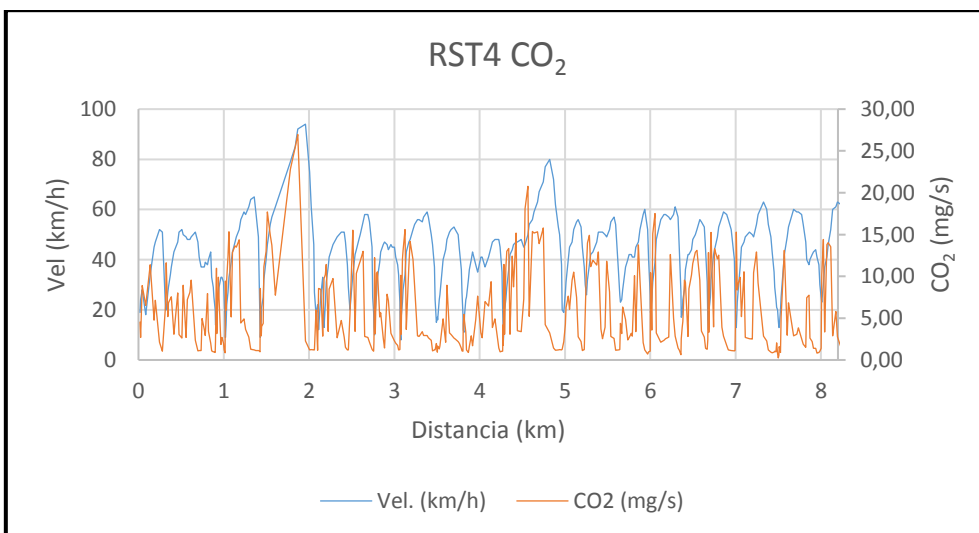
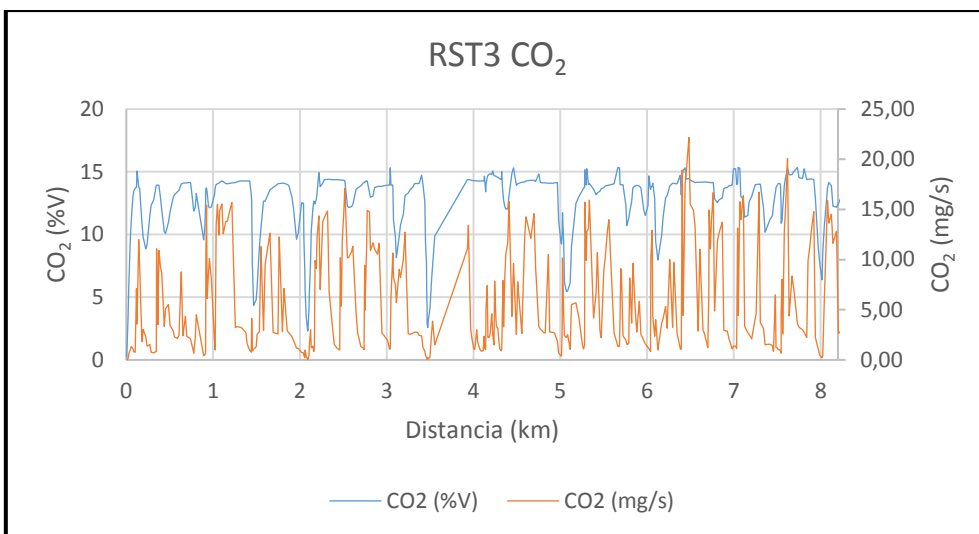
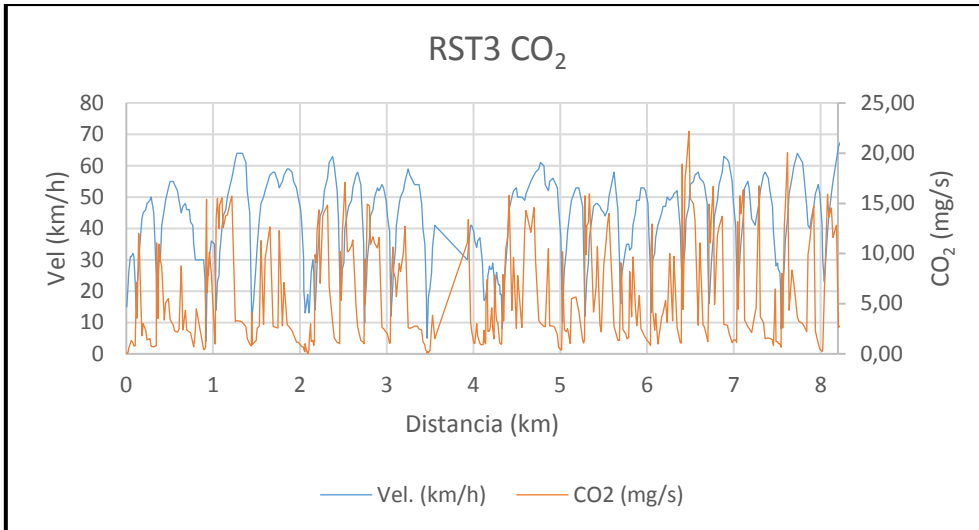
➤ Emisiones de CO₂

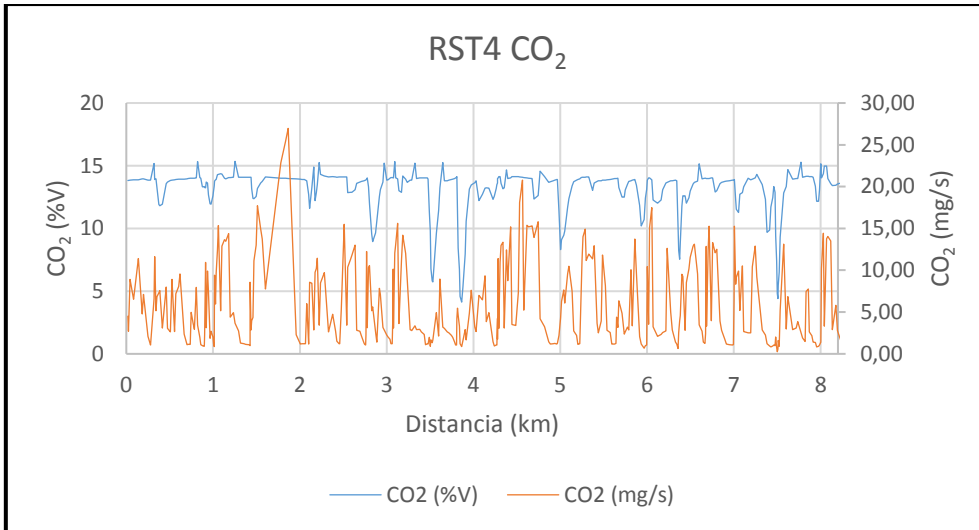




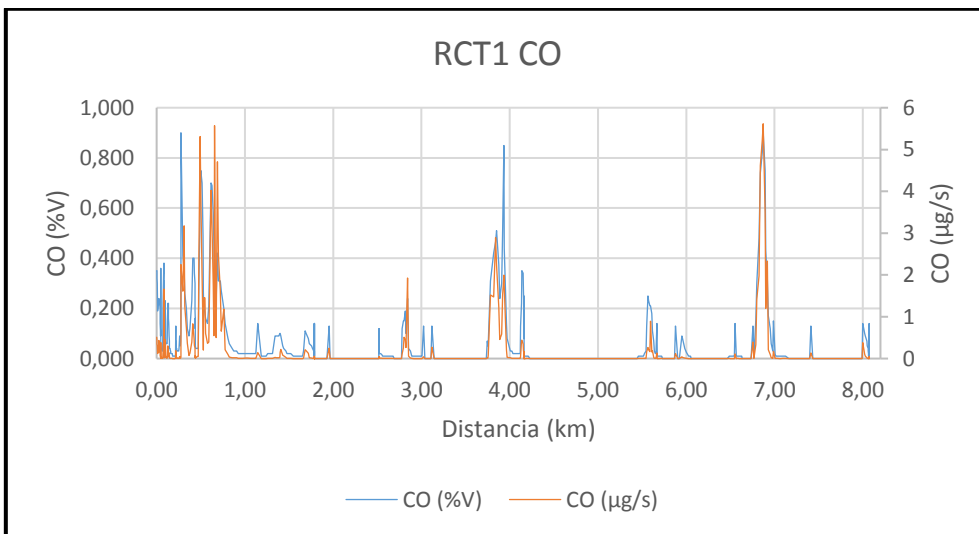
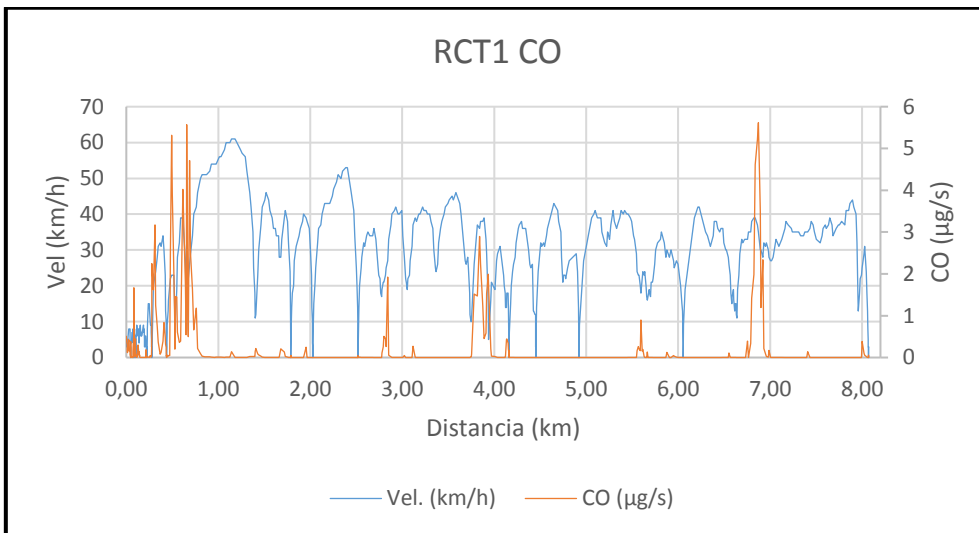


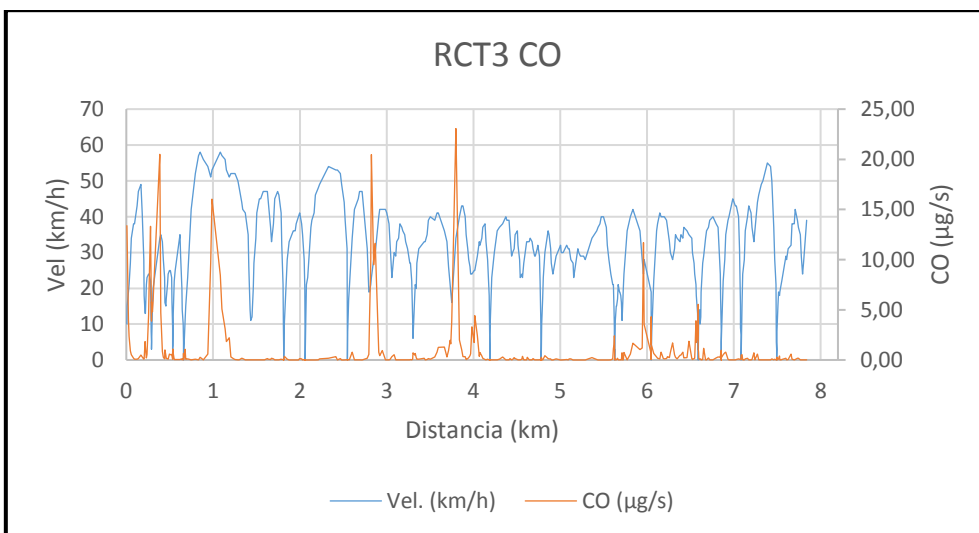
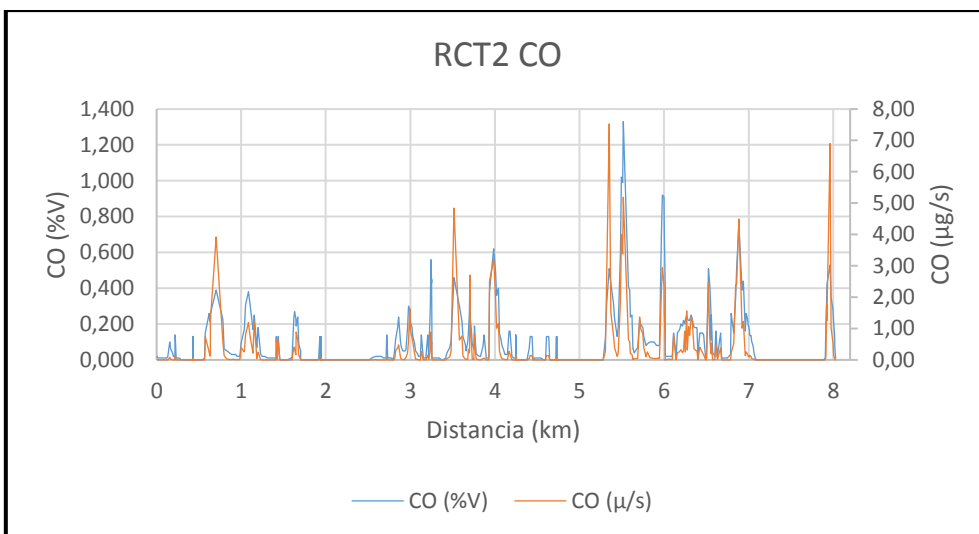
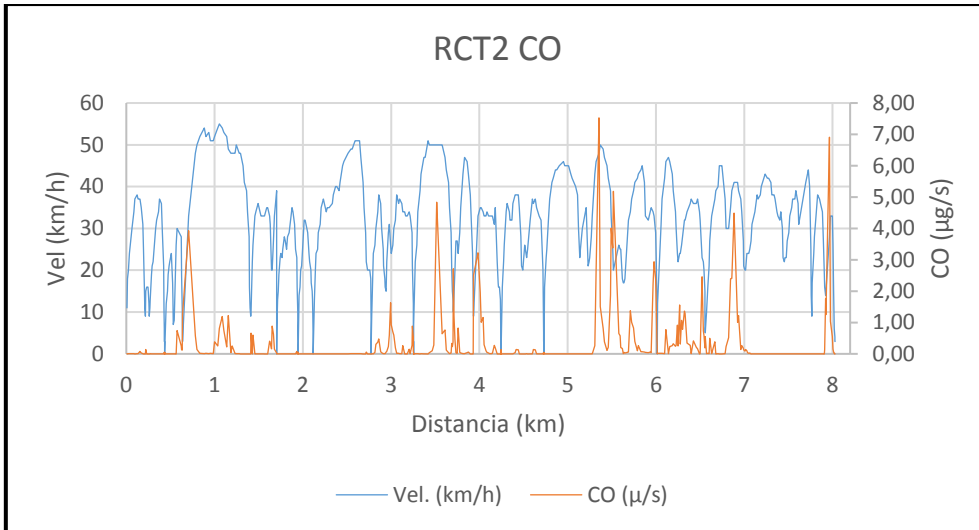


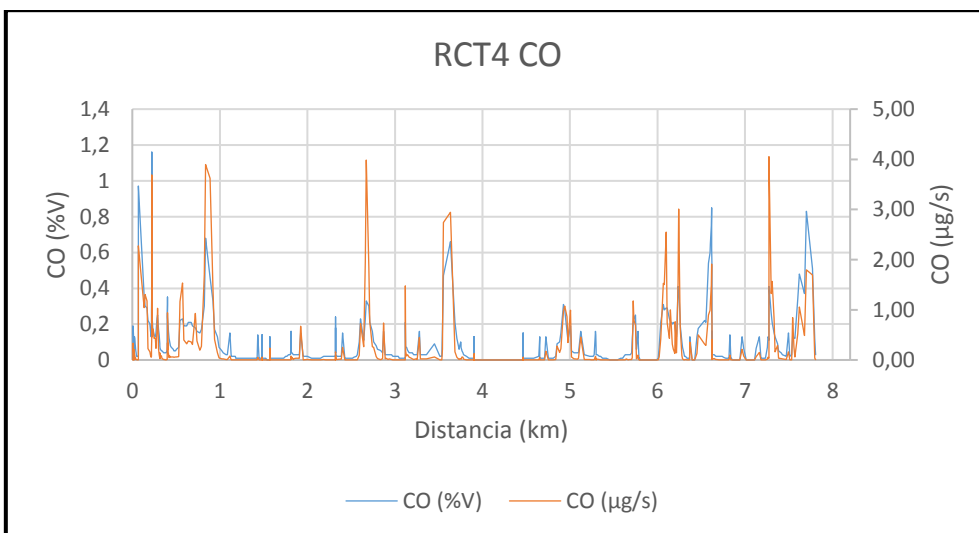
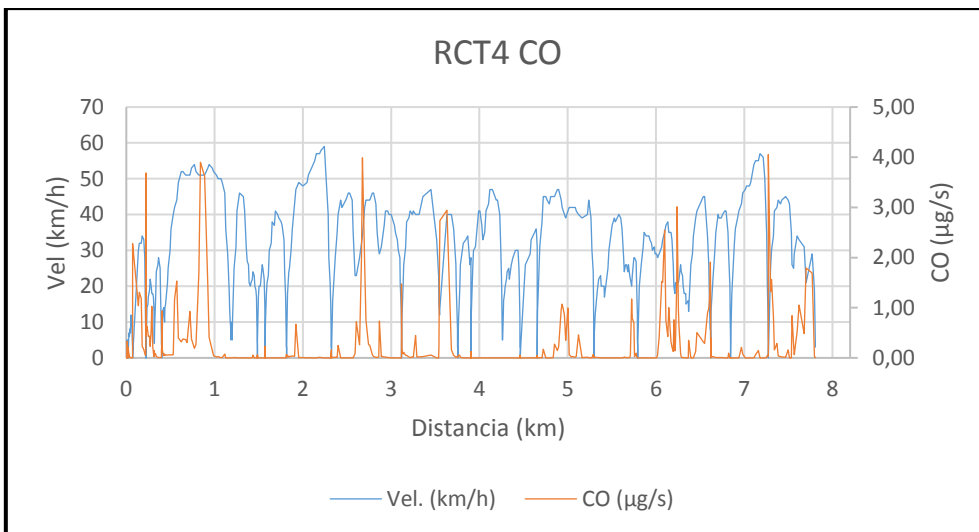
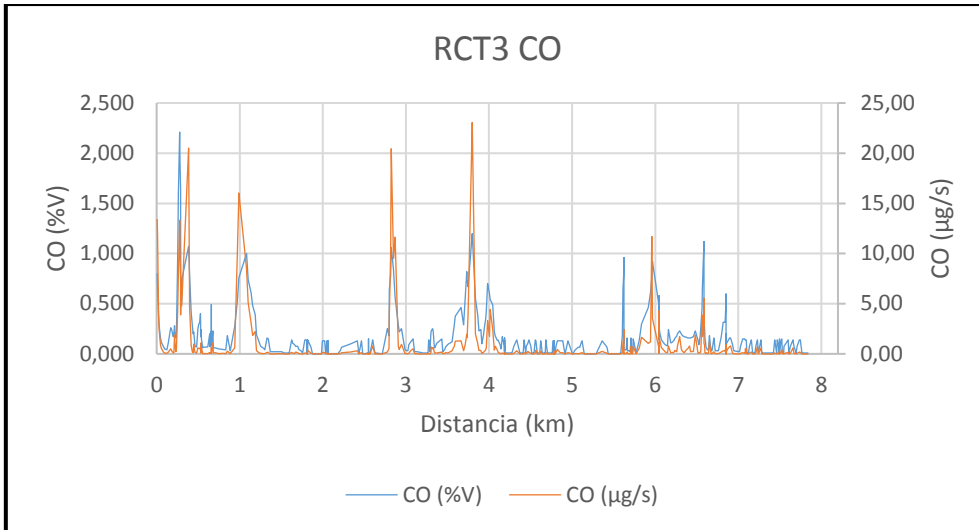


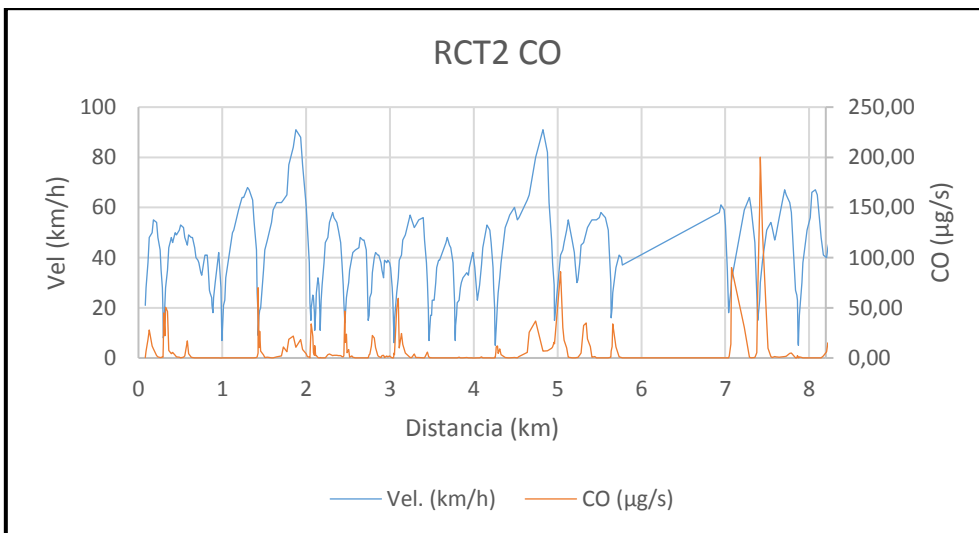
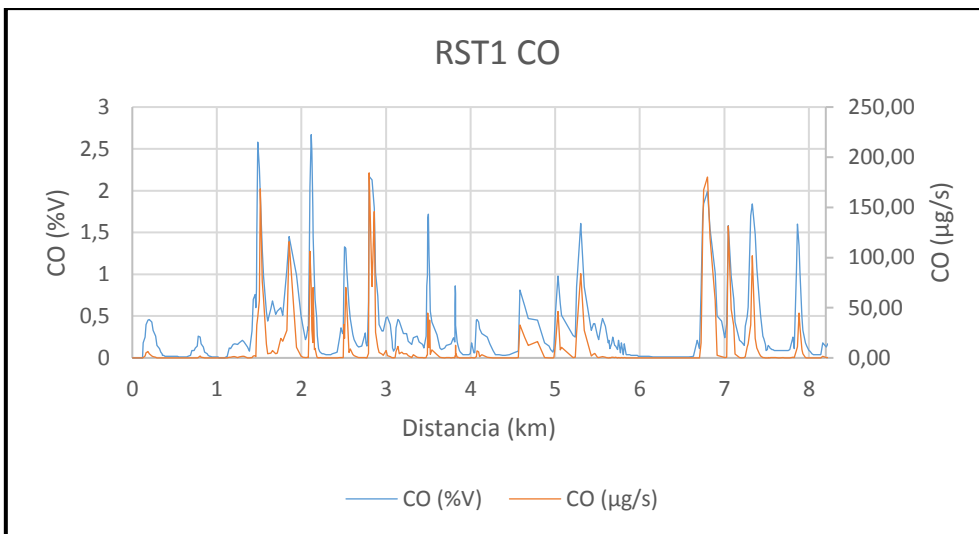
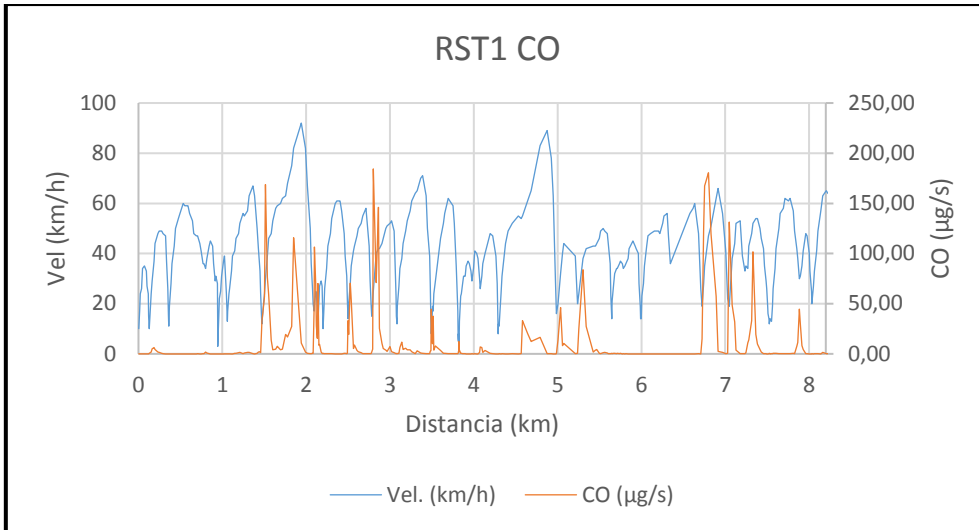


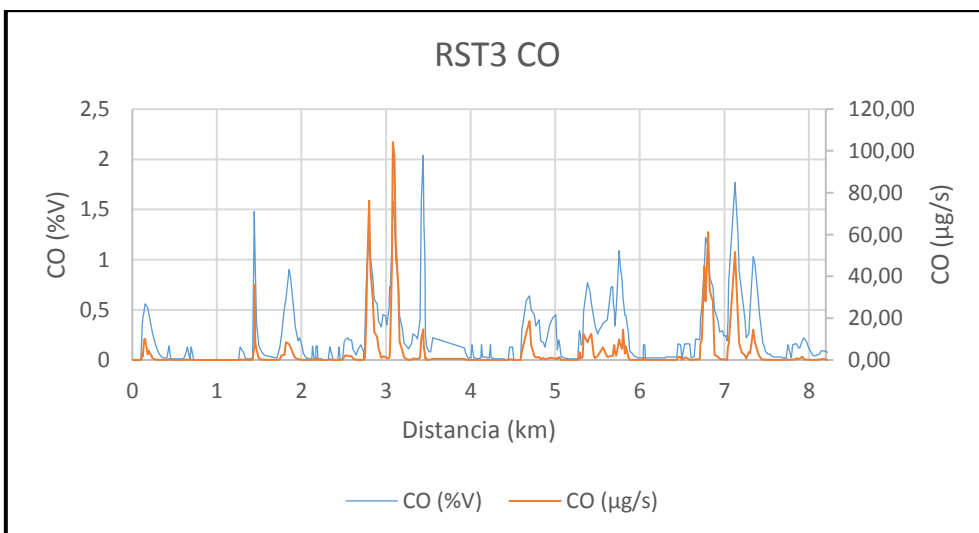
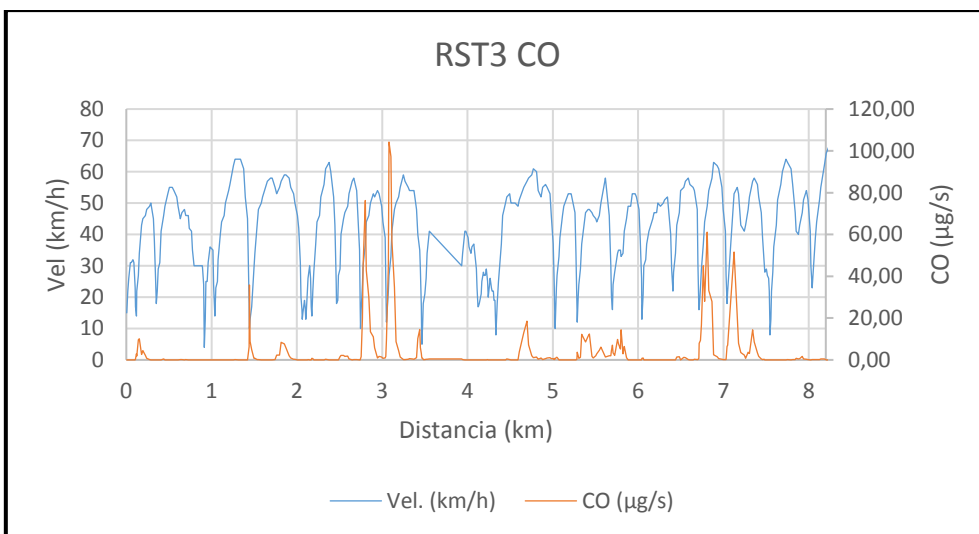
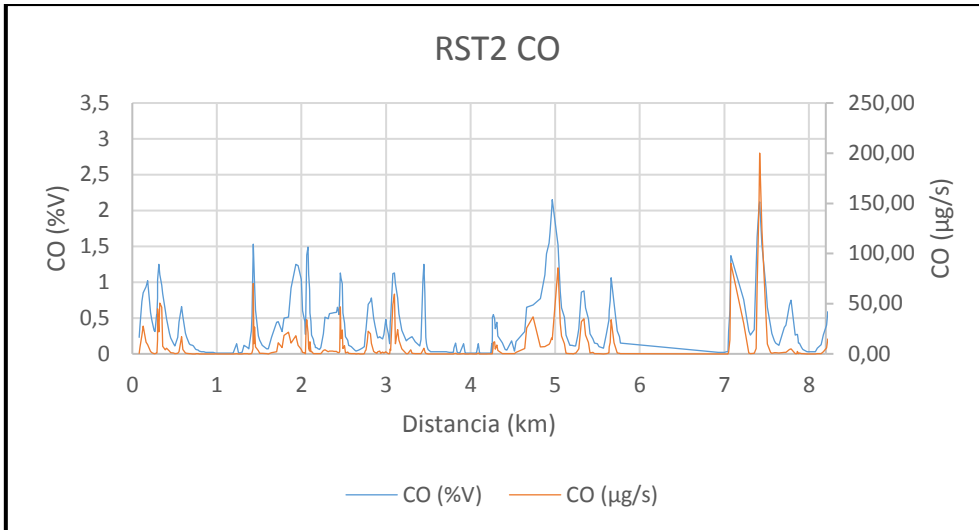
➤ **EMISIONES DE CO**

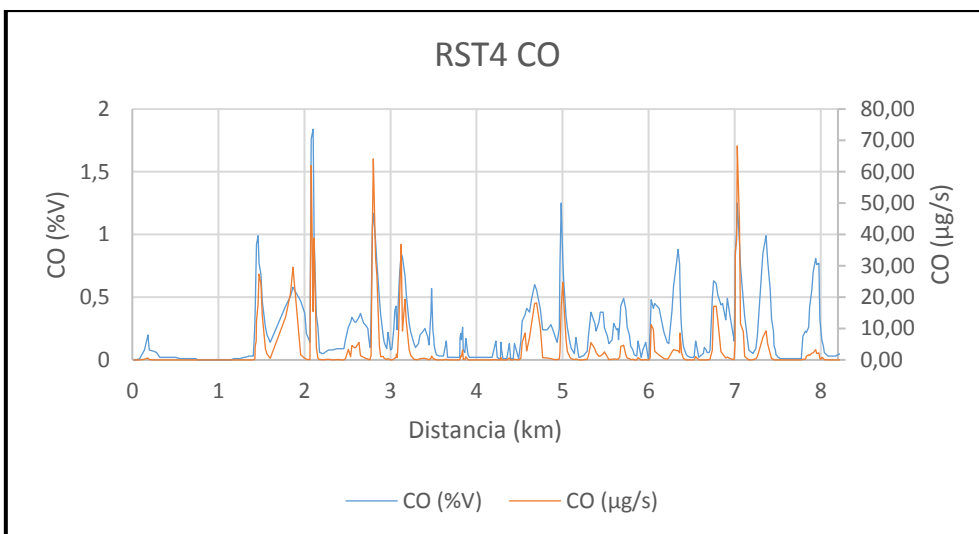
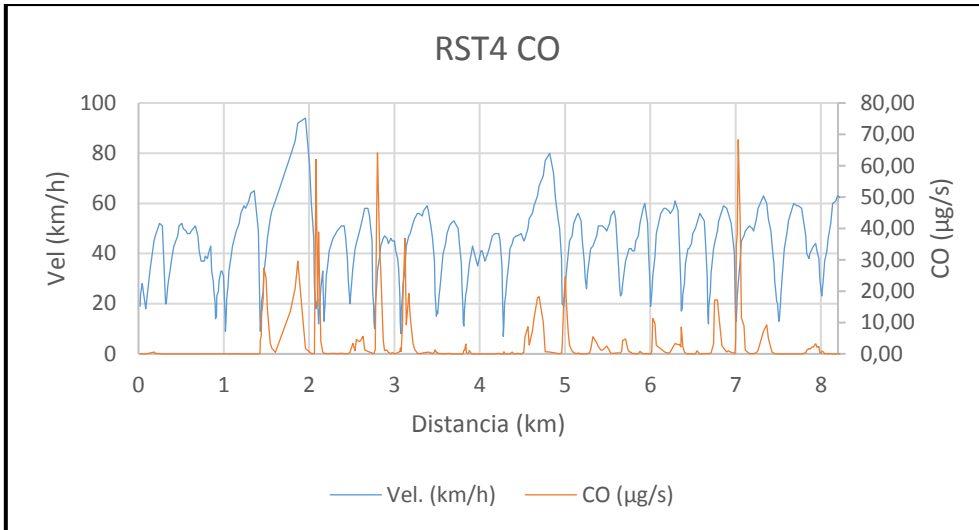




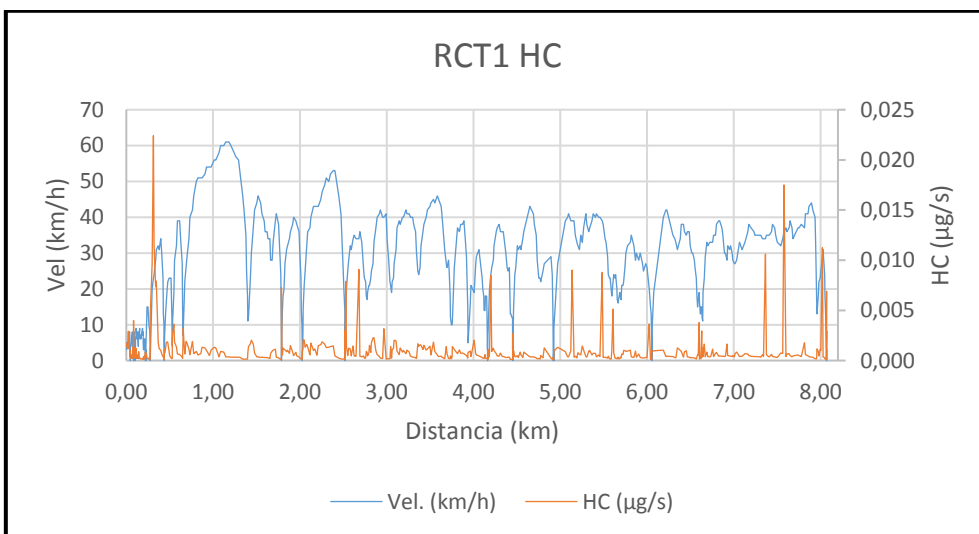


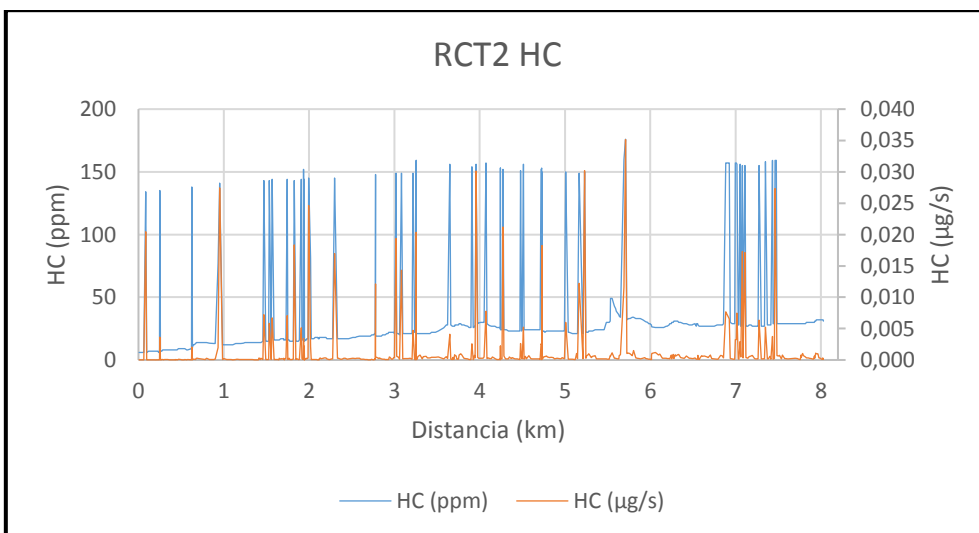
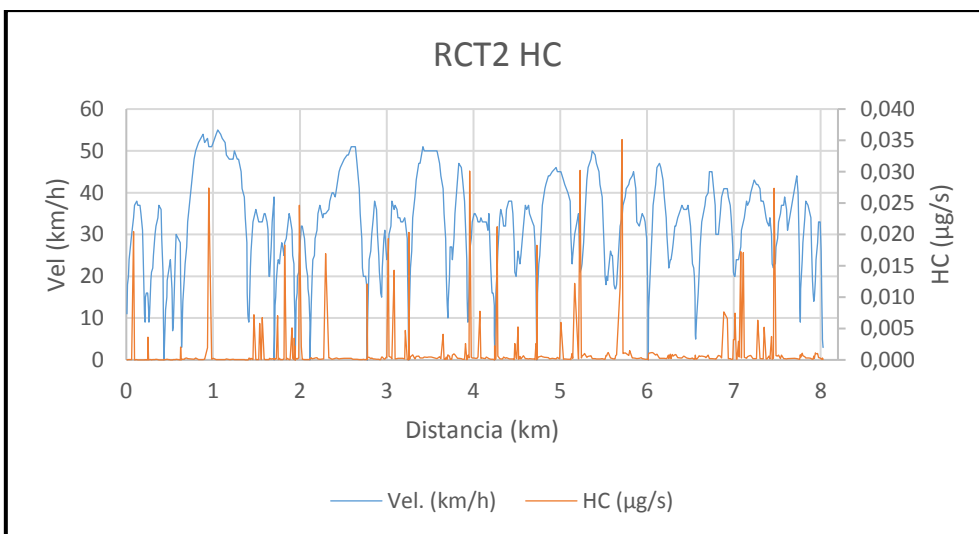
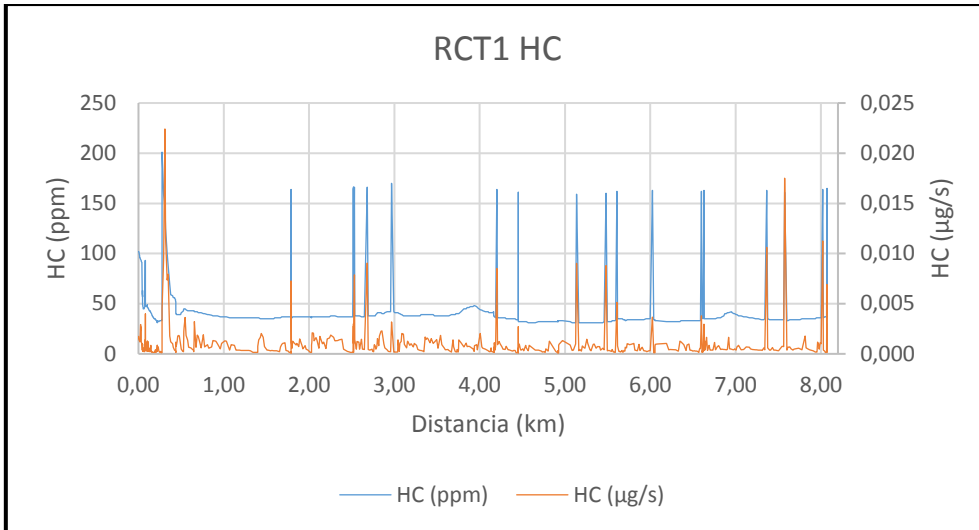


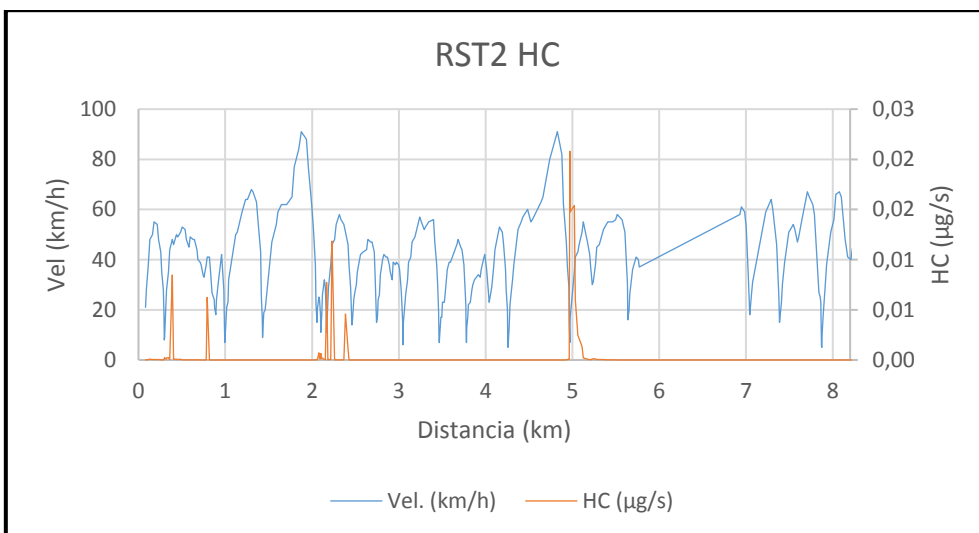
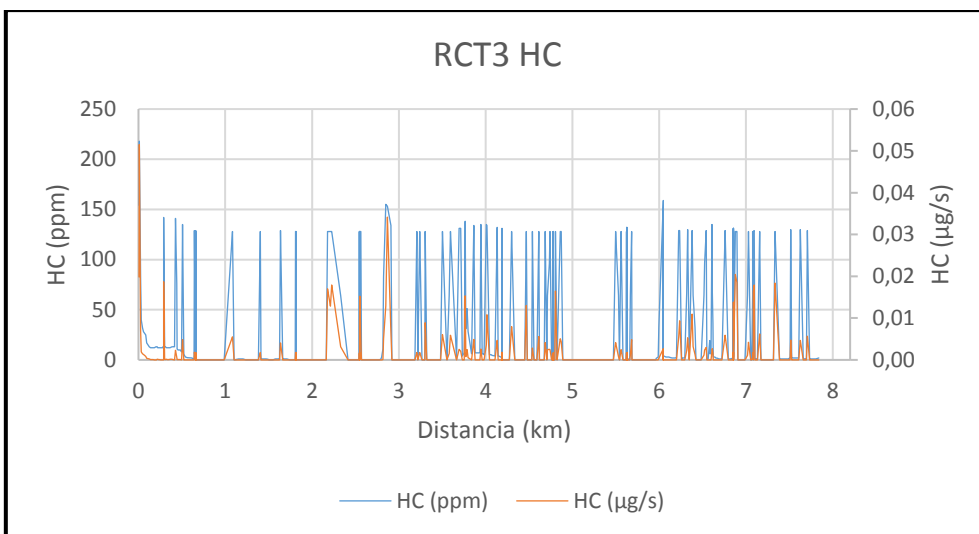
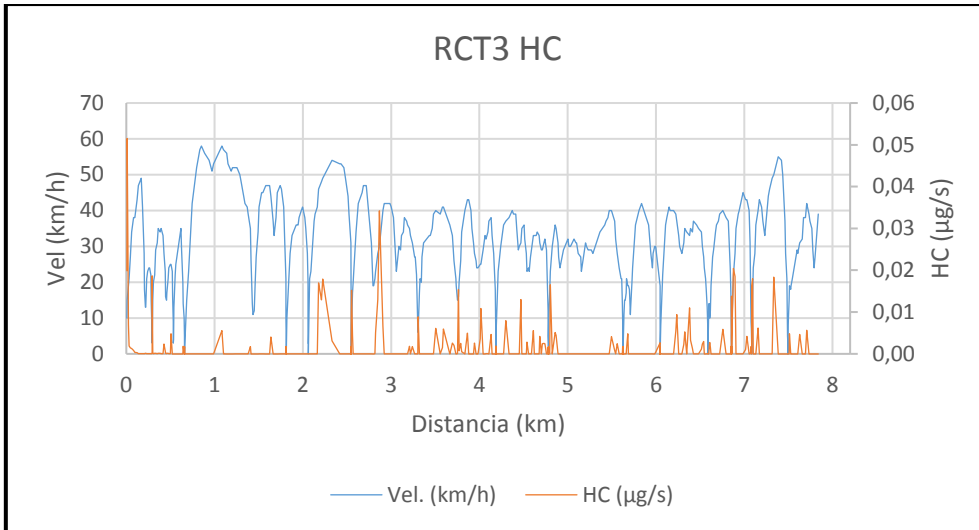


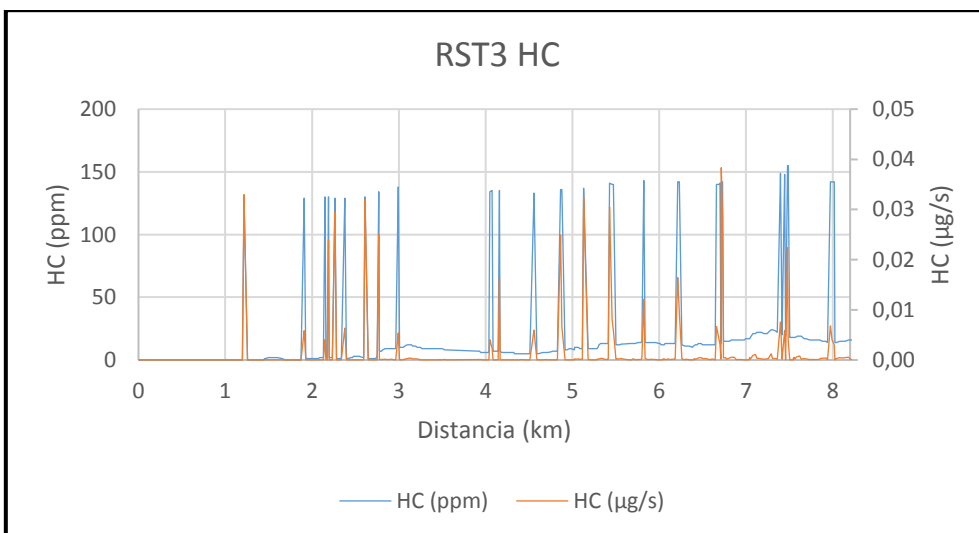
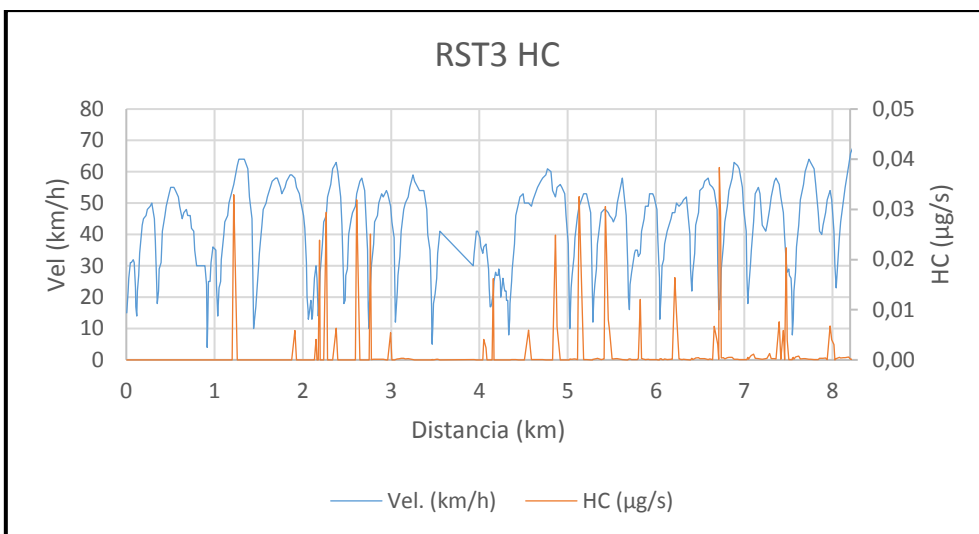
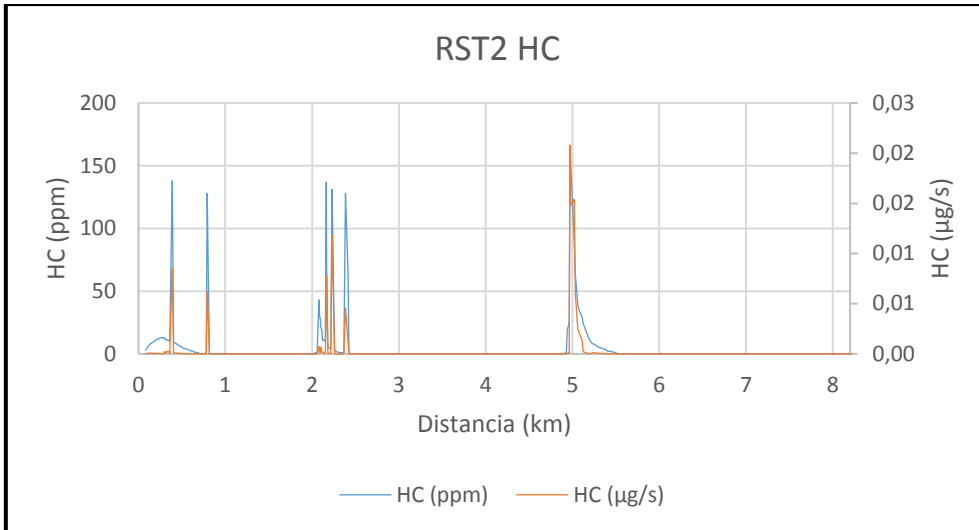


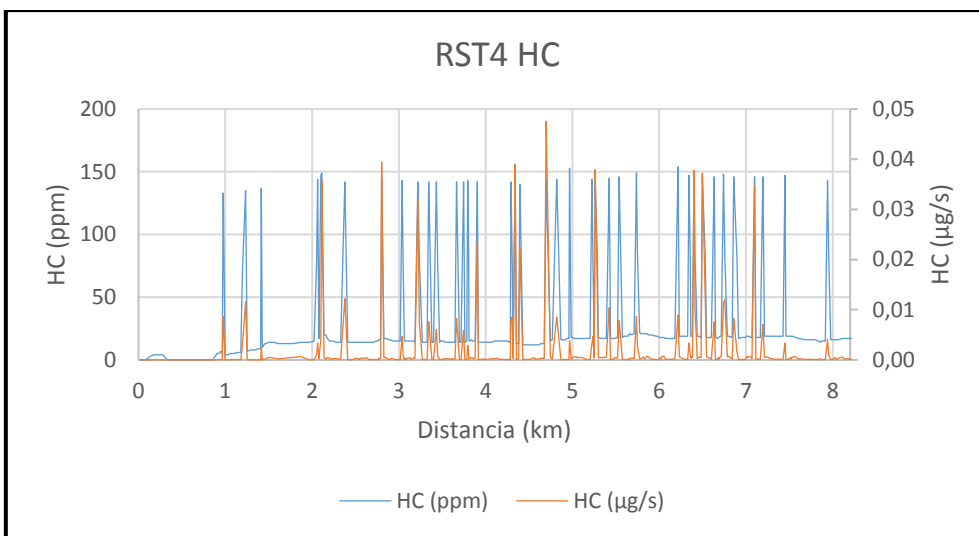
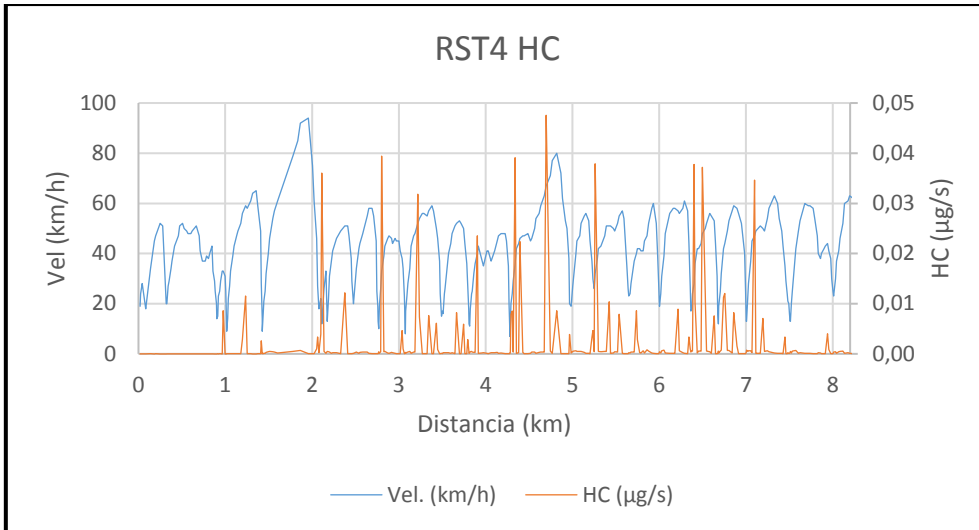
EMISIONES HC



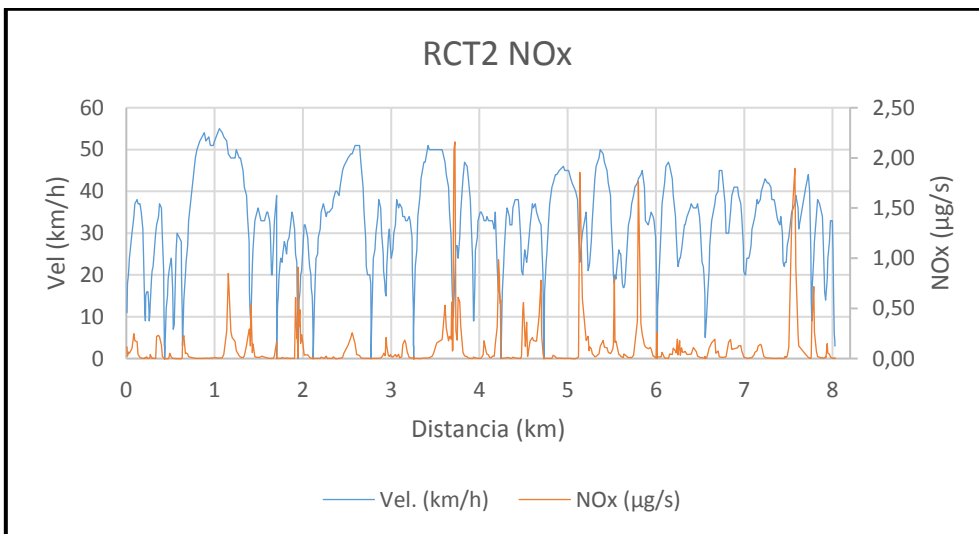


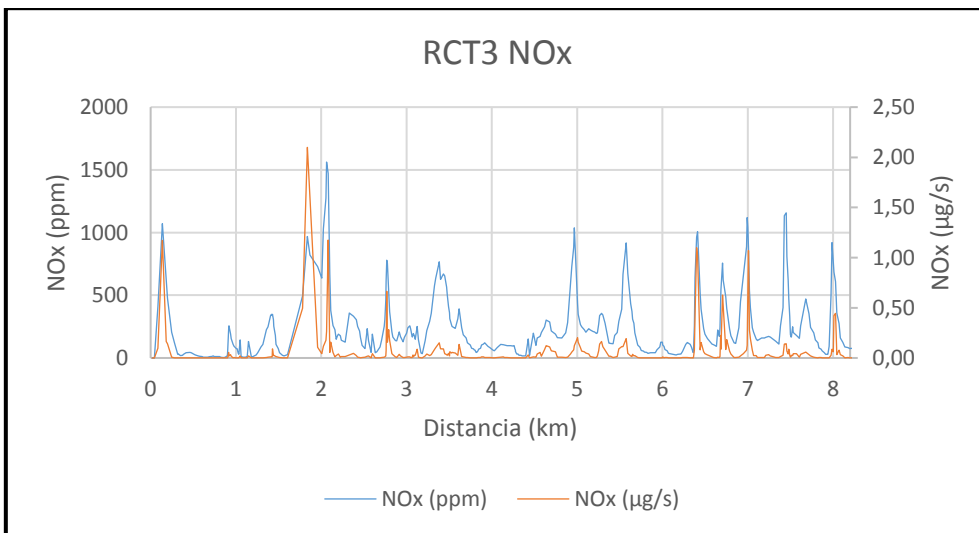
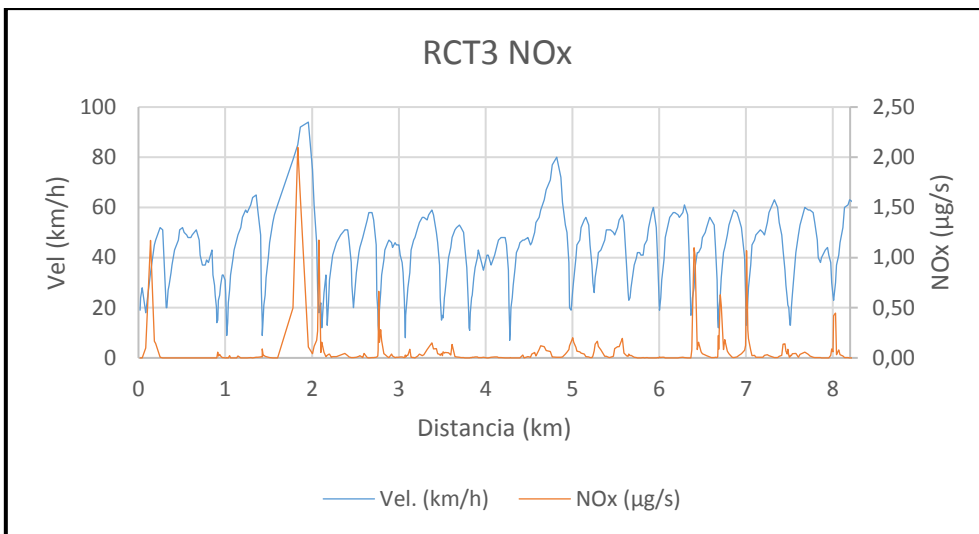
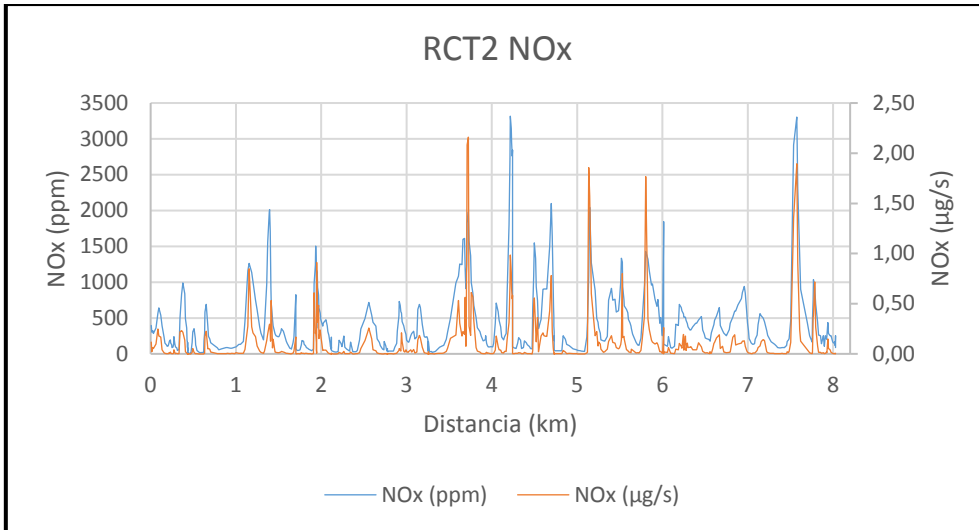


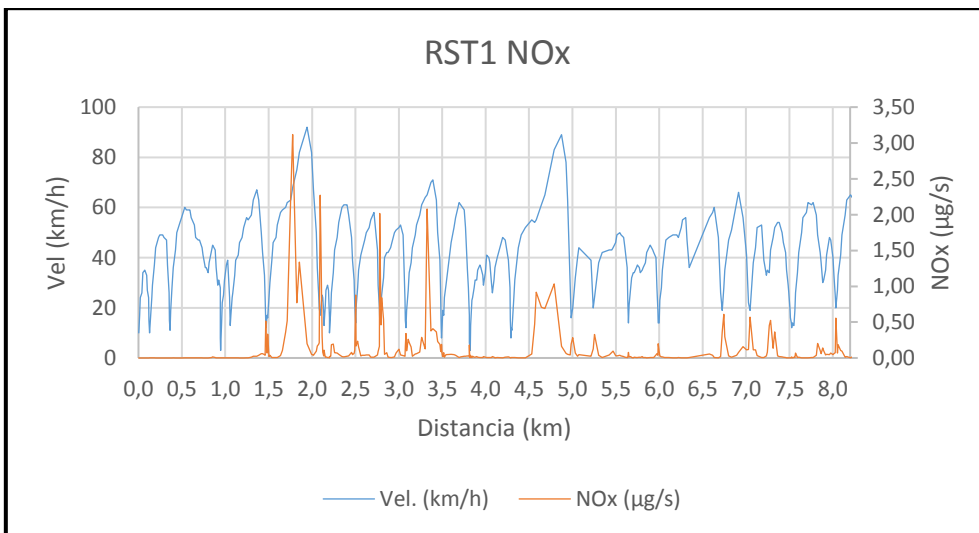
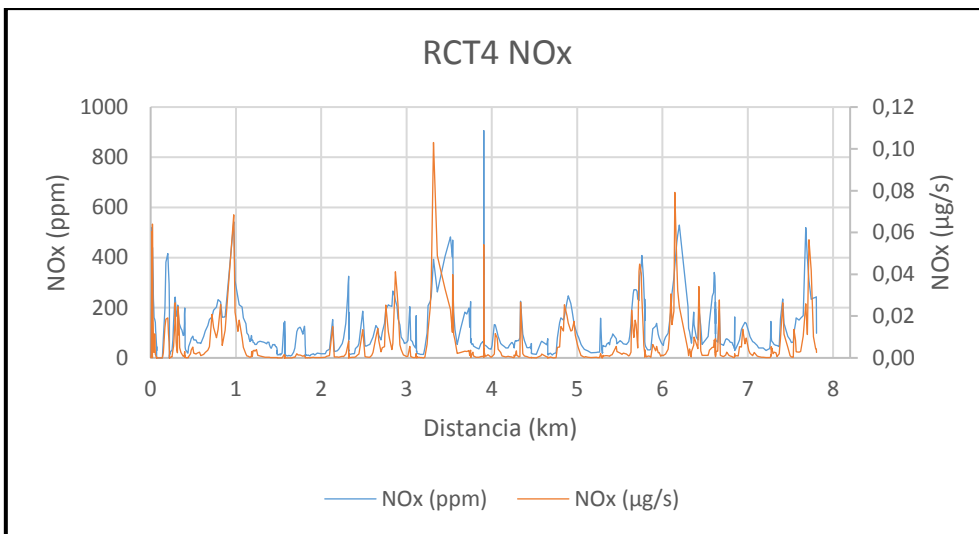
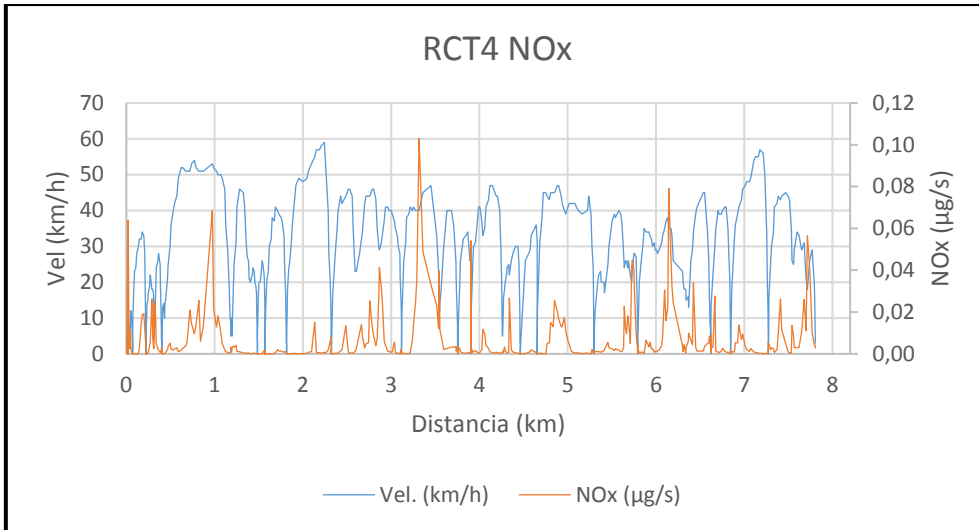


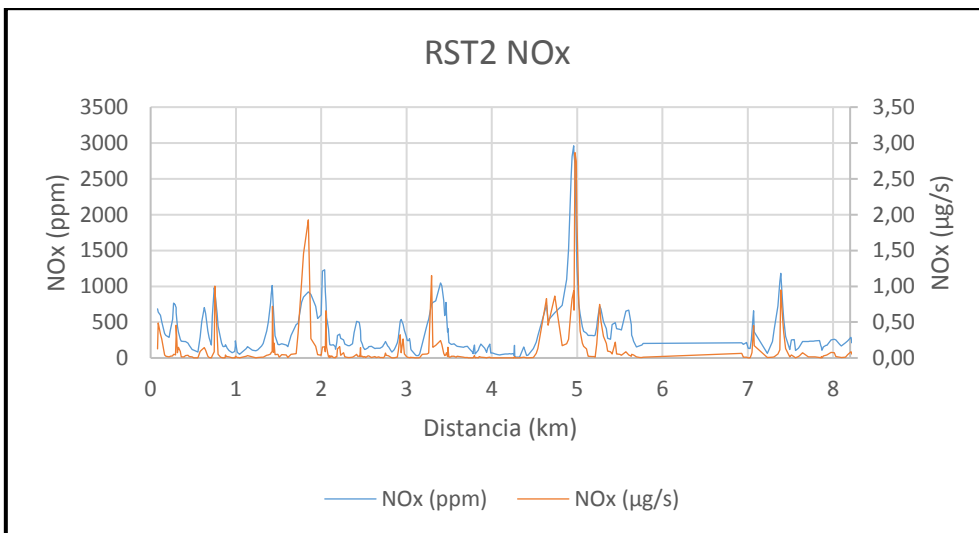
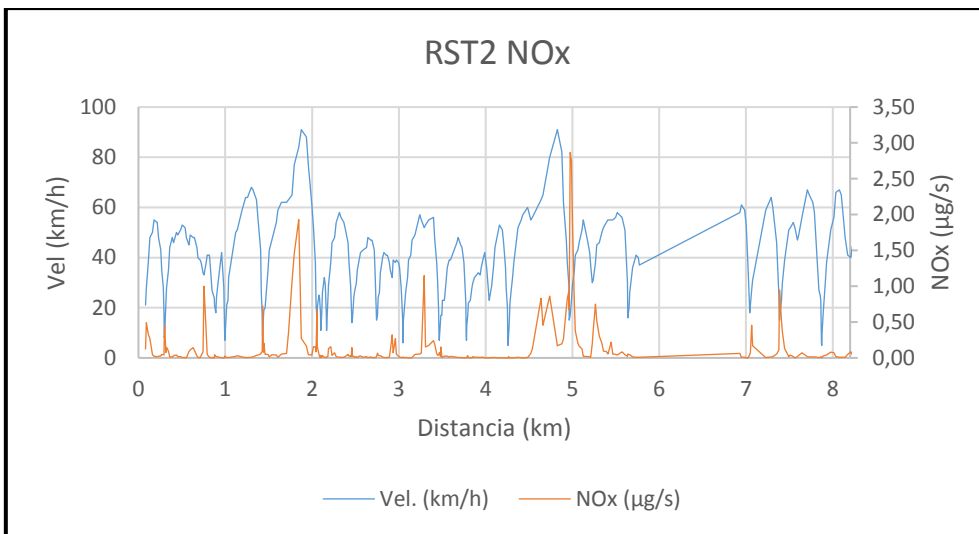
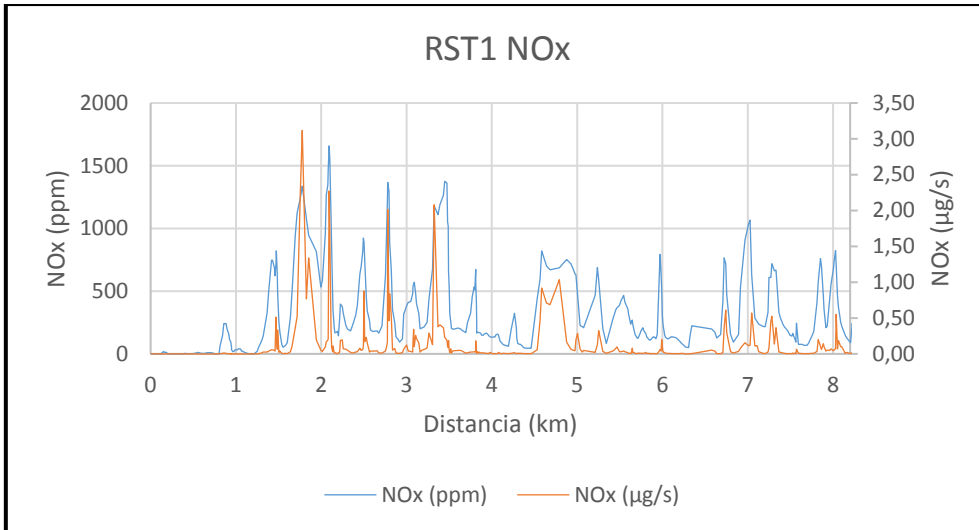


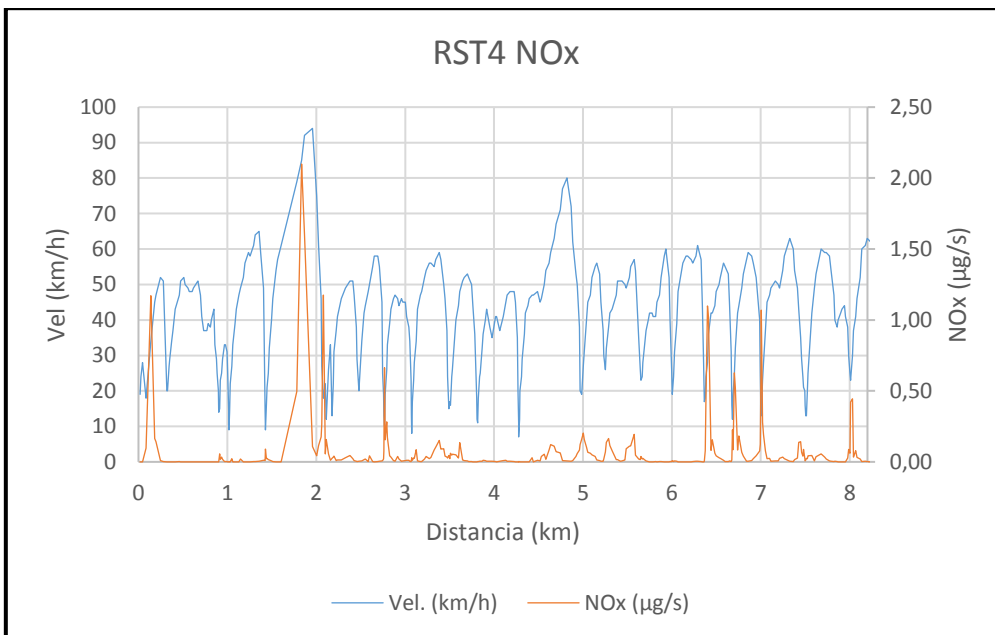
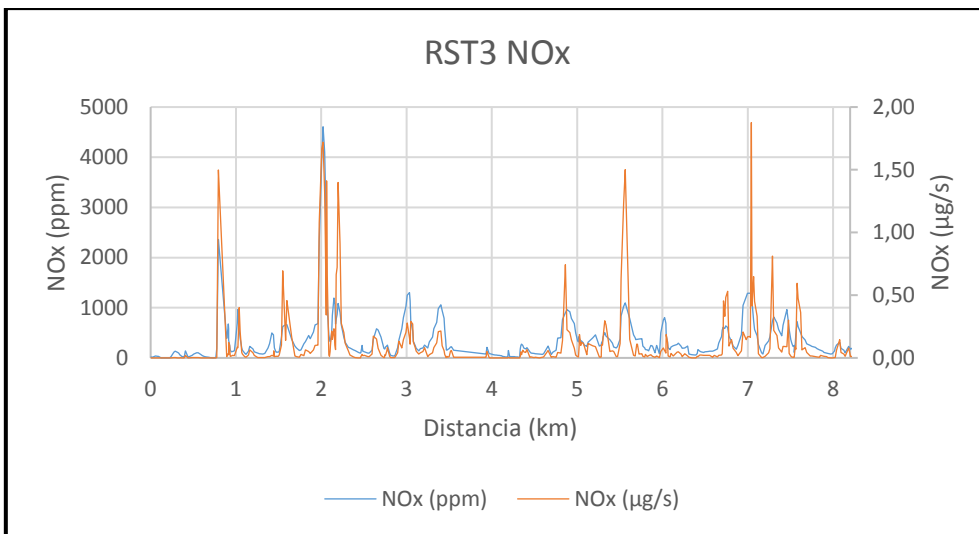
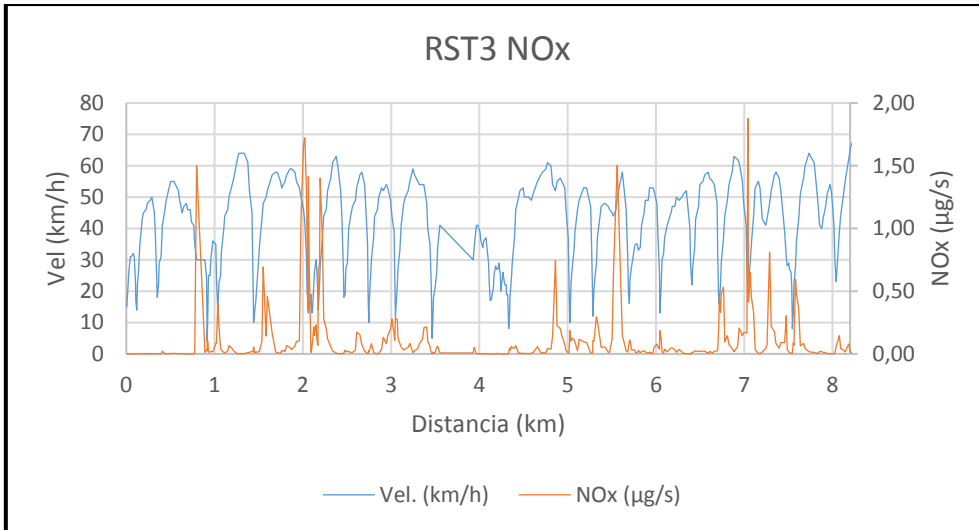
EMISIONES DE NO_x

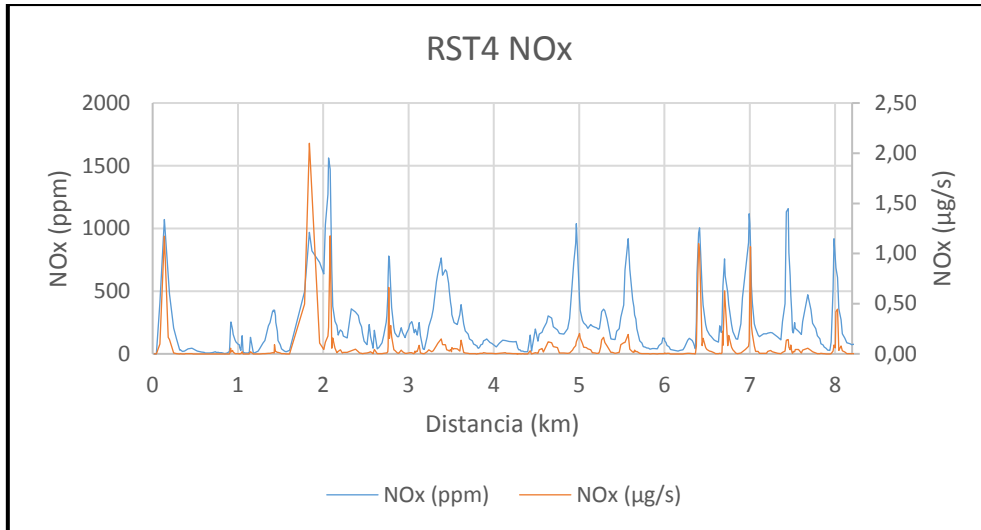






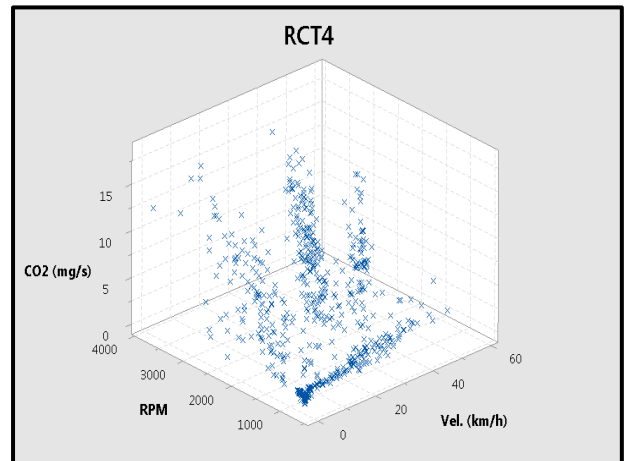
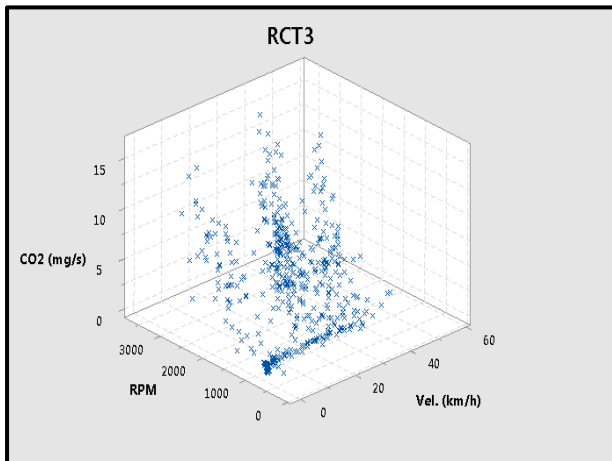
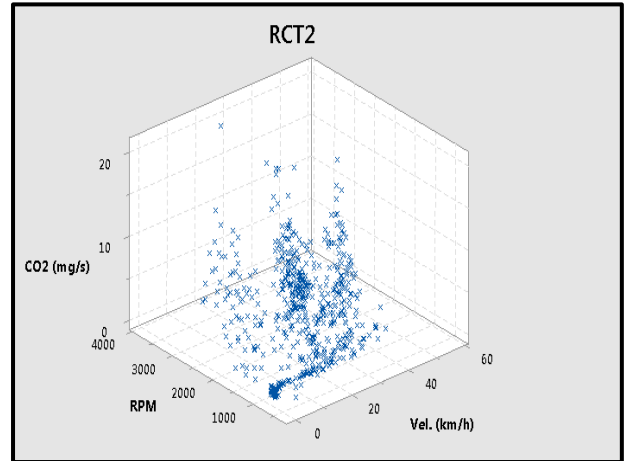
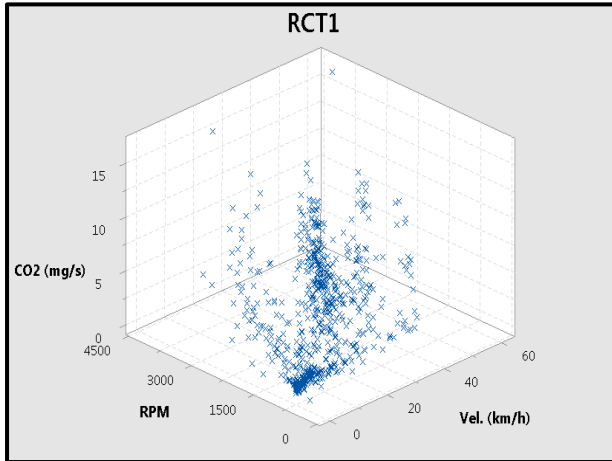


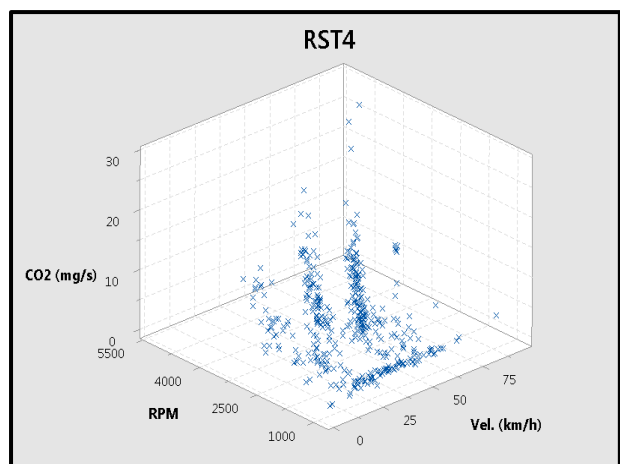
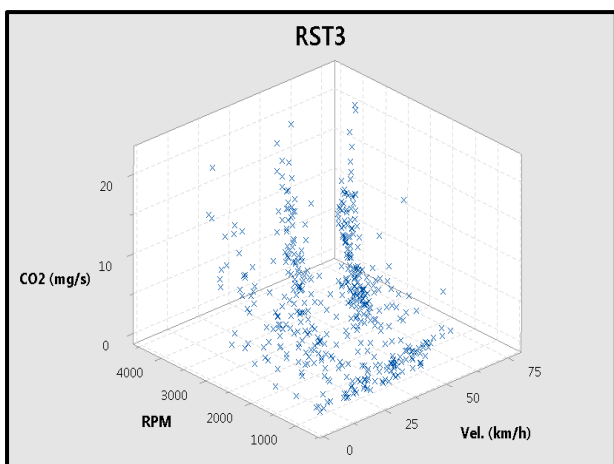
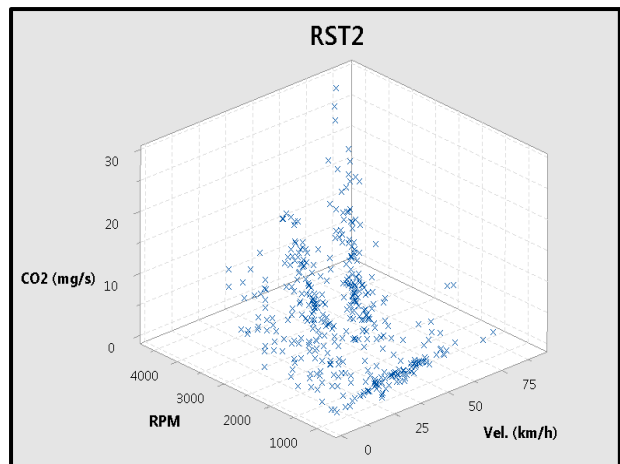
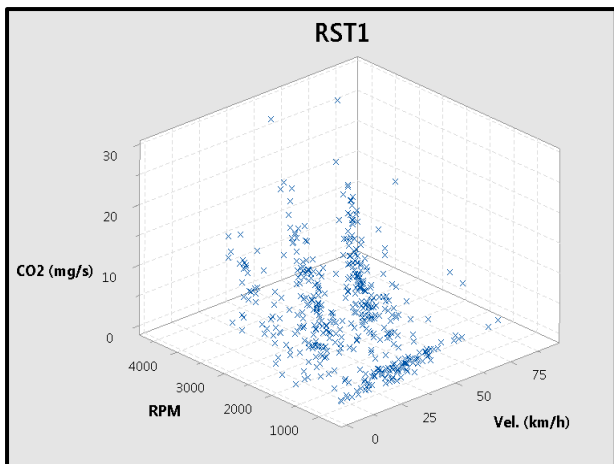




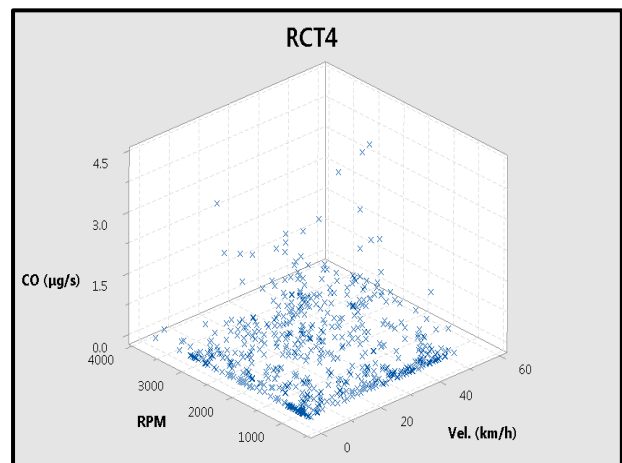
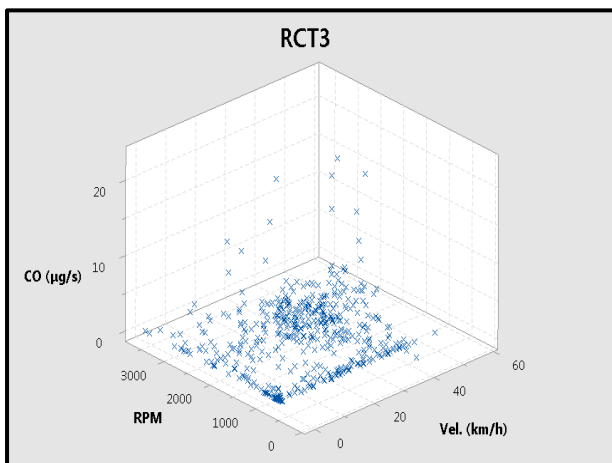
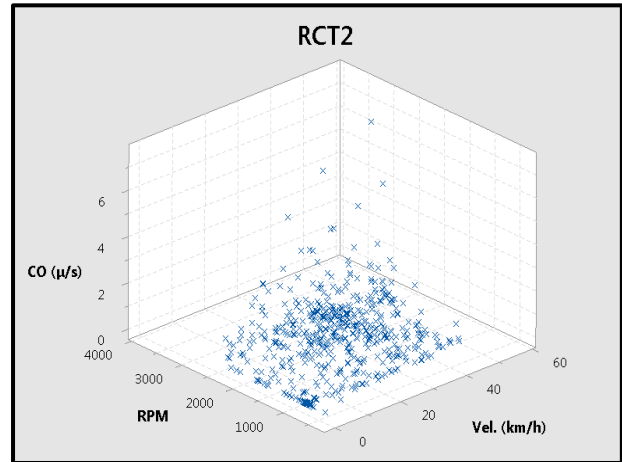
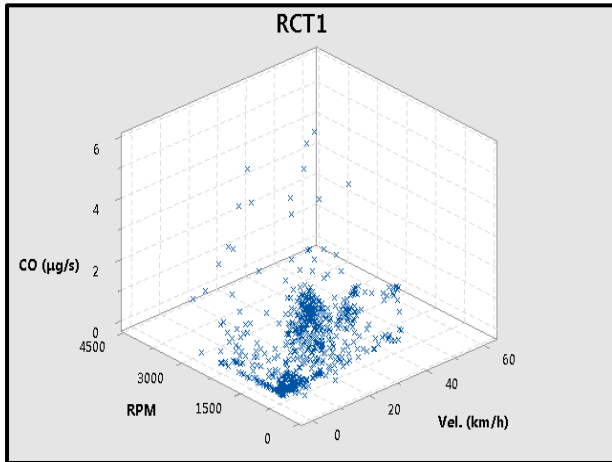
ANEXO B

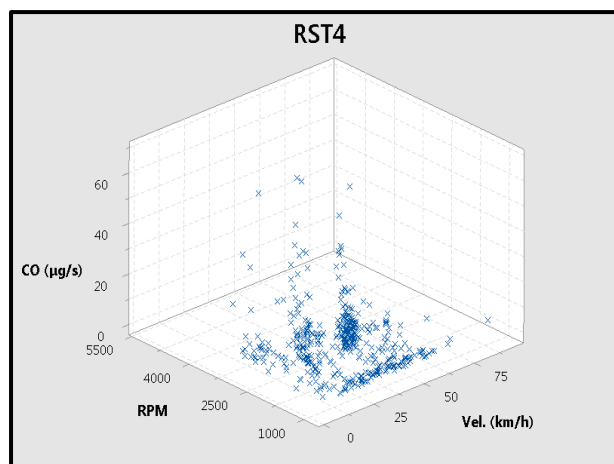
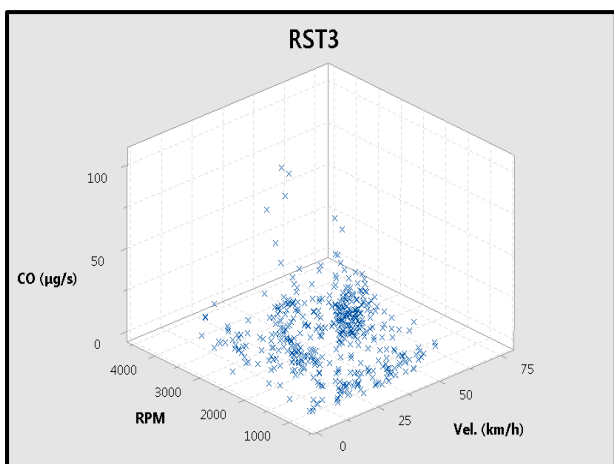
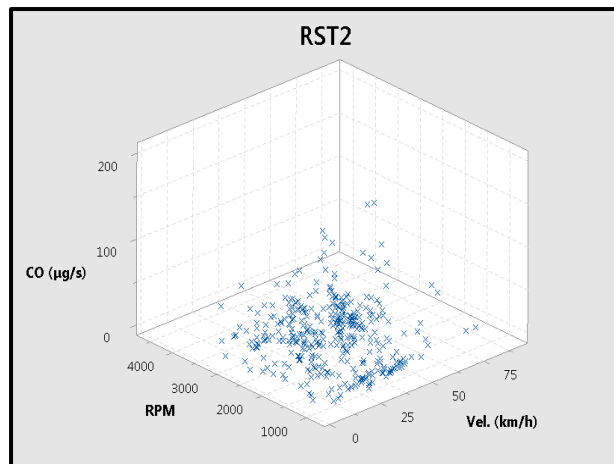
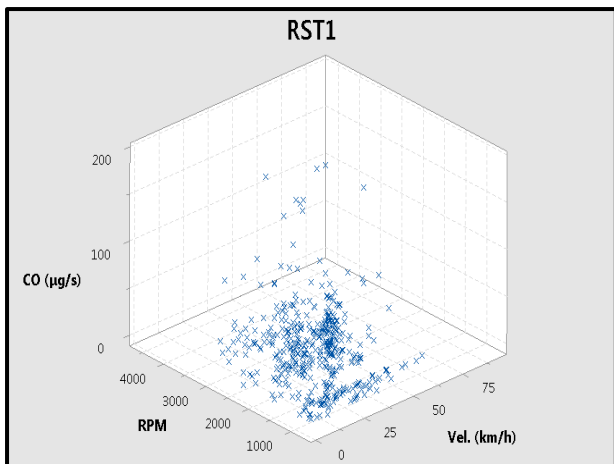
➤ Emisiones de CO₂



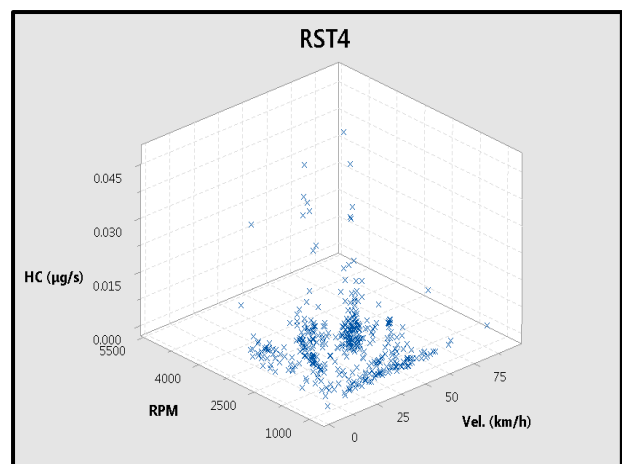
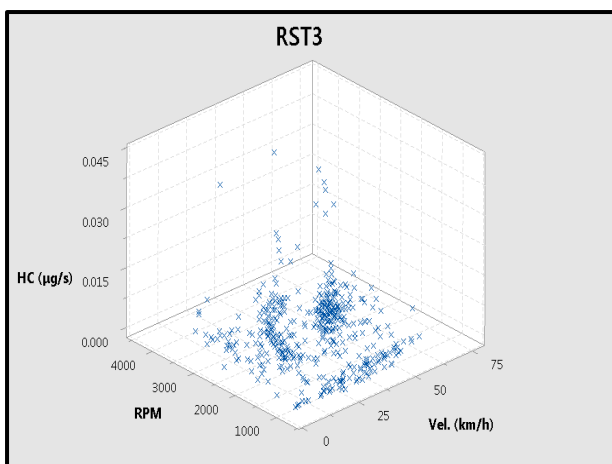
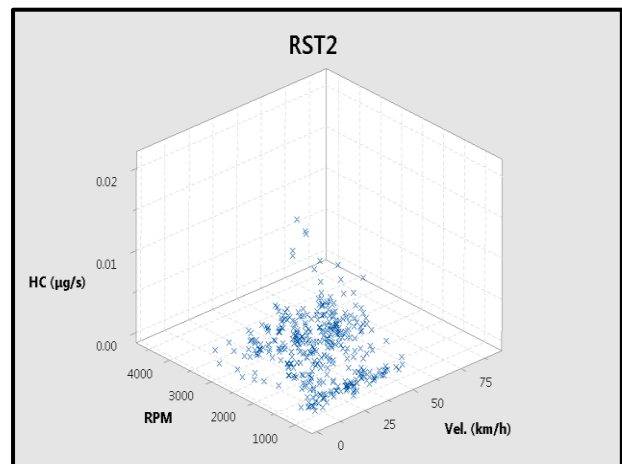
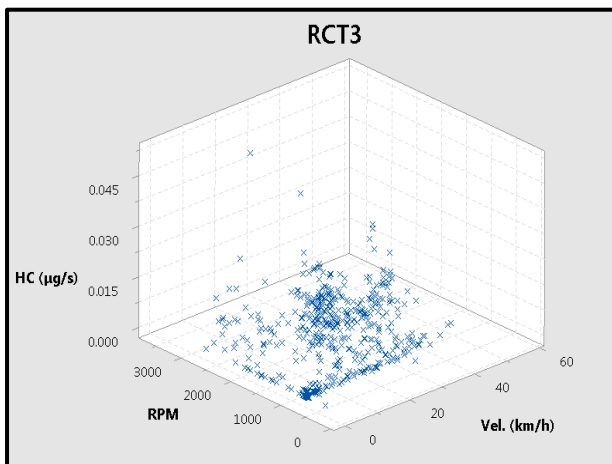
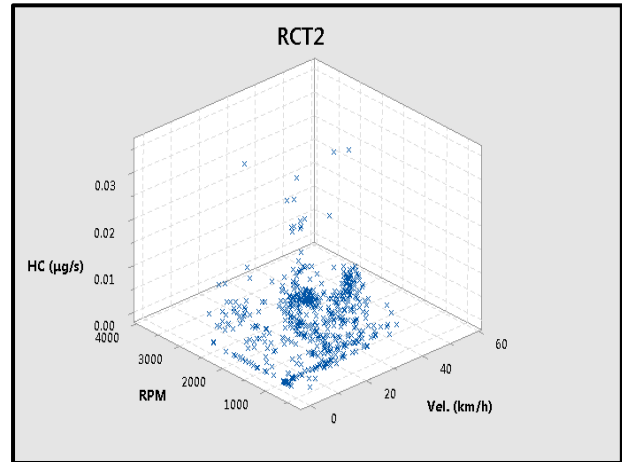
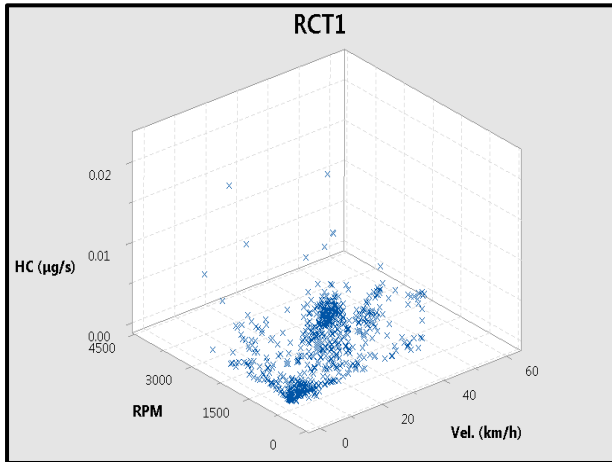


➤ **Emisiones de CO**





➤ **Emisiones de HC**



➤ **Emisiones de NO_x**

