

Ing. Miguel Reséndiz Trejo

Sistema inteligente de monitoreo y caracterización de gases generados por vehículos operados bajo diferentes modos de manejo

2024



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Sistema inteligente de monitoreo y caracterización de gases generados por vehículos operados bajo diferentes modos de manejo

Que como parte de los requisitos para obtener el grado Maestro en Ciencias Mecatrónica.

Presenta:

Ing. Miguel Reséndiz Trejo

Dirigido por:

Dr. Juan José Saucedo Dorantes

San Juan del Río, Qro. a 25 de noviembre

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Mecatrónica)



“Sistema inteligente de monitoreo y caracterización de gases generados por vehículos operados bajo diferentes modos de manejo”

Opción de titulación

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Mecatrónica

Presenta:

Ing. Miguel Resendiz Trejo

Dirigido por:

Dr. Juan José Saucedo Dorantes

Dr. Juan José Saucedo Dorantes
Presidente

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz
Secretario

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos
Vocal

Dr. René de Jesús Romero Troncoso
Suplente

Dr. Francisco Arellano Espitia
Suplente

Campus San Juan del Río, Querétaro
25 noviembre 2024, México

RESUMEN

Actualmente, los vehículos desempeñan un papel esencial en la vida diaria, siendo indispensables para satisfacer las necesidades de transporte de la sociedad moderna. Desde su invención, han sido fundamentales en el desarrollo humano, impulsando el crecimiento de ciudades y zonas rurales al facilitar la movilidad. A pesar de la disponibilidad de opciones más sostenibles, como vehículos híbridos y eléctricos, la mayoría de los automóviles en circulación aún funcionan con motores de combustión interna. Para mejorar su rendimiento, confort y eficiencia, estos vehículos han incorporado diversas tecnologías, entre ellas los modos de manejo, que ajustan la relación de respuesta en la conducción y ofrecen tres opciones principales: Eco, Normal y Sport. No obstante, aunque estas tecnologías buscan optimizar el consumo y rendimiento, los vehículos de combustión interna aún representan un reto ambiental significativo. Las emisiones generadas durante la combustión, liberadas al medio ambiente a través del sistema de escape, contienen contaminantes como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO₂) y partículas suspendidas (PM). Aunque los modos de manejo no están diseñados específicamente para reducir emisiones contaminantes, este trabajo de tesis analiza su influencia en los niveles de emisión, evaluando si existen diferencias significativas entre ellos y hasta qué punto pueden contribuir a mitigar el impacto ambiental. Para llevar a cabo este análisis, se ha desarrollado un sistema de medición de gases basado en un lenguaje de hardware, obteniendo una buena precisión y confiabilidad en la recolección de datos. Además, los datos obtenidos son procesados y analizados mediante técnicas de inteligencia artificial, lo cual permite una comprensión más profunda de los patrones de emisión en cada modo de manejo. Este enfoque busca no solo cuantificar el impacto de los modos de conducción, sino también explorar la viabilidad de estos sistemas en la reducción de emisiones.

Palabras clave: inteligencia artificial, mapas de autoorganización, indicadores estadísticos, emisiones contaminantes, modos de manejo.

SUMMARY

Currently, vehicles play an essential role in daily life, being indispensable for meeting the transportation needs of modern society. Since their invention, they have been fundamental in human development, driving the growth of cities and rural areas by facilitating mobility. Despite the availability of more sustainable options, such as hybrid and electric vehicles, the majority of cars on the road still operate with internal combustion engines. To improve their performance, comfort, and efficiency, these vehicles have incorporated various technologies, including driving modes that adjust the response ratio during driving and offer three main options: Eco, Normal, and Sport. However, although these technologies aim to optimize consumption and performance, internal combustion vehicles still represent a significant environmental challenge. The emissions generated during combustion, released into the environment through the exhaust system, contain pollutants such as carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), hydrocarbons (HC), nitrogen oxides (NO_x), sulfur dioxide (SO₂), and particulate matter (PM). While the driving modes are not specifically designed to reduce pollutant emissions, this thesis work analyzes their influence on emission levels, assessing whether there are significant differences between them and to what extent they can contribute to mitigating environmental impact. To carry out this analysis, a gas measurement system based on hardware language has been developed, achieving good accuracy and reliability in data collection. Furthermore, the obtained data are processed and analyzed using artificial intelligence techniques, allowing for a deeper understanding of emission patterns in each driving mode. This approach aims not only to quantify the impact of driving modes but also to explore the viability of these systems in reducing emissions.

Keywords: artificial intelligence, self-organization maps, statistical indicators, polluting emissions, management modes.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos por su incondicional apoyo, amor y ejemplo, quienes siempre han creído en mí y me han impulsado a alcanzar mis sueños. A mi asesor de tesis el Juan José Saucedo Dorantes, por su guía y sabiduría, que han sido fundamentales en el éxito de este proyecto de investigación.

A mis amigos, por su compañía y ánimo constante, haciendo de este viaje una experiencia enriquecedora y memorable.

Y finalmente, a todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a la realización de este proyecto, su apoyo ha sido invaluable.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, quienes siempre han sido mi inspiración y apoyo incondicional a lo largo de este arduo camino. A mis hermanos, por su amor, comprensión y ejemplo. A mi director de tesis el Dr. Juan José Saucedo Dorantes y que gracias a sus consejos, enseñanzas y confianza por permitirme formar parte de su grupo de investigación fue posible desarrollar mi proyecto de tesis de maestría de manera satisfactoria.

Agradezco a mis profesores y sinodales por brindarme su conocimiento, apoyo constante y su dedicación en la revisión del presente documento.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCyT, CVU 1276121) por darme la oportunidad de obtener una beca de posgrado, que gracias a este incentivo pude realizar mis estudios de maestría.

ÍNDICE

RESUMEN	1
SUMMARY	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTOS	4
ÍNDICE	5
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	10
CAPITULO I	11
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Antecedentes	13
1.2. Descripción del problema	20
1.3. Justificación	21
1.4. Hipótesis y objetivos	22
1.4.1. Hipótesis	22
1.4.2. Objetivo general	22
1.4.3. Objetivos específicos	22
CAPITULO II	24
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	24
2.2. Sistemas automotrices	24
2.3 Motor de combustión interna	25
2.4 Modos de manejo en vehículos	26
2.5 Emisiones contaminantes vehiculares	27
2.6 Normativas y regulaciones de emisiones contaminantes	28
2.6.1 NOM-041-SEMARNAT-2015	29
2.6.2 NOM-042-SEMARNAT-2003	30
2.7 Métodos estático y dinámico de la verificación vehicular	30
2.8 Sistemas para la medición de emisiones contaminantes	32
2.8.1 Dinamómetro	34
2.8.2 Escáner automotriz	35
2.9 Sensores de calidad de aire	35
2.10 Tarjetas de desarrollo hardware	36

2.11	FPGA (del inglés, field programmable gate array, arreglo de puertas programables en campo)	37
2.12	Microcontroladores	37
2.13	Ordenadores de placa simple	38
2.14	Raspberry Pi	38
2.15	Inteligencia artificial	38
2.15.1	Redes neuronales	39
2.15.2	Mapas autoorganizados	40
2.16	Indicadores estadísticos	42
2.17	Kuskal-Wallis	43
CAPITULO III		45
3.	METODOLOGÍA	45
3.1.	Diseño y desarrollo del sistema de adquisición de datos	45
3.2.	Selección y caracterización de los sensores	48
3.3.	Acondicionamiento del vehículo para la realización de las pruebas	51
3.4.	Realización de pruebas en el vehículo seleccionado bajo diferentes modos de manejo	52
3.5.	Adquisición de las señales y generar datos (gases contaminantes)	54
3.6.	Procesamiento de señales mediante técnicas de aprendizaje de maquina e inteligencia artificial	54
3.7.	Comparativa de los resultados en porcentaje de contaminación	56
CAPITULO IV		58
4.	RESULTADOS	58
4.1.	Diseño y desarrollo del sistema de adquisición de datos	58
4.2.	Selección y caracterización de los sensores	60
4.3.	Acondicionamiento del vehículo para la realización de las pruebas	64
4.4.	Realización de las pruebas en el vehículo seleccionado bajo diferentes modos de manejo	65
4.5.	Procesamiento de señales mediante técnicas de aprendizaje de maquina e inteligencia artificial	67
4.6.	Comparativa de los resultados en porcentaje de contaminación	79
CAPITULO V		98
5.	CONCLUSIONES	98
CAPITULO VI		99
6.	PROSPECTIVAS	99

REFERENCIAS	100
APENDICES	104
1. Sección de código utilizada	104
2. Artículo publicado	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Planteamiento general (INEGI, 2023).	13
Figura 2.1 Esquema del funcionamiento del motor de cuatro tiempos (Antonio, 2015).	26
Figura 2.2 Centro de verificación vehicular de la ciudad de México (Córdova, 2020).	31
Figura 2.3 Opacímetro para motores diésel CAP3200-O1 (Capelec, 2019).	32
Figura 2.4 BAE 950 S1 (Bosch, 2021).	33
Figura 2.5 ELM327 (Fernanda, 2014).	33
Figura 2.6 SBC disponibles en el mercado para emisiones hacia la calidad del aire (Navarrete, 2019).	36
Figura 2.7 Arquitectura de la ANN (IBM, 2023).	40
Figura 3.1 Metodología (autoría propia).	45
Figura 3.2 Diagrama del sistema de adquisición de datos (autoría propia).	47
Figura 3.3 Diagrama de los diferentes módulos (autoría propia).	48
Figura 3.4 Diagrama de flujo.	50
Figura 3.5 Diagrama de acondicionamiento.	52
Figura 3.6 Segmentación de señales.	55
Figura 4.1 Sistema de adquisición empleado para la recolección de señales de emisión de gas contaminante.	59
Figura 4.2 Circuito del sistema de medición de gases.	61
Figura 4.3 Grafico de la ecuación para el CO.	62
Figura 4.4 Gráfico de la ecuación para el CO ₂ .	62
Figura 4.5 Gráfico de la ecuación para el O ₂ .	63
Figura 4.6 Gráfico de la ecuación para el NO _x .	63
Figura 4.7 Sistema de medición de gases.	64
Figura 4.8 Sistema abordado del vehículo.	65
Figura 4.9 Sonda de verificación.	65
Figura 4.10 Prueba a 30 km/h.	66
Figura 4.11 Prueba a 50 km/h.	66
Figura 4.12 Prueba estática.	66
Figura 4.13 Circuito de prueba.	67
Figura 4.14 Prueba dinámica.	67
Figura 4.15 Datos recibidos de los sensores.	68
Figura 4.16 Gases de CO en prueba estática (30km/h).	69
Figura 4.17 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de CO. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso. ...	70
Figura 4.18 Gases de CO ₂ en prueba estática (30km/h).	71
Figura 4.19 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de CO ₂ . (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso. ...	72
Figura 4.20 Gases de O ₂ en prueba estática (30km/h).	73
Figura 4.21 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de O ₂ . (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso. ...	74
Figura 4.22 Gases de NO _x en prueba estática (30km/h).	75

Figura 4.23 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de NOx. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso. ...	76
Figura 4.24 Entradas para el SOM.	77
Figura 4.25 Heatmap.	77
Figura 4.26 Error de cuantización CO2 prueba estática (30km/h).	78
Figura 4.27 PCA de los gases de la prueba estática (30km/h).	79
Figura 4.28 Gases de CO en prueba estática (50km/h).	80
Figura 4.29 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de CO. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso. ...	81
Figura 4.30 Gases de CO2 en prueba estática (50km/h).	82
Figura 4.31 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de CO2. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso. ...	83
Figura 4.32 Gases de O2 en prueba estática (50km/h).	84
Figura 4.33 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de O2. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso. ...	85
Figura 4.34 Gases de NOx en prueba estática (50km/h).	86
Figura 4.35 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de NOx. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso. ...	87
Figura 4.36 Gases de CO en prueba dinámica.	88
Figura 4.37 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de CO. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso. ...	89
Figura 4.38 Gases de CO2 en prueba dinámica.	90
Figura 4.39 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de CO. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso. ...	91
Figura 4.40 Gases de O2 en prueba dinámica.	92
Figura 4.41 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de O2. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso. ...	93
Figura 4.42 Gases de NOx en prueba dinámica.	94
Figura 4.43 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de NOx. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso. ...	95
Figura 4.44 Error de cuantización prueba estática (30km/h).	96
Figura 4.45 Error de cuantización prueba estática (50km/h).	96
Figura 4.46 Error de cuantización prueba dinámica.	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Gases emitidos por vehículos (ACELA, 2020).....	28
Tabla 2.2 Límites máximos permisibles de emisión del método dinámico (Norma Oficial Mexicana, 2015).	29
Tabla 2.3 Límites máximos permisibles de emisión del método estático (Norma Oficial Mexicana, 2015).	30
Tabla 3.1 Descripción del acondicionamiento de los sensores	49
Tabla 3.2 Matriz de experimentación	53
Tabla 4.1 Características de los sensores.	60
Tabla 4.2 Ecuaciones para la caracterización de los sensores	64

CAPITULO I

1.INTRODUCCIÓN

Los vehículos desempeñan un papel crucial en la vida humana moderna, ya que facilitan el transporte, la conectividad y el desarrollo económico. Permiten a las personas viajar de forma rápida y eficiente, salvando distancias que antes se recorrían en días o semanas. Más allá de la movilidad personal, los vehículos facilitan el movimiento de bienes y servicios, impulsan el comercio y fomentan la globalización. También mejoran el acceso a la educación, la atención sanitaria y las oportunidades de empleo, lo que contribuye a la movilidad social y a la calidad de vida en general. A medida que evoluciona la tecnología, la importancia de los vehículos sigue aumentando, influyendo en la planificación urbana, las políticas ambientales y la forma en que interactuamos con el mundo.

En este sentido, los recientes avances tecnológicos han impactado diferentes sectores y, entre ellos, el sector automotriz también se ha visto beneficiado. La tecnología ha transformado profundamente la industria automotriz, revolucionando el diseño, el rendimiento y la seguridad de los vehículos. Innovaciones como los sistemas híbridos y los sistemas de propulsión eléctricos están reduciendo las emisiones y la dependencia de los combustibles fósiles, mientras que los sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS) mejoran la seguridad al minimizar el error humano. Las funciones de conectividad, incluidos los sistemas de información y entretenimiento y la comunicación entre el vehículo y todo (V2X), mejoran la experiencia del usuario y permiten una gestión del tráfico más inteligente. A medida que la tecnología continúa evolucionando, no solo cambia la forma en que conducimos, sino que también contribuye a un ecosistema de transporte más sostenible y eficiente. Además, la fabricación de vehículos recientes ha incorporado ampliamente diferentes tecnologías con la finalidad de proporcionar soluciones referentes al confort, rendimiento y seguridad. Dentro de algunas tecnologías enfocadas en el rendimiento de los automóviles, como por ejemplo los modos de

manejo integrados en los vehículos pueden tener algunos problemas con respecto a los gases contaminantes que estos producen.

La tecnología ha mejorado significativamente la funcionalidad de los diferentes modos de conducción (ECO, NORMAL y SPORT) para adaptar la experiencia de conducción a diversas preferencias y condiciones. En el modo ECO, algoritmos avanzados optimizan el rendimiento del motor y la respuesta del acelerador para maximizar la eficiencia del combustible, lo que lo hace ideal para una conducción económica. El modo NORMAL logra un equilibrio entre comodidad y capacidad de respuesta, lo que proporciona una opción versátil para el uso diario. Mientras tanto, el modo SPORT aprovecha la tecnología para agudizar la respuesta del acelerador, ajustar la rigidez de la suspensión y mejorar la respuesta de la dirección, lo que brinda una experiencia de conducción más dinámica y atractiva. Estos modos reflejan cómo la tecnología permite a los conductores personalizar sus vehículos para satisfacer necesidades y preferencias específicas, lo que mejora tanto la eficiencia como el disfrute en la carretera.

Con respecto a esto, algunos estudios centrados en los gases contaminantes se basan en algunas comparativas de los vehículos eléctricos, híbridos y de combustión interna, algunos otros en pruebas de la relación entre una conducción agresiva con respecto a una conducción suave, sin tomar en cuenta hasta ahora los modos de manejos de los automóviles. Por lo tanto, en este trabajo de tesis se pretende el desarrollo de un sistema por medio de inteligencia artificial, con el cual se lograría observar algunos de los efectos en que los modos de manejo se relacionan con los gases contaminantes, además de que dicho sistema estará diseñado con el objetivo de ser introducido dentro del vehículo para así realizar pruebas durante una ruta en específico, intercalando los distintos modos de manejo que contenga el automóvil.

1.1. Antecedentes

En los últimos años la cantidad de vehículos que integran el parque vehicular en México ha ido aumentando conforme a los años, esto de acuerdo con lo reportado en la página del instituto nacional de estadística y geografía del INEGI (2023), el cual indica que en el 2017 se contaba con 46,109,090 vehículos de motor registrados en circulación y en 2022 se contó con 55,167,421 como se muestra en la figura 1.1.

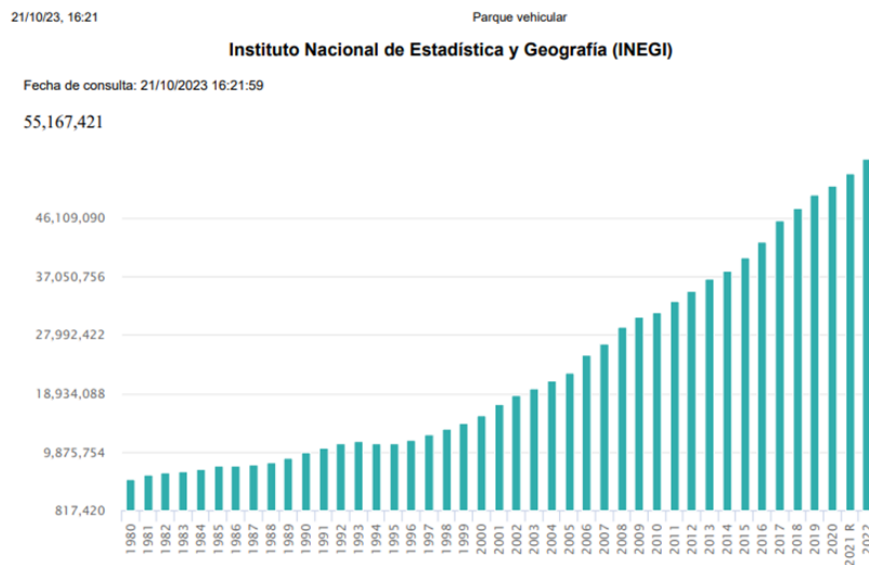


Figura 1.1 Planteamiento general (INEGI, 2023).

En consecuencia, los gases de emisiones contaminantes originadas por los vehículos han ido incrementado de forma considerable, dicho aumento se ha dado a pesar de que existen ciertas regulaciones establecidas por algunas entidades como la secretaría de medio ambiente y recursos naturales-normas oficiales mexicanas como la SEMARNAT-NOM-041 (2015). La generación de emisiones contaminantes es una problemática de índole mundial, tanto así que gobiernos de diferentes países han trabajado en la regulación las emisiones de los vehículos, en este sentido, diferentes armadoras de vehículos han intentado mejorar el desempeño de los motores de combustión interna mediante el diseño e implementación de nueva tecnología para optimizar los diferentes procesos y lograr reducir la cantidad de emisiones contaminantes generadas. Con respecto a algunas

tecnologías, Volvo (2020) indica que una mejora que se ha incluido recientemente en diferentes vehículos está relacionada con diferentes modos de manejo, que, de forma general, permiten que el desempeño de los motores de combustión interna se adecue a ciertas características con la finalidad de generar un modo de manejo económico (eco), normal (confort) y dinámico (sport). Los distintos modos de manejo pueden ser seleccionados por el usuario desde el interior del vehículo, modificando de cierta forma la manera en que el vehículo se conducirá; a pesar de la innovación, en cuanto a los diferentes modos de manejo, queda abierta la cuestión de si el modo de manejo de un vehículo tiene un efecto directo en las emisiones producidas o si solo son modos de manejo que se enfocan en el ahorro de combustible o en el incremento de la potencia, dejando de lado la regulación de las emisiones contaminantes.

En cuestión de la regulación de emisiones y los trabajos relacionados en México, Vela (2019), en un trabajo realizado con el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), menciona que la preocupación por las emisiones contaminantes es global, motivo por el cual diversos gobiernos a nivel mundial han introducido leyes de regulación que exigen a los fabricantes reducir estas emisiones. Para abordar este desafío, se han desarrollado motores que cumplen con las normativas de cada país. Los elementos nocivos primordiales presentes en los gases contaminantes en el escape incluyen el dióxido de azufre (SO₂), el dióxido de carbono (CO₂), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los hidrocarburos (HC) y las partículas en suspensión (PM). En cuestión a ello, Morales (2014) en colaboración con el IMT, destaca que en México se ha adoptado el uso del convertidor catalítico desde 1991. Este dispositivo tiene la función de reducir los gases como el monóxido de carbono (CO), Óxidos de Nitrógeno (NO_x) e Hidrocarburos (HC).

Las emisiones contaminantes generadas por vehículos no son solo un problema nacional sino también internacional ya que tiene un impacto mundial. En este sentido, Pielecha (2020) con sus pruebas e información del parlamento europeo aporta que en 2016 las emisiones del transporte representaron alrededor

del 25% de emisiones de dióxido de carbono a nivel global. En dicho porcentaje, el transporte por carretera (vehicular) tuvo la mayor proporción en aproximadamente un 72%. Este fenómeno es completamente visible en las aglomeraciones urbanas. Además, indica que algunas soluciones a ellos son la incorporación de los vehículos híbridos y el desarrollo de la electromovilidad que idealiza el uso de vehículos eléctricos. El principal objetivo de su trabajo es una evaluación del consumo de energía y de las emisiones de escape de los vehículos equipados con diferentes sistemas de propulsión en funcionamiento real. Para las pruebas utilizó vehículos con motor convencional e incluye motores con diferentes niveles de emisiones, así como vehículos híbridos de última generación y un automóvil eléctrico. En sus resultados, destaca que los vehículos híbridos han demostrado notables avances técnicos y operativos, como su innovador proceso de carga de baterías, los cuales están emergiendo como competidores para los automóviles que utilizan motores de combustión pero con respecto a su análisis concluye que la mejor opción es la de vehículos que funcionan exclusivamente con sistemas de propulsión eléctrica, aunque también destaca que un problema con los vehículos modernos es la evaluación del consumo y eficiencia energética en pruebas reales.

Las emisiones de los automóviles son una fuente importante de contaminación del aire, ya que liberan contaminantes nocivos que pueden provocar graves problemas de salud. Esto ha hecho que los investigadores estén cada vez más preocupados por estas emisiones debido a su contribución al cambio climático y al deterioro de la calidad del aire. Dentro de las pruebas realizadas a distintos vehículos, Guevar (2016), en la realización de su trabajo, analiza las emisiones de gases de los vehículos Hyundai I10, Kia Picanto, Chevrolet Spark, todos con una cilindrada promedio de 1000 cc realizado en la ciudad de Bogotá, resaltando que los vehículos mencionados en sus pruebas también forman parte del parque vehicular que comúnmente circula en México ya que estos automóviles son accesibles económicamente. Teniendo en cuenta las condiciones cotidianas de manejo de un vehículo automotor y los terrenos transitables en una condición normal; comprueba que los resultados obtenidos en un centro de diagnóstico automotriz (CDA) puede que no sean totalmente certeros ya que las condiciones de

ruta de un vehículo hacen que las emisiones varíen. Además, agrega que en un CDA las pruebas de emisión de gases deberían simularse en una rampa con inclinaciones de subida y bajada para probar su veracidad.

A pesar de que ya se han desarrollado algunos trabajos enfocados al análisis de emisiones contaminantes vehiculares, muy pocos han abordado dichos análisis bajo distintas formas de manejo; al respecto, el IMT (2000) en la realización de otra investigación sobre tres tipos de conducción en el cual define tres tipos de manejo clasificándolos como: manejo normal, manejo agresivo, y manejo técnico, obteniendo resultados que evidencian notables diferencias en el rendimiento del combustible y las emisiones producidas entre los tres modos de tipos mencionados. Al comparar el manejo técnico (el cual se caracteriza por tener un cambio de velocidades y aceleración menor para alcanzar una velocidad constante) con el manejo normal, se logró una economía de combustible del 12% y una disminución significativa en las emisiones de contaminantes: 23% menos de material particulado (PM), 12% menos de dióxido de carbono (CO₂), 11% menos de óxidos de nitrógeno (NO_x) y un 7% menos de hidrocarburos (HC) sin quemar. En el mismo contexto de pruebas, al comparar el manejo agresivo con el manejo técnico, se observó un ahorro de combustible del 18.66% y una reducción sustancial en las emisiones contaminantes: una disminución del 65% en PM, un 18% menos de CO₂, un 8.66% menos de NO_x y un 43% menos de HC. Los resultados indican una relación inversa entre las emisiones de CO₂ y el ahorro de combustible, con menores emisiones de partículas en el caso de un menor consumo de combustible.

Como dato adicional sus pruebas fueron realizadas en el laboratorio móvil de emisiones contaminantes de la universidad de West Virginia de los Estados Unidos de América, durante el desarrollo de las pruebas, el vehículo fue montado por un técnico que sigue un ciclo de manejo en particular y las emisiones son medidas utilizando un túnel de dilución instrumentado para el análisis de gases. Aunque el sistema utilizado en este trabajo indica que es móvil, va de la mano con un túnel de dilución del cual su índice de dilución puede variar con respecto a las aceleraciones o desaceleraciones del vehículo, y para poder mantener el flujo volumétrico dentro

del mismo es necesario utilizar herramientas extras, haciendo un poco más laborioso las pruebas con este tipo de sistemas, también que las emisiones pueden ser alteradas por los contaminantes del que puedan estar en el aire. Aunque, por otro lado, en consideración hacia los modos de conducción de los usuarios, Ruiz (2022) en su investigación informa que cuando se conduce un vehículo, los comportamientos de los conductores desempeñan un papel crucial en el tipo de conducción que se adopta, que se diferencia principalmente en los niveles de aceleración y los cambios abruptos de velocidad. Estos diversos estilos de conducción pueden ser un factor significativo en la búsqueda de una menor eficiencia en el consumo de combustible y reducir el impacto de las emisiones contaminantes en el medio ambiente.

El aumento en el número de vehículos en el mundo y la falta de conciencia ambiental han contribuido a un notable aumento en las emisiones de gases contaminantes. En los últimos años, los avances en tecnología, como los sistemas de asistencia al conductor DAS (del inglés, driver assistance systems, sistemas de asistencia al conductor), han sido beneficiosos al mejorar la calidad de la experiencia de conducción en términos de seguridad y eficiencia. Esto incluye la capacidad de adaptar el vehículo a las preferencias individuales de cada conductor, lo que ha dado lugar a una amplia área de investigación. Un análisis realizado por Caldas (2020) revela que las emisiones de CO₂ provenientes del transporte por carretera constituyen el 40% de todas las emisiones de CO₂ en el medio ambiente. En respuesta a esta problemática, los fabricantes de automóviles han propuesto diversas soluciones para reducir la emisión de estos gases. Una de estas soluciones es la introducción de modos de manejo en los vehículos, cada uno con parámetros característicos. Con un estudio sobre estos parámetros, sería posible determinar cuál de ellos tiene un menor impacto ambiental.

Con relación a los modos de manejo, Melman (2019) en su artículo menciona que varios vehículos modernos ofrecen la opción de seleccionar un modo de conducción. Sin embargo, la literatura no contiene estudios empíricos que investiguen cómo los modos de conducción propias del vehículo afectan al

comportamiento dinámico del mismo en condiciones normales. En sus pruebas realiza una ruta de 26,3 km que contiene un tramo rural y carretero esto lo realiza en cuatro ocasiones con un mismo conductor, el utiliza un vehículo Multi-SenseR de Renault con dos modos de manejo: confort y deportivo (sport). Aunque su estudio se concentra más en el área de afectaciones directas a la parte estructural del vehículo como lo es el ángulo de las ruedas traseras, el par del motor aceleración longitudinal y movimiento vertical.

Otra investigación enfocada en las tecnologías del vehículo es la de Pallarozo (2021) donde pone a prueba un vehículo híbrido durante una ruta en específico para comparar la disminución de gases contaminantes en comparación con un vehículo de combustión interna, plantea que el modo de potencia en un automóvil híbrido se configura de manera que aumenta la potencia del acelerador, lo que resulta en una aceleración más potente y suave. Se optimiza el rendimiento del acelerador al incrementar la fuerza aplicada en la zona central del rango de apertura del acelerador, lo que, en consecuencia, produce un ligero aumento en el consumo de combustible lo que conlleva a una mayor producción de emisiones contaminantes. En este trabajo se utilizó un medidor de gases modelo AGS688, el cual en el mercado se encuentra con un costo elevado y un tipo de arquitectura cerrada.

En este sentido, algunos trabajos han sido desarrollados con la finalidad de generar soluciones enfocadas en monitoreo de emisión de gases contaminantes para el control de su generación, tal es el caso de (Bárcenas, 2013) quien desarrolla un sistema para medir la calidad del aire en la Universidad Autónoma de Querétaro. Dicho sistema se compone de una unidad terminal remota (RTU) y un servidor receptivo de mensajes SMS. Con una RTU recopila datos sobre los niveles de contaminantes ambientales, como monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂) y sus datos se combinan en una secuencia que incluye las coordenadas geográficas y la hora UTC (tiempo universal coordinado) para después transmitirlos a través del módem GPRS. Los datos se almacenan en archivos KML (lenguaje de marcado de keyhole) para permitir la visualización de los niveles de contaminación en grandes áreas urbanas mediante la aplicación (del

inglés Google Earth, Google tierra). Su sistema lo utiliza en pruebas en la ciudad de Querétaro, México, a lo largo de una ruta determinada. También cabe mencionar que Gonzales (2020) realizó un sistema destinado a dispositivos móviles que posibilite visualizar las fluctuaciones en la presencia de gases contaminantes. Esto se lo hace mediante el uso de datos estadísticos relacionados al aumento o disminución del tráfico vehicular, así como la información recopilada por las estaciones de monitoreo atmosférico en el estado de Jalisco, México. En resumen, se trata de una herramienta tecnológica diseñada con el propósito de mantener a la población debidamente informada con respecto a las emisiones de un vehículo. Otro trabajo es el de Chen (2023) que desarrolló un sistema basado en tecnología de espectroscopia de absorción la cual se deriva de un láser de diodo sintonizable, el cual presenta una alta resolución, alta sensibilidad y respuesta rápida, desarrolló un sistema de detección de CO₂ y CH₄. Utilizando este sistema, realizó pruebas de monitoreo en la carretera de Beijing, de norte a sur, durante diferentes períodos de tiempo. Los experimentos montados en vehículos verificaron la viabilidad de utilizar este sistema para detección montada en vehículos de concentraciones de gases de efecto invernadero en vías urbanas.

Así, de acuerdo con la revisión de la literatura, es posible concluir que actualmente han sido muy pocos los trabajos enfocados al análisis de la relación que existe entre los diferentes modos de manejo que pueda tener un vehículo con la cantidad de emisiones contaminantes emitidas. Incluso, se puede decir que localmente no existen trabajos que hayan abordado dicha temática. Por lo tanto, en este trabajo de investigación se propone desarrollar un sistema de monitoreo para el análisis de gases a bordo en vehículos operados bajo diferentes modos de manejo para analizar los efectos relacionados con la generación de gases contaminantes y su relación con el modo de manejo. Para el desarrollo de dicho sistema se propone que sea bajo a través del uso de sensores de bajo costo y mediante una arquitectura de programación abierta que permita su reconfiguración.

1.2. Descripción del problema

El desarrollo de este trabajo está inspirado principalmente en realizar una contribución que aporte a la reducción de emisiones contaminantes generadas por vehículos, específicamente, se abordaran las siguientes problemáticas:

- Una de las normas que los vehículos tienen que cumplir para estar en circulación, es la “verificación vehicular” donde se les realiza una prueba de gases emitidos, estos gases deben de estar dentro de un rango específico dependiendo el tipo de holograma que se requiera, siendo que esta prueba solo es realizada dentro de los centros permitidos, en los cuales el vehículo esta estático y al realizar dicha prueba, este es revolucionándolo conforme a los parámetros indicados.
- El sistema para realizar las pruebas dentro de un centro de verificación necesita un espacio considerable ya que se basa en un sistema con computadora y una sonda para percibir los gases, la cual se coloca en la parte del escape del vehículo, siendo que esto impide que las pruebas puedan ser realizadas con el automóvil en movimiento.
- Con la integración de distintas tecnologías en los vehículos, en algunos se encuentran los modos de manejo los cuales se dividen principalmente en tres tipos: modo normal, eco y sport, tomando esto en cuenta, en los estudios actuales, solo se han enfocado en comparativas de gases contaminantes en vehículos híbridos y de combustión interna.
- Una gran parte de los trabajos realizados y descritos en los antecedentes se han basado en las características de conducción de los usuarios y no en los distintos modos que se han incluido en los vehículos de combustión interna.
- No se ha abordado la realización de un sistema de monitoreo más factible para realización de pruebas con el vehículo en movimiento para lograr destacar las anomalías que los modos de manejo de los vehículos puedan tener en la producción de gases contaminantes.

1.3. Justificación

En respuesta a las diferentes problemáticas ambientales, económicas y sociales que afectan a nuestra sociedad en la actualidad y basándonos en la revisión de la sección de antecedentes se puede decir que este proyecto de investigación estará basado en las necesidades indicadas en los Programas Nacionales Estratégicos del CONAHCYT (PRONACES), específicamente en el Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático, el cual su objetivo es promover soluciones a largo plazo que garanticen un uso sostenible y democrático de la energía, garantizando el acceso a servicios energéticos para las poblaciones más desfavorecidas y vulnerables. Por lo tanto, la realización de este trabajo tiene diferentes justificaciones las cuales se describen enseguida de acuerdo con las diferentes aportaciones que generara:

Aporte técnico-científico

Tomando en cuenta información del párrafo anterior, con el desarrollo de un sistema de monitoreo de gases contaminantes automotriz, que sea capaz de cuantificar los datos recibidos a bordo de un vehículo, para después analizar y comparar los resultados obtenidos en una ruta en específico además de poder hacerlo como el método de una prueba común en un centro de verificación.

- El sistema será desarrollado con ayuda de algoritmos de inteligencia artificial, como pueden ser: redes neuronales, indicadores estadísticos y/o lógica difusa, mapas de autoorganización.
- El estudio será basado principalmente en la relación que existe entre las emisiones contaminantes y los distintos modos de manejo integrados en los vehículos.

Aporte social

Con el sistema se podrá visualizar cuando el vehículo no cumpla con ninguno de los rangos establecidos para aprobar la verificación vehicular en ninguno de los modos de manejo, logrando así que el usuario pueda escanear el vehículo con otro sistema con anticipación para tener el mismo en condiciones regulares para su

próxima verificación ya que contará con un sistema de alarma. Además, mediante el análisis de las emisiones contaminantes generadas por un vehículo en diferentes modos de manejo se puede determinar los niveles de contaminación, esto finalmente puede ayudar a los usuarios a saber en qué modo de manejo hacer la conducción para ayudar a mejorar la calidad del aire cuando se tengan contingencias como ocurre en la ciudad de México (CDMX).

1.4. Hipótesis y objetivos

1.4.1. Hipótesis

Mediante un sistema de monitoreo que permita adquirir las emisiones contaminantes a bordo de un vehículo, será posible analizar y determinar los efectos generados por los distintos modos de manejo en vehículos (económico, normal, y sport) mediante el procesamiento basado en el cálculo de indicadores estadísticos y algoritmos de inteligencia artificial.

1.4.2. Objetivo general

Diseñar y desarrollar un sistema de monitoreo de gases contaminantes mediante el uso de sensores y programación en hardware para adquirir mediciones de las emisiones en vehículos operados bajo diferentes modos de manejo y analizar su impacto.

1.4.3. Objetivos específicos

- Realizar un análisis del estado del arte mediante la búsqueda bibliográfica para identificar el área de oportunidad.
- Diseñar y desarrollar un sistema de adquisición de datos mediante la descripción de lenguaje de hardware para adquirir y almacenar múltiples señales.
- Seleccionar un conjunto de sensores basándose en las normativas de medición de gases contaminantes para que el sistema tenga la capacidad de realizar mediciones en diferentes vehículos.
- Acondicionar y caracterizar las diferentes señales de los sensores de emisiones mediante el uso de elementos de electrónica para obtener las

relaciones entre las concentraciones de gases emitidos por un vehículo y las señales de salida de los sensores.

- Proponer una matriz de pruebas a través de la definición de diferentes parámetros y restricciones para la ejecución de la experimentación
- Realizar la medición de gases contaminantes en un vehículo mediante la instalación del sistema de monitoreo para adquirir las emisiones generadas en diferentes modos de manejo.
- Analizar las señales de emisiones contaminantes adquiridas mediante el cálculo de indicadores estadísticos y herramientas de inteligencia artificial para generar un sistema de alarma.

CAPITULO II

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación es necesario contar con las bases teóricas que ayudarán en el desarrollo de un sistema de monitoreo para analizar los gases producidos en vehículos operados bajo diferentes modos de manejo. Así mismo se tienen que considerar algunos conceptos que se utilizarán durante la realización del proyecto, esto con el fin de comprender la funcionalidad del sistema y el análisis para determinar si los gases generados por un vehículo cumplen con las normativas vigentes.

2.2. Sistemas automotrices

Un sistema automotriz es un conjunto de componentes que trabajan juntos para proporcionar una funcionalidad específica de un vehículo. Estos son la base de la tecnología de los vehículos modernos, ya que proporcionan una gran cantidad de operaciones, como el manejo, el ahorro de combustible, la seguridad y la conectividad.

Los sistemas automotrices modernos se basan en una gran variedad de tecnologías, desde motores de combustión interna hasta tecnologías avanzadas de control electrónico. Estas tecnologías permiten a los fabricantes una gran cantidad de características para mejorar los vehículos. Dentro de los principales componentes de un sistema automotriz son:

- El motor
- El sistema de control electrónico
- El sistema de suspensión
- El sistema de frenos
- El sistema de dirección
- El sistema de tracción

Estos componentes trabajan juntos de manera que proporcionan una experiencia de conducción óptima (IIAM, 2019).

2.3 Motor de combustión interna

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) son motores térmicos que funcionan a través de un movimiento rectilíneo en un sistema de biela y manivela con el fin de producir un trabajo. Estos motores se conocen como motores de combustión interna debido a su capacidad para generar un estado térmico en el fluido que circula dentro del motor. Durante su operación, el motor sigue una secuencia de procesos que se repiten y componen un ciclo termodinámico. Estos procesos comprenden cinco etapas fundamentales que ocurren en un MCIA son las siguientes:

Admisión: En este proceso, el fluido de trabajo (ya sea una mezcla de aire y combustible o simplemente aire, dependiendo del tipo de motor) ingresa al motor.

Compresión: Este proceso es esencial para aumentar la eficiencia termodinámica del motor, ya que comprime la mezcla.

Combustión: Es un mecanismo de reacciones químicas altamente exotérmicas que generan el estado térmico del fluido de trabajo, aumentando la presión y la temperatura.

Expansión: En este proceso, los gases resultantes de la combustión se expanden y empujan el pistón, aumentando el volumen del cilindro. Esta variación en el volumen genera trabajo, y la presión ejercida por los gases se convierte en torque en el cigüeñal.

Escape: En esta etapa, los gases producidos por la combustión se eliminan para permitir un nuevo proceso de admisión.

Esencialmente, estos motores siguen un ciclo continuo de estos procesos para convertir la energía química en energía mecánica y propulsar el vehículo (Antonio, 2015). En la figura 1.3 se puede apreciar las etapas de un motor de combustión interna.

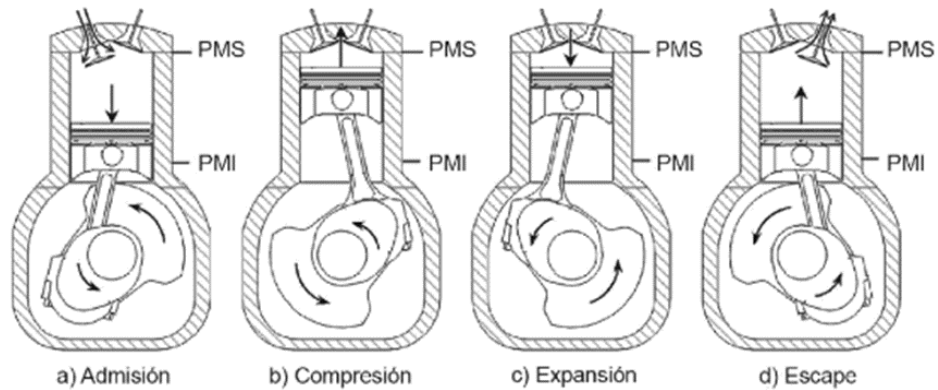


Figura 2.1 Esquema del funcionamiento del motor de cuatro tiempos (Antonio, 2015).

Para este trabajo se utilizará el motor de encendido por chispa o motor de ciclo Otto el cual se basa en un motor de 4 tiempos su nombre es dado por las 4 fases que hace durante su funcionamiento las cuales son: admisión, compresión, explosión y escape.

2.4 Modos de manejo en vehículos

La computadora presente en los vehículos, a menudo conocida como unidad de control electrónico (ECU), central de control electrónico (CCM), o Módulo de Control Electrónico (ECM), recopila información proveniente de varios sensores incorporados en el vehículo. Dependiendo del fabricante y modelo del automóvil, esta computadora toma decisiones específicas, las cuales están preprogramadas en su memoria, con el fin de ajustar los sistemas del vehículo para garantizar un trayecto seguro.

En el momento que se selecciona un modo de manejo en particular, la computadora identifica la "personalidad" deseada y adapta todos los sistemas del automóvil en consecuencia. Dado que los vehículos tienen diferentes capacidades y se enfrentan a diversas condiciones de carretera, se han implementado varios modos de manejo para mejorar la experiencia del conductor. Entre los modos de conducción más comunes se incluyen:

Modo normal: Esta forma es la predeterminada y generalmente se encuentra en un punto intermedio entre las características de conducción económica y deportiva.

Modo sport: También conocido como dinámico, este modo hace que el vehículo se comporte de manera más agresiva, priorizando la potencia y la aceleración en lugar de la eficiencia en el consumo de combustible y la conducción suave. Cuando se activa este modo, a velocidades más altas los cambios de marcha pueden retrasarse, pero se vuelven más rápidos cuando la velocidad disminuye. Este modo permite aprovechar al máximo la potencia del motor.

Modo eco: En este modo, los sistemas del vehículo se ajustan para maximizar la eficiencia en el consumo de combustible, desde el motor, transmisión y el control del clima. Aunque se logra una reducción significativa en el consumo de combustible, no se prioriza la velocidad y potencia en el proceso (SEAT, 2017).

2.5 Emisiones contaminantes vehiculares

Las emisiones provenientes del escape resultan de la combustión de diversos tipos de combustibles, como gasolina, diésel, otros combustibles licuados o biocombustibles, que contienen una variedad de contaminantes, incluyendo monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y otros elementos nocivos como el azufre. La cantidad y la composición de estas emisiones eximidas por el tubo de escape dependen de múltiples causas, como las características del vehículo, la presencia de sistemas de control de emisiones, el mantenimiento, la tecnología empleada y otros aspectos como la velocidad, la frecuencia y la intensidad de las aceleraciones, así como la composición de los combustibles utilizados (ACELA, 2020). La Tabla 2.1 proporciona una clasificación de los gases contaminantes liberados por los vehículos y algunos de los factores que influyen en su generación.

Tabla 2.1 Gases emitidos por vehículos (ACELA, 2020).

Contaminante	Características	Cómo se producen
Hidrocarburo (HC)	Existe una variedad de hidrocarburos o compuestos orgánicos volátiles (COV).	Causado por un proceso de combustión incompleto.
Monóxido de carbono (CO)	El CO es un gas incoloro e inodoro.	Producido a raíz de una combustión que no se ha completado y cuando se produce una oxidación parcial del carbono en los combustibles.
Dióxido de carbono (CO₂)		Ocurre cuando la combustión se lleva a cabo en presencia de oxígeno con una cantidad suficiente para oxidar la totalidad del carbono contenido en el combustible.
Óxido de nitrógeno (NO)	Los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos actúan como precursores del ozono y, en presencia de humedad, el óxido de nitrógeno (NO) se transforma en ácidos nítricos, lo que contribuye al fenómeno de la lluvia ácida.	Cuando la presión y la temperatura en el motor son elevadas, los átomos de nitrógeno y el oxígeno reaccionan para generar óxidos de nitrógeno, incluyendo el dióxido de nitrógeno (NO ₂), junto con otros compuestos de nitrógeno.
Dióxido de azufre (SO₂)	El SO ₂ es un gas incoloro con un aroma penetrante. En ambientes húmedos, se transforma en ácido sulfúrico, que es otro componente fundamental en la formación de la lluvia ácida.	Este proceso se genera a causa de la oxidación del azufre durante la combustión de combustibles.
Material particulado (PM)	Las partículas que se encuentran en el aire pueden ser sustancias sólidas o líquidas y se crean a partir de una mezcla compleja de ácidos y compuestos de hidrocarburos pesados, incluyendo partículas de polvo. Estas partículas se subdividen en partículas finas, ultrafinas y nano partículas, con diámetros inferiores a 2,5 micras (PM _{2.5}), y partículas PM ₁₀ , que miden menos de 10 micras de diámetro.	La formación de estas partículas se origina a causa de la quema de combustibles.

2.6 Normativas y regulaciones de emisiones contaminantes

En consideración hacia la protección de la salud humana, los gobiernos de diferentes países en todo el mundo buscan regular los niveles de emisiones en el aire mediante una variedad de herramientas normativas. Entre estas herramientas se incluyen las normativas de calidad del aire, que establecen concentraciones aceptables de contaminantes para las personas en función de los peligros que representan. Estas normativas determinan los niveles permisibles para distintos intervalos de exposición, ya que, en ciertos casos, una concentración aparentemente baja puede seguir siendo perjudicial si la exposición se prolonga

durante un periodo de tiempo largo, lo que también implica un riesgo para la humanidad.

En México, la Secretaría de Salud es la entidad encargada de valorar la evidencia de los efectos de la contaminación sobre la salud y de decretar los límites admisibles de concentración de contaminantes atmosféricos. La Tabla 2 proporciona un resumen de los indicadores utilizados para evaluar el cumplimiento de las normativas de salud en relación con cada uno de los contaminantes criterio. También se especifica el tipo de dato y el período utilizado para calcular la métrica, los valores límite, la frecuencia permitida, el tipo de exposición, los criterios de suficiencia de información y la normativa correspondiente a cada contaminante (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, 2017).

2.6.1 NOM-041-SEMARNAT-2015

La Norma Oficial Mexicana NOM-041-SEMARNAT-2015 establece los valores máximos permitidos para los gases contaminantes provenientes de los tubos de escape de vehículos en circulación que utilizan combustibles fósiles, en este caso gasolina (Norma Oficial Mexicana, 2015).

Tabla 2.2 Límites máximos permisibles de emisión del método dinámico (Norma Oficial Mexicana, 2015).

Año-modelo del vehículo	Hidrocarburos (HC hppm)	Monóxido de Carbono (CO % vol)	Oxígeno (O2 % vol)	Óxidos de nitrógeno (NO2 ppm)	Dilución (CO+ CO2 %vol)		Factor Lambda Max
					Min.	Max.	
1990 y anteriores	350	2.5	2.0	2500	13	16.5	1.05
1991 y posteriores	100	1.0	2.0	1500	13	16.5	1.05

Tabla 2.3 Límites máximos permisibles de emisión del método estático (Norma Oficial Mexicana, 2015).

Año-modelo del vehículo	Hidrocarburos (HC hppm)	Monóxido de Carbono (CO % vol)	Oxígeno (O ₂ % vol)	Dilución (CO+ CO ₂ %vol)		Factor Lambda Max
				Min.	Max.	
1993 y anteriores	400	3.0	2.0	13	16.5	1.05
1994 y posteriores	100	1.0	2.0	13	16.5	1.05

2.6.2 NOM-042-SEMARNAT-2003

Establece los límites máximos permitidos de emisiones de hidrocarburos totales o no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas que provienen de los escapes de vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3,357 kilogramos, y que utilizan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diésel. Asimismo, regula las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de estos vehículos. Esta norma es de cumplimiento obligatorio para los fabricantes e importadores de vehículos nuevos, ya sean de producción nacional o extranjera que se importen de forma definitiva al territorio mexicano (Norma Oficial Mexicana, 2005).

2.7 Métodos estático y dinámico de la verificación vehicular

En algunas zonas como en la zona metropolitana del valle de México (ZMVM) la verificación vehicular es aplicada con respecto a dos métodos: el dinámico y el estático, la elección entre ambos depende de las particularidades del vehículo.

1. Método dinámico

Este enfoque implica la medición de gases (hidrocarburos, monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno y óxidos de nitrógeno) en los sistemas de escape de vehículos en movimiento que están equipados con motores que utilizan combustibles como gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural u otras alternativas. Estas mediciones se realizan bajo condiciones simuladas de aceleración a través de imponer una carga controlada externa utilizando un dinamómetro.

Este procedimiento es válido para la totalidad de los automóviles, a excepción de aquellos que han sido señalados por sus fabricantes como no aptos para operar en un banco de pruebas. Consta de tres fases:

Evaluación visual de emisiones de humo a una velocidad de 24 kilómetros por hora (km/h).

Prueba a una velocidad de 24 km/h.

Prueba a una velocidad de 40 km/h.

Cada una de estas etapas se lleva a cabo con el eje de tracción del vehículo en movimiento y la aplicación controlada de carga externa. Para alcanzar estas velocidades, el vehículo debe acelerar gradualmente en un período de 10 segundos. En la figura 2.2 se muestra un centro de verificación vehicular.



Figura 2.2 Centro de verificación vehicular de la ciudad de México (Córdova, 2020).

2. Método estático

Por otro lado, el método estático implica la medición de gases (HC, CO, CO y O) en el escape de los vehículos que se encuentran en circulación cuando utilizan motores que funcionan con gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternativos. En este caso, el vehículo se encuentra estacionado.

El uso de este método se reserva para vehículos que el fabricante ha identificado como no adecuados para pruebas en un dinamómetro. Este procedimiento comprende tres etapas:

- Evaluación visual de emisiones de humo.
- Prueba de conducción en crucero.
- Prueba de ralentí en vacío (SEDEMA, 2018).

2.8 Sistemas para la medición de emisiones contaminantes

En el proceso de control de gases contaminantes liberados por los vehículos, la fase más crucial de la verificación vehicular es la etapa de medición. Para llevar a cabo estas mediciones, se utilizan diversos equipos de medición que comprenden:

- Opacímetros: Estos tienen la responsabilidad de analizar la densidad de los gases liberados por el escape del vehículo. Su operación se sustenta en la premisa de que, a mayor opacidad de los gases, se incrementa la concentración de partículas finas y sustancias contaminantes en el entorno. Los opacímetros desempeñan un papel esencial en la verificación del cumplimiento de los requisitos de emisiones por parte de un automóvil. Uno de los modelos usados es el CAP3200-O1 como se muestra en la figura 2.3.



Figura 2.3 Opacímetro para motores diésel CAP3200-O1 (Capelec, 2019).

- Analizadores de gases: Estos instrumentos se emplean para medir las concentraciones de gases contaminantes, incluyendo el CO, NOx y los hidrocarburos. Los analizadores de gases ofrecen mediciones precisas de los componentes emitidos por el vehículo. Un ejemplo de analizadores de gases es el BEA (del inglés Bosch emissions analyse, análisis de emisiones de Bosch) 950 S1 (Bosch, 2021). La figura 2.4 ilustra el analizador de gases BAE 950 S1.



Figura 2.4 BAE 950 S1 (Bosch, 2021).

- Equipos OBD (del inglés, on-board diagnostics, diagnóstico a bordo): En ciertos centros de inspección vehicular, se emplean sistemas OBD para verificar el correcto funcionamiento de los sistemas de control de emisiones de los automóviles. Estos dispositivos se conectan al puerto OBD-II del vehículo y se encargan de leer los códigos de diagnóstico del motor. Como por ejemplo el ELM (del inglés, einhornque low memory, baja memoria) 327 (Fernanda, 2014). En la figura 2.5 se muestra la configuración del ELM 327.



Figura 2.5 ELM327 (Fernanda, 2014).

En combinación con los instrumentos de medición, la tecnología de registro y control juega un papel crucial en el monitoreo y la documentación de los resultados obtenidos en el proceso de inspección vehicular, tales como:

- **Software de registro:** Los centros de inspección utilizan aplicaciones especializadas para almacenar los datos relacionados con cada vehículo sometido a verificación. Esto abarca detalles sobre las emisiones, las inspecciones visuales y mecánicas, así como el estado general del vehículo.
- **Bases de datos centrales:** Los resultados de la inspección se transmiten a bases de datos centralizadas que permiten a las autoridades supervisar y hacer cumplir las regulaciones. Este enfoque garantiza que los vehículos cumplan con los estándares requeridos en términos medioambientales y de seguridad (Verificentroscdmx, 2023).

2.8.1 Dinamómetro

Un dinamómetro es un dispositivo diseñado para cuantificar fuerzas mediante la medición de la deformación elástica de un resorte previamente calibrado. También conocido como banco dinamométrico o simplemente dinamómetro, su función principal es la absorción o disipación de la potencia generada por una máquina, permitiendo la evaluación de factores como el par torsional y la velocidad angular. La evaluación de la potencia mecánica producida por la máquina en diversas condiciones de funcionamiento está basada en el principio específico de operación del dinamómetro.

En particular, el dinamómetro de chasis se emplea en pruebas de aceleración simulada (PAS) realizadas en vehículos, y es un componente auxiliar fundamental para llevar a cabo mediciones objetivas de las emisiones vehiculares en conformidad con las pautas establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-047-SEMARNAT-2014. Esta normativa establece la necesidad de aplicar una carga de frenado al vehículo sometido a prueba con el fin de simular situaciones reales de conducción y evaluar la potencia de frenado que el dinamómetro de chasis ejerce sobre el vehículo (Mendoza, 2019).

2.8.2 Escáner automotriz

Este dispositivo de diagnóstico automotriz es una herramienta de evaluación que se conecta a través de los puertos OBD1 y OBD2. Cuando se vincula al sistema electrónico del vehículo, realiza un análisis exhaustivo de todos los componentes para detectar posibles problemas. También cuenta con la habilidad de resolver algunos inconvenientes sencillos y, en caso de que el problema sea de mayor dificultad este arroja la información necesaria para que se pueda partir de un punto de partida concreto.

Este dispositivo es utilizado tanto en autos de gasolina o diésel, siempre y cuando disponga de acceso al puerto OBD, esta conexión posibilitara la interacción con la computadora del automóvil para adquirir datos relativos al funcionamiento del motor, las bolsas de aire, la transmisión, el sistema ABS, y el sistema de aire acondicionado, entre otros componentes y tecnologías (Mendoza, 2020).

2.9 Sensores de calidad de aire

Para la medición de gases contaminantes existen distintos tipos de sensores, algunos de ellos son los sensores de bajo costo (SBC). Estos dispositivos se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones industriales y, más recientemente, en el campo de la supervisión de la calidad del aire. Una de sus principales ventajas radica en los bajos costos asociados con su funcionamiento y mantenimiento, además de su capacidad para proporcionar datos en tiempo real.

Las variables relacionadas con la calidad del aire abarcan los contaminantes criterio, que incluyen, en el caso de México, 6 de los 7 regulados. Estos son el ozono (O₃), el dióxido de azufre (SO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el monóxido de carbono (CO), y las partículas en el aire con diámetros menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM₁₀ y PM_{2.5}). La elección de los sensores para la valoración de la calidad del aire depende de conocer el rango de concentraciones requerido, ya que en el mercado se encuentran disponibles diferentes sensores con diversos rangos de concentración y sensibilidades, algunos de los cuales pueden no ser adecuados para aplicaciones de monitoreo de calidad del aire. Al utilizar los límites permitidos

establecidos por las normativas de cada país, es posible realizar una selección apropiada de sensores basada en las necesidades del análisis de la calidad del aire.

En la figura 2.6, se presentan modelos de algunos de los sensores disponibles en el mercado para los distintos análisis de gases con respecto a la calidad del aire (Navarrete, 2019).



Figura 2.6 SBC disponibles en el mercado para emisiones hacia la calidad del aire (Navarrete, 2019).

2.10 Tarjetas de desarrollo hardware

Las placas de desarrollo hardware son dispositivos que incluyen un microcontrolador que se puede reprogramar y se utiliza para ejecutar instrucciones con un propósito específico. Estas placas suelen disponer de entradas y salidas tanto analógicas como digitales, lo que permite la interacción con sensores externos mediante la electrónica digital.

En cuanto a los componentes principales que se encuentran en estas placas, se incluyen la memoria, el bus de comunicación y puertos de entrada y salida como unidades USB, Ethernet y pines de entrada. En algunos casos, estas placas también ofrecen capacidades de comunicación a través de Wi-Fi, y en situaciones más especializadas, presentan características diseñadas para facilitar su integración en sistemas relacionados con IoT e Industria 4.0 (Varela, 2018).

2.11 FPGA (del inglés, field programmable gate array, arreglo de puertas programables en campo)

Los FPGA se construyen a partir de semiconductores que incorporan una serie de bloques lógicos configurables, lo que permite ajustar parte de su funcionamiento eléctrico y su propósito. También se pueden describir los FPGA como una colección de subcircuitos digitales interconectados. Cada uno de estos subcircuitos digitales realiza tareas específicas y, al mismo tiempo, brinda una gran flexibilidad dentro del concepto de lógica o hardware programables.

Existen dos tipos de FPGA más comunes que se diferencian en la disposición interna de los bloques, así como en la tecnología de programación que emplean. Esto resulta en tres categorías principales para clasificarlos:

Arreglo simétrico: compuesto por filas y columnas de bloques lógicos interconectados, rodeados por bloques de entrada y salida.

Arquitectura de disposición en filas: Este diseño consiste en intercalar filas de bloques lógicos programables con recursos de conexión, además de bloques de entrada y salida.

Dispositivo lógico programable (PLD) de estructura jerárquica: Su estructura es más elaborada, ya que comprende un nivel superior que alberga bloques lógicos interconectados, mientras que los niveles inferiores contienen una serie de módulos lógicos, en los cuales se incluyen elementos funcionales tanto combinacionales como secuenciales (Baldi, 2021).

2.12 Microcontroladores

Un microcontrolador se define como un sistema que integra un microprocesador, memoria y otros dispositivos periféricos en un solo chip, formando un circuito integrado programable. Su principal función es ejecutar una tarea específica utilizando un programa que se encuentra almacenado en su memoria. Las interfaces de entrada y salida de un microcontrolador posibilitan la conexión de sensores y actuadores al dispositivo que se controla (Solorio, 2007).

Aunque existen diferentes controladores, estos se pueden clasificar de acuerdo con el lenguaje/estructura de la programación que soporten, también

existen micros de baja media y alta gama; como las versiones básicas de Arduino; como el uno y mega son de baja y entre los de media y alta gama está el STM32F401, por mencionar algunos (Ortiz, 2018).

Un ejemplo destacado de un microcontrolador es el Arduino, una organización de desarrollo que se basa en una placa electrónica de hardware de código abierto. Esta placa contiene un microcontrolador que puede ser reprogramado y un conjunto de pines hembra que simplifican la conexión entre el microcontrolador y diversos actuadores y sensores, especialmente a través de cables Dupont (Arduino, 2010).

2.13 Ordenadores de placa simple

Un ordenador de mono placa es un sistema completo en el que todos los elementos de función principal, como lo es el microprocesador, la memoria y todos los demás componentes principales; se encuentran contruidos u organizados en una única placa de circuito.

Las computadoras de placa única (del inglés, single board computer SBC) como la Raspberry Pi, son ordenadores completamente funcionales con todas las características esenciales, como periféricos, USB, puertos serie, etc., integrados en una única placa (Parmar, 2023).

2.14 Raspberry Pi

Este es un ordenador de bajo costo y tamaño reducido diseñado para el desarrollo, incluyendo también que es de fácil manipulación para cualquier usuario. Además, es comúnmente empleado para la creación de pequeños prototipos.

Todos los diseños de Raspberry Pi se fundamentan en hardware de código abierto y generalmente emplean sistemas operativos de código abierto basados en GNU/Linux. Específicamente para esta minicomputadora, se ha creado Raspberry Pi OS (anteriormente denominado Raspbian), que consiste en una adaptación personalizada de Debian (Sole, 2021).

2.15 Inteligencia artificial

Dentro del ámbito de la inteligencia artificial (IA), se identifican dos tipos que influyen en la sociedad. Uno de ellos es la IA débil (ANI), la cual se especializa en

realizar tareas específicas. Este tipo de IA respalda mayormente las aplicaciones de IA que utilizamos hoy en día, como Siri de Apple, Alexa de Amazon y vehículos autónomos. La designación "estrecha" puede resultar más precisa para describir este tipo de IA, ya que se limita a aplicaciones concretas.

Más sin embargo, la IA robusta incluye la inteligencia artificial general (IAG) y la súper inteligencia artificial (SIA). Esta IA general es una forma teórica de IA que se asemejaría a la inteligencia humana, siendo capaz de resolver problemas, aprender y planificar para el futuro. La súper inteligencia artificial (SIA), también conocida como súper inteligencia, superaría las capacidades e inteligencia del cerebro humano (IBM, 2023).

2.15.1 Redes neuronales

Las redes neuronales, mejor conocidas como redes neuronales artificiales (ANN) o redes neuronales simuladas (SNN), constituyen un componente fundamental en el campo del machine learning y desempeñan un papel central en los algoritmos de deep learning. Estas redes toman su nombre y estructura de la manera en que funciona el cerebro humano, emulando la comunicación entre las neuronas biológicas.

El funcionamiento de las redes neuronales implica el proceso de entrenar datos con el fin de aprender y mejorar su precisión con el tiempo. Una vez que estos algoritmos de aprendizaje se afinan de manera adecuada, se combinan con herramientas de informática e inteligencia artificial, lo que les permite clasificar y organizar datos de manera eficiente. Tareas como el reconocimiento de voz o de imágenes pueden completarse en cuestión de minutos, en contraste con el tiempo considerable que requeriría la identificación manual por parte de expertos humanos.

Un ejemplo de red neuronal es la regresión lineal, que se compone de datos de entrada, un sesgo (o umbral), ponderaciones y una salida. La ecuación 1 y 2 se asemeja a la siguiente:

$$\sum w_i x_i + b = w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + b \quad (1)$$

$$salida = f(x) = 1 \text{ if } \sum w_1 x_1 + b \leq 0; 0 \text{ if } \sum w_1 x_1 + b < 0 \quad (2)$$

Donde x representa las entradas, w el peso de los valores y b representa el umbral.

Cuando se establece una capa de entrada, se asignan valores que establecen la importancia relativa de cada variable de entrada, de manera que aquellos valores más altos influyen más en la salida en comparación con las demás entradas. Luego, se realiza la multiplicación de todas las entradas por sus respectivos valores, y se suma el resultado. La salida obtenida pasa por una función de activación que determina la salida final. Si la salida supera un umbral previamente establecido, se activa el nodo y se envían los datos a la siguiente capa de la red. Este proceso, en el cual la salida de un nodo se convierte en la entrada del siguiente, define a esta red neuronal como una red de propagación hacia adelante (IBM, 2023). En la figura 2.7 se muestra de manera ilustrativa la arquitectura ANN.

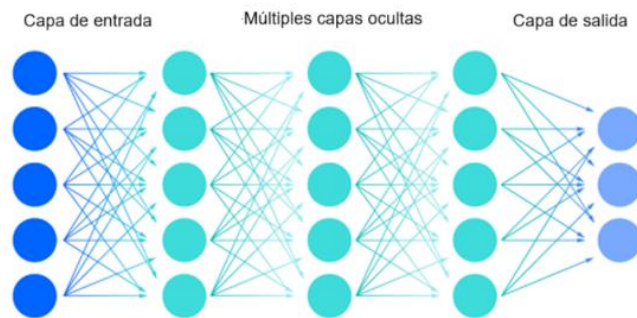


Figura 2.7 Arquitectura de la ANN (IBM, 2023).

2.15.2 Mapas autoorganizados

Un mapa de autoorganización (Self-Organizing Maps, SOM) es una técnica de aprendizaje automático no supervisado que se emplea para generar una representación en baja dimensión (usualmente en dos dimensiones) de datos que originalmente tienen una alta dimensionalidad, manteniendo la estructura topológica de los mismos. Por ejemplo, un conjunto de datos con p variables y n observaciones puede ser representado en grupos de observaciones con valores similares para esas variables. Estos grupos pueden visualizarse como un "mapa" bidimensional

donde las observaciones de grupos cercanos tienen valores más parecidos que aquellas de grupos distantes. Esto facilita la visualización y análisis de datos complejos. El propósito del aprendizaje en un mapa autoorganizado es lograr que distintas áreas de la red reaccionen de forma similar a determinados patrones de entrada. Esto está relacionado con la manera en que el cerebro humano procesa la información sensorial, como la visual o auditiva, en regiones específicas de la corteza cerebral. Para entrenar la red, es necesario proporcionarle una gran cantidad de vectores de ejemplo que representen de manera fiel los patrones de entrada esperados. Estos ejemplos se presentan varias veces durante el entrenamiento en iteraciones sucesivas.

El proceso de entrenamiento se basa en el aprendizaje competitivo. Cuando un ejemplo de entrenamiento se introduce en la red, se calcula la distancia euclidiana entre el vector de entrada y los vectores de peso de todas las neuronas. La neurona cuyo vector de peso es el más cercano al vector de entrada se denomina unidad de mejor coincidencia (BMU). Los pesos de la BMU y de las neuronas cercanas a ella en la cuadrícula SOM se ajustan hacia el vector de entrada. La magnitud de este ajuste disminuye con el tiempo y con la distancia de la BMU en la cuadrícula. La fórmula de actualización para una neurona con un vector de peso W_v (s) es:

$$W_v(s+1) = W_v(s) + \theta(u,v,s) \cdot \alpha(s) \cdot (D(t) - W_v(s)) \quad (3)$$

donde s es el índice de pasos, t es un índice en el conjunto de entrenamiento, u es el índice de la BMU, $\alpha(s)$ es un coeficiente de aprendizaje decreciente, y $\theta(u,v,s)$ es la función de vecindad que mide la distancia entre la BMU (neurona u) y la neurona v en el paso s . Dependiendo de la implementación, t puede recorrer secuencialmente el conjunto de datos, extraerse aleatoriamente (muestreo bootstrap) o seguir otros métodos de muestreo (como jackknife).

La función de vecindad $\theta(u,v,s)$, también conocida como función de interacción lateral, depende de la distancia en la cuadrícula entre la BMU y la neurona v . En su forma más simple, es 1 para las neuronas cercanas a la BMU y 0 para las demás, aunque también se usan comúnmente funciones gaussianas o de sombrero mexicano. Este proceso se repite para cada vector de entrada a lo largo

de un número considerable de ciclos λ . Como resultado, la red acaba asociando los nodos de salida con grupos o patrones presentes en el conjunto de datos de entrada. Si estos patrones pueden identificarse con nombres, dichos nombres se pueden asignar a los nodos correspondientes en la red entrenada. Durante el mapeo, habrá una única neurona ganadora, que es la neurona cuyo vector de peso esté más próximo al vector de entrada. Esto se determina calculando la distancia euclidiana entre ambos vectores (Lab, 2022).

2.16 Indicadores estadísticos

La cuantificación de los datos obtenidos en las pruebas será por medio de la estadística ya que desempeña un papel esencial en la investigación científica y en diversas disciplinas. Los indicadores estadísticos, en forma de valores numéricos, condensan y explican conjuntos de datos, mejorando la comprensión de estos y simplificando su evaluación.

Estas son cifras numéricas empleadas para condensar y caracterizar un grupo de datos. Aunque existen diversas variedades, algunos de los más usuales son:

- Media: constituye el valor medio de un conjunto de datos, calculado mediante la suma de todos los valores y su posterior división entre el número total de elementos, como se muestra en la ecuación 4.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \quad (4)$$

Donde N es la cantidad de datos total y x_i (ésimia) datos

- Valor máximo: Es el valor más alto en un conjunto de datos. Representa el punto más extremo o el valor superior del rango de los datos.
- Valor RMS (Root Mean Square): Es el valor cuadrático medio o raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores. Es una medida del valor promedio de la magnitud de los datos, útil especialmente para analizar señales que tienen fluctuaciones, como se muestra en la ecuación 5.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (5)$$

Donde x_i son los valores y n es el número total de valores

- Desviación estándar: sirve para cuantificar la dispersión de un conjunto de datos con relación a su promedio, como se muestra en la ecuación 6.

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (6)$$

Donde x_i es (ésima) datos, \bar{x} la media y N el número total de datos

- Varianza: Es la medida de la dispersión de los datos en torno a la media. Representa el promedio de los cuadrados de las diferencias entre cada valor y la media. La varianza es esencialmente el cuadrado de la desviación estándar. Como se muestra en la ecuación 7.

$$\text{Varianza} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (7)$$

donde μ es la media y x_i son los valores individuales.

- Factor forma RMS: Se utiliza como una medida estadística que proporciona una idea de la magnitud promedio de una serie de datos, independientemente de si los valores son positivos o negativos.
- Factor latitud: Funciona como un factor de ajuste o ponderación que normaliza datos para comparaciones justas entre contextos diferentes.
- Factor impulso: se relaciona con la variación acumulativa o el cambio en una tendencia a lo largo del tiempo. Se refiere a cómo ciertos eventos o intervenciones afectan el cambio acumulado de un indicador (Yorleany, 2023).

2.17 Kruskal-Wallis

La prueba de Kruskal-Wallis es un método no paramétrico, lo que implica que no requiere que los datos sigan una distribución que se describa únicamente por la media y la desviación estándar, como ocurre con la distribución normal. Al igual que muchas pruebas no paramétricas, trabaja con datos ordenados, transformando las observaciones originales en rangos: el valor más bajo obtiene el rango 1, el siguiente el rango 2, y así sucesivamente. Al reemplazar los valores originales por sus rangos.

Los pasos clave del proceso de la prueba de Kruskal-Wallis:

Hipótesis nula (H_0): Las medianas de todos los grupos son iguales (no hay diferencias significativas entre los grupos).

Hipótesis alternativa (H_1): Al menos un grupo tiene una mediana significativamente diferente.

Ordenamiento de los datos:

Se combinan los datos de todos los grupos y se ordenan de menor a mayor.

Cada valor en este conjunto combinado recibe un rango (si hay empates, se asigna un promedio de los rangos).

Suma de rangos por grupo:

Se suman los rangos para cada grupo.

Cálculo de la estadística de Kruskal-Wallis (S_{KW}): La fórmula para la estadística es:

$$S_{KW} = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^C \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N-1) \quad (8)$$

Donde:

N es el número total de observaciones.

c es el número de grupos.

R_i es la suma de los rangos para el grupo

n_i es el tamaño del grupo (McDonald, 2024)

CAPITULO III

3.METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo fue necesario establecer una metodología, en la Figura 3.2 se muestra el planteamiento general de la metodología para él la realización del sistema de monitoreo de gases y pruebas al vehículo.

Primero se desarrollará el sistema de adquisición de datos. Después se hace la selección y caracterización de sensores para posteriormente acondicionar el vehículo al que se le realizaran las pruebas, después se realizaran dichas pruebas en diferentes modos de manejo para finalmente, adquirir los datos del sistema y procesar la información mediante técnicas de aprendizaje de maquina e inteligencia artificial. En las siguientes subsecciones se describen a detalle cada uno los puntos de la metodología propuesta.

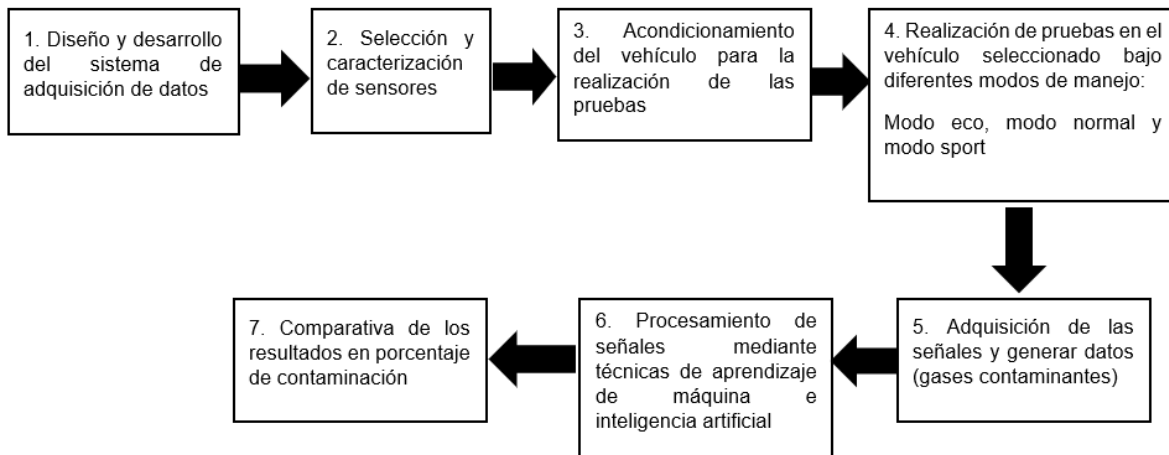


Figura 3.1 Metodología (autoría propia).

3.1. Diseño y desarrollo del sistema de adquisición de datos

En primer lugar, se inició con el diseño del sistema de adquisición de datos mediante el cual se recolectarán diferentes mediciones físicas asociadas con la medición de gases contaminantes. El sistema de adquisición de datos está conformado por cuatro componentes principales como se muestra en la Figura 3.2, en el FPGA se realizó la programación mediante lenguaje de descripción de

hardware para poder manejar y controlar al convertidor analógico digital (ADC), la memoria SRAM y al sistema de comunicación serial RS-232. El diseño del sistema de adquisición de datos no está restringido a capturar las señales de emisión de gases contaminantes, su construcción es modular y podría emplearse en la adquisición de cualquier señal de voltaje que este dentro del rango de 0V a 3.3V.

El convertidor ADC que se empleo fue el modelo ADS8343EB de Texas Instruments, dicho convertidor tiene entrada diferencial de 2 canales o de un solo extremo de 4 canales y tiene la capacidad de adquirir señales en 16 Bits con una tasa de hasta 100kHz. La memoria SRAM que se usó para almacenar los datos es una memoria RAM estática modelo IS61LV51216AL de 8 Mbits organizada en 525288 (512k) direcciones de 16 bits. Para la comunicación serial RS-232 se utilizó el convertidor TTL-USB modelo FT232 que tiene capacidad de realizar transmisiones seriales con una velocidad de 300 baudios hasta 3 Mbaudios.

Por otro lado, la descripción de código bajo lenguaje de hardware se realizó basándose en la Figura 3.3, como se puede observar se tiene un módulo RS-232 que maneja las señales de recepción (Rx) y transmisión (Tx) y mediante las cuales realizar la comunicación entre una computadora personal por medio del dispositivo TTL-USB FT232. Además, el módulo RS-232 genera una señal de comandos (Cmd) y recibe señales que indican si se realiza un proceso de escritura/lectura (E/S) en conjunto con un dato de salida (Do) a enviar por el puerto serial. Por otro lado, el módulo denominado Decodificador de comandos recibe los comandos por medio de la señal Cmd y en consecuencia habilita a una máquina de estados finitos (FSM) por medio de la señal Enb para que el proceso de recolección de datos inicie; una vez que el proceso de recolección de datos finaliza, el Decodificador de comandos recibe una señal de fin (End). Cuando la FSM es habilitada por medio de Enb, esta se encarga de enviar una señal de inicio (Str) al módulo nombrado ADC y como respuesta se recibe una señal Rdy que indica que se ha adquirido las señales analógicas; las cuatro señales analógicas adquiridas se encuentran almacenadas en la variable Di. La misma FSM se encarga de inicializar la cuenta del módulo llamado contador para generar un número de dirección (Ad) en el que las señales en Di serán almacenadas, dicha dirección Ad y dato Di son tomadas por el módulo

Memoria SRAM y se almacenan las señales. El proceso de almacenamiento realizada en función de una señal de frecuencia de muestreo F_s generada por un Timer y administrada por la FSM.

Cuando el proceso de recolección de datos se ha realizado para almacenar un número definido de datos, automáticamente la FSM reinicia en 0x00 la cuenta actual del contador por medio de la señal Clr y enseguida se extraen cada uno de los datos almacenados en la memoria por medio de la señal Do, la misma señal Do es enviada al módulo RS-232 tantas veces como datos almacenados tenga la memoria. Una vez que todos los datos Do se han transferido a una computadora portátil, la FSM envía una señal de fin (End) al decodificador de comandos y este a su vez envía una señal al RS-232 por medio de E/S para notificar que el proceso de recolección y transmisión de datos a la computadora han finalizado. En la figura 3.2 se muestra un diagrama a bloques de los componentes que constituyen el sistema de adquisición de datos; En la figura 3.3 se muestra un diagrama a bloques de los diferentes módulos programados bajo descripción de lenguaje de hardware para generar.

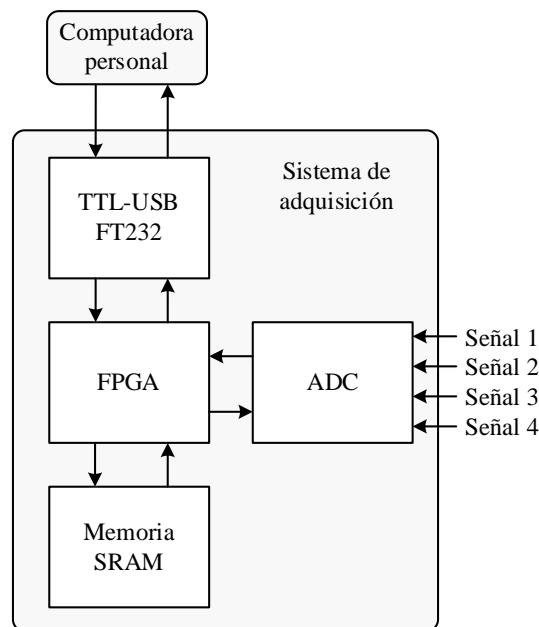


Figura 3.2 Diagrama del sistema de adquisición de datos (autoría propia).

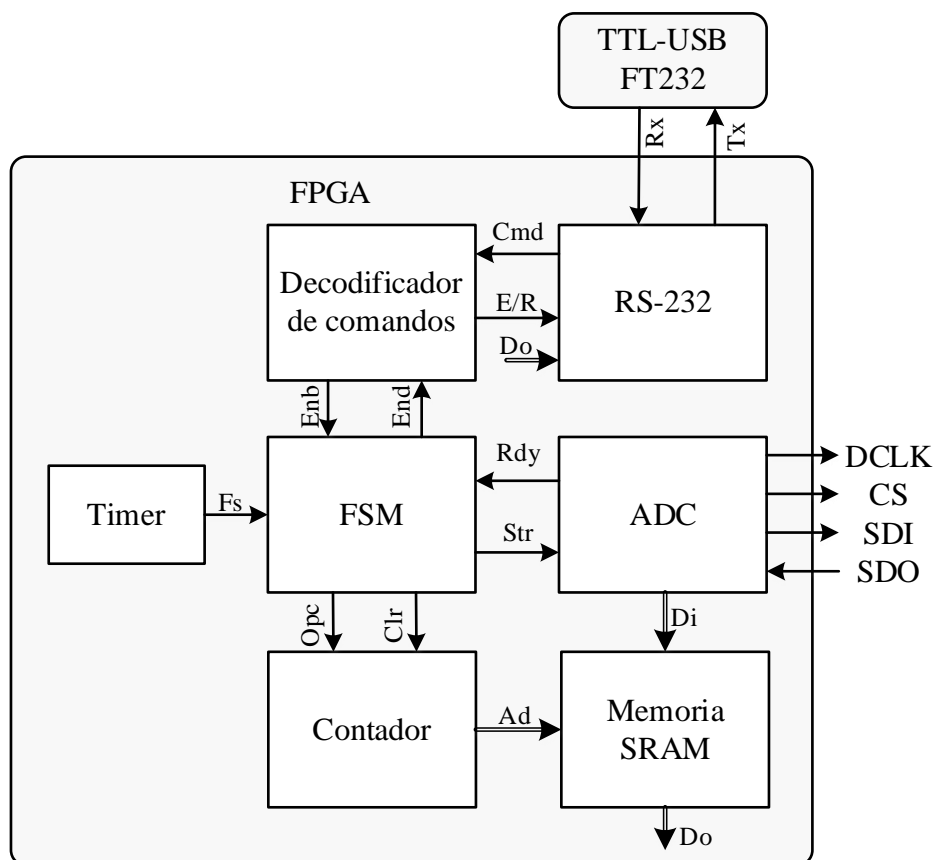
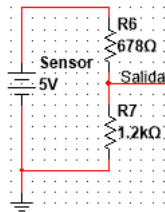
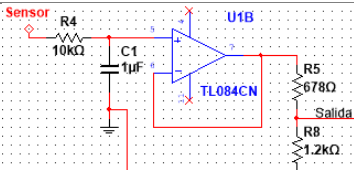
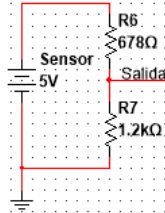
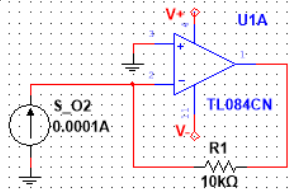


Figura 3.3 Diagrama de los diferentes módulos (autoría propia).

3.2. Selección y caracterización de los sensores

Los sensores se seleccionaron de acuerdo con los gases que regularmente mide un sistema convencional, para este caso se utilizaron los sensores de: monóxido de carbono (CO), oxígeno (O₂), dióxido de carbono (CO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Estos sensores fueron acondicionados al sistema de manera que se pueda recibir los datos de cada uno simultáneamente. Con respecto a la caracterización se utilizaron elementos de electrónica como: amplificadores operacionales, resistores entre otros, además de que se interpretaron las salidas de los sensores con ayuda de un sistema comercial (Snap-on) para comparar las lecturas de estos con las de un sistema desarrollado y así determinar una relación entre ellos para lograr obtener resultados adecuados. Esta caracterización se realizó para obtener la relación entre las concentraciones de cada uno de los gases y las salidas de los sensores. En la tabla 3.1 se muestra la descripción del acondicionamiento de los sensores.

Tabla 3.1 Descripción del acondicionamiento de los sensores

Sensor	Acondicionamiento	Esquema circuito de acondicionamiento
CO	Divisor de voltaje 0V-5V	
CO_2	Seguidor de voltaje y divisor de voltaje 0V-5V con filtro pasa bajas	
NO_x	Divisor de voltaje 0V-5V	
O_2	Convertidor de corriente a voltaje 0A-0.1mA	

Dado que la respuesta de los sensores no suele ser lineal, se llevó a cabo una caracterización con el objetivo de obtener una ecuación que relacione el porcentaje (%) y/o las partes por millón (ppm) de cada gas con la señal de voltaje registrada. Para ello, se realizaron las pruebas utilizando el equipo comercial Snap-on HHGA5C y el sistema de adquisición desarrollado.

El equipo Snap-on tiene la capacidad de guardar los resultados en un archivo de texto (txt), lo que permitió sincronizar estas mediciones con los valores de voltaje obtenidos con el sistema. A través de un software especializado, se realizó una regresión lineal o polinomial comparando los valores de voltaje registrados por el sistema, con los datos de gases proporcionados por el equipo comercial, con el fin

de establecer una relación precisa entre ambas mediciones. Para llevar a cabo la caracterización se cargaron los datos obtenidos tanto del equipo Snap-on como del sistema para ello se utilizaron las líneas 1-7 del código 1 del anexo 1.

Con la frecuencia de muestreo disponible, se generó el vector de tiempo y se convirtió la información obtenida por el sistema en valores de voltaje. Dado que los datos tienen distintas longitudes debido a las diferencias en sus frecuencias de muestreo, fue necesario seleccionar los datos a comparar y convertirlos en vectores de igual longitud. Para lograr esto, se utiliza la función "resample", que permite ajustar las longitudes de los datos de forma uniforme, esta función se en las líneas 20-22 del código 1 del anexo 1. En la figura 3.4 se muestra un diagrama de flujo para indicar los pasos del código.



Figura 3.4 Diagrama de flujo.

3.3. Acondicionamiento del vehículo para la realización de las pruebas

Se seleccionó un vehículo de motor de combustión interna que incluyera tres modos de manejo diferentes (Eco, Normal y Sport) para realizar las pruebas de emisiones. Una vez elegido el vehículo, se acondiciono un espacio adecuado para instalar el sistema que contiene los sensores encargados de medir los gases emitidos. Después de evaluar diversas opciones, se determinó que el lugar más conveniente para la ubicación del equipo era la parte trasera, ya que los asientos contienen el espacio suficiente para instalar tanto el sistema de medición como una computadora que recibiría los datos en tiempo real.

La elección de este sitio también se fundamentó en la proximidad al tubo de escape, lo cual facilitaba que la sonda de verificación alcanzara directamente a la entrada del sistema de medición. Esto permitió capturar los datos de las emisiones de manera precisa y eficiente, garantizando una recolección concreta de la información. Antes de implementar el sistema de medición de gases en el vehículo de combustión interna, fue necesaria una validación comparativa entre los gases medidos por el equipo comercial y los registrados por el sistema diseñado.

El sistema se conectó mediante una fuente de alimentación dual de $\pm 5V$, la cual alimenta el amplificador operacional (op-amp) instalado en la placa de adquisición de gases, y una fuente de 5V DC para los sensores. Las salidas analógicas de cada sensor se conectaron directamente a los pines del ADC del sistema del apartado 3.2.

La conexión para obtener los gases al sistema de medición se utilizó una sonda hacia la entrada de este. Esta sonda se conectó a una bomba de vacío, que facilita la succión de las emisiones. En la figura 3.5 se muestra un diagrama del acondicionamiento para la medición de gases.

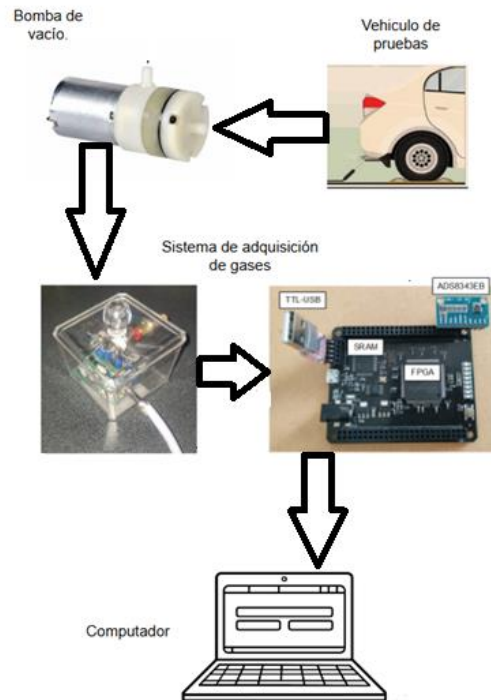


Figura 3.5 Diagrama de acondicionamiento

3.4. Realización de pruebas en el vehículo seleccionado bajo diferentes modos de manejo

Para la realización de las pruebas se utilizó un vehículo sedan modelo 2024 el cual cuenta con un kilometraje de 11369. Tomando en cuenta una matriz de experimentación en dos distintos escenarios; prueba dinámica y prueba estática. Cada prueba consto de dos etapas para cada modo de manejo.

Modo normal:

Para las pruebas dinámicas, el sistema se puso a bordo en la parte trasera del vehículo, este se condujo por una ruta creada en el estacionamiento del campus san juan del rio de la universidad autónoma de Querétaro, se condujo un total de 30 minutos repitiendo la ruta hasta agotar el tiempo de la prueba. Para esta prueba se encendió el vehículo y se dejó de esa manera hasta llegar a la temperatura optima de funcionamiento, después de ellos se colocó en el modo normal y se inició la prueba.

La prueba estática se realizó en el laboratorio automotriz de la facultad de ingeniería, en la cual se utilizó el elevador que se encuentra en el mismo, este fue

utilizado para levantar el vehículo a una distancia en donde los neumáticos no tocaran el suelo para lograr mantener una velocidad y revoluciones constantes, en la primera etapa de esta prueba el vehículo fue puesto en modo normal y se mantuvo a una velocidad de 30 kilómetros por hora (km/h) a 1500 revoluciones por minuto (rpm) durante 30 minutos. La segunda etapa se realizó la recolección de datos con una velocidad de 50 km/h a 2000 rpm

Modo eco:

Al finalizar las pruebas en ruta con el modo normal, se reinició la prueba, pero ahora activando el modo de manejo eco del vehículo en cuestión, las pruebas se realizaron durante el mismo tiempo y la misma ruta que con el modo normal para así obtener datos con mayor veracidad. Las pruebas estáticas cuando se terminó la prueba del modo normal se cambiaron al modo eco y se repitieron ambas etapas de las pruebas a la misma velocidad y mismos rpm.

Modo sport:

Para terminar las pruebas se condujo de nueva cuenta el vehículo por la misma ruta y durante el mismo tiempo que los modos anteriores, pero ahora utilizando el modo de manejo sport. La última prueba estática al terminó la prueba del modo eco, se cambió al modo sport y se repitieron ambas etapas de las pruebas a la misma velocidad y mismos rpm.

Para visualizar de mejor manera la matriz de experimentación en la tabla 5 se muestra de manera más breve.

Tabla 3.2 Matriz de experimentación

Prueba			
	Eco 30 minutos	Normal 30 minutos	Sport 30 minutos
Estática	1. 30 km/h 1500 rpm		
	2. 50 km/h 2000rpm		
Dinámica	Recorrido por el estacionamiento del campus San Juan del Rio en un rango de 5-50 km/h.		

La velocidad y las revoluciones por minuto para la prueba estática se establecieron siguiendo recomendaciones de los fabricantes de vehículos sobre los puntos óptimos para cambiar de marcha. En los motores de gasolina, se recomienda realizar el cambio ascendente entre los 2,000 y 2,500 rpm. Para cambios descendentes, las revoluciones mínimas recomendadas antes de efectuar el cambio son de 1,500 rpm.

3.5. Adquisición de las señales y generar datos (gases contaminantes)

Para las diferentes pruebas se realizó la adquisición de datos con la finalidad de generar una base de datos la cual se almaceno en una PC para poder analizarlos. Durante la fase experimental, se recopilaron mediciones con el objetivo de cuantificar la generación de gases contaminantes como CO, CO₂, NO_x y O₂. En dicha adquisición se utilizó una tarjeta de procesamiento junto con un software con el cual se leyeron e interpretaron los datos adquiridos por cada uno de los sensores, Estas señales fueron registradas durante un periodo de 30 minutos con un total de 900,000 puntos obtenidos a una frecuencia de muestreo de 500 Hz, utilizando el sistema de la sección 3.2. Los datos se almacenaron en un archivo TXT donde se registraron los valores obtenidos de cada sensor.

3.6. Procesamiento de señales mediante técnicas de aprendizaje de maquina e inteligencia artificial

El procesamiento de señales es una etapa en la que los datos adquiridos se someten a un proceso para obtener información relevante. Existen diversas técnicas que pueden utilizarse, pero en general se dividen en tres categorías: procesamiento en el dominio del tiempo, de la frecuencia y tiempo-frecuencia. Para ello, las señales obtenidas de las emisiones contaminantes fueron procesadas únicamente mediante técnicas en el dominio del tiempo. Se calcularon 8 indicadores estadísticos: media, valor máximo, RMS, desviación estándar, varianza, factor RMS, factor latitud y factor impulso. Estos indicadores permitieron describir tendencias, asimetrías y desviaciones presentes en las señales.

El cálculo de los indicadores estadísticos se realizó para cada una de las señales adquiridas (CO, CO₂, O₂, Nox), utilizando los n puntos muestreados de

cada señal. Si S representa una de las señales y está compuesta por n muestras, se divide S en m partes iguales, donde cada segmento contiene $L = n/m$ puntos (muestras). La segmentación de S en función de n y L se realiza siguiendo la Ecuación 9.

$$S_i = [S_1^{1:L}, S_2^{L+1:2L}, S_3^{2L+1:3L}, \dots, S_m^{(m-1)L+1:n}] \quad (9)$$

De este modo, se definen un total de 8 características estadísticas por cada señal del sensor.

El resultado de segmentar los datos con los 8 indicadores nos da una matriz que representa cada una de las señales adquiridas. Es importante destacar que el cálculo de estos indicadores se realiza de manera individual para las señales de cada una de las pruebas de emisiones. En la figura 3.6 se muestra una representación de la señal para obtener el conjunto de los 8 indicadores estadísticos del dominio del tiempo.

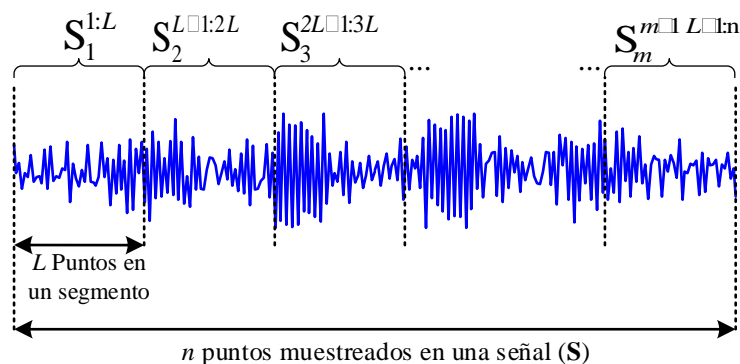


Figura 3.6 Segmentación de señales

Con la información obtenida con base a los indicadores, se llevó a cabo un análisis de las propiedades discriminantes de dichos indicadores. Para esto se empleó la prueba de Kruskal-Wallis (KW), una técnica no paramétrica que permite analizar datos sin requerir un seguimiento hacia una distribución específica. Aunque los datos no están organizados de manera normal, la prueba KW evalúa si un conjunto de datos proviene de la misma población.

La prueba KW es similar al ANOVA (Análisis de Varianza), pero en lugar de usar datos continuos, utiliza categorías o clases diferentes. Además, bajo la hipótesis nula, se asume que los datos provienen de la misma distribución. La implementación de esta prueba en el presente trabajo permito identificar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las distintas pruebas de manejo realizadas. Así, para clases C con n muestras por categoría, la prueba se realiza de la siguiente forma:

- Se organizan todas las muestras (N) de todas las clases o categorías C en orden ascendente, asignándoles un rango, sin tener en cuenta a qué clase pertenecen.
- Se calcula la suma de los rangos R_i correspondientes a cada clase, donde cada clase tiene n_i muestras.
- Se determina el estadístico Kruskal-Wallis (S_{KW}) utilizando la ecuación 10.

$$S_{KW} = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^C \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N-1) \quad (10)$$

- Se determina los valores de S_KW obtenidos para todas las clases C mediante la prueba de Chi-cuadrado (χ^2). Los valores de S_KW se consideran estadísticamente significativos si S_KW es igual o mayor que el valor crítico de χ^2 .

Tras realizar la prueba de Kruskal-Wallis, también se calculó el valor p como una medida cuantitativa para evaluar si las diferencias entre las medianas. Se considera que las diferencias son significativas cuando el valor p es inferior a un umbral predefinido.

3.7. Comparativa de los resultados en porcentaje de contaminación

La comparación de los datos obtenidos de los sensores se realizó utilizando Mapas Autoorganizados (SOM), una herramienta de inteligencia artificial que agrupa los datos en distintas regiones de un mapa, basándose en sus similitudes. A medida que avanzó el proceso de entrenamiento, el SOM se autoorganizó. Las neuronas cercanas entre sí en el mapa comenzaron a responder a entradas

similares. Esto permitió la formación de agrupaciones (cluster) de datos en la cuadrícula del SOM, reflejando relaciones y patrones presentes en los datos originales. El SOM proporciona una representación visual en la que cada punto en la cuadrícula representa una neurona, y los valores de las emisiones similares están ubicadas juntas, lo que facilita ver las relaciones y patrones dentro de los datos. El error de cuantización permitió realizar una comparación más precisa de los datos obtenidos, ya que este error representa la diferencia entre el vector de entrada y el vector de la neurona que más se aproxima a dicho dato. Al generar las gráficas correspondientes, fue posible compararlas con las obtenidas de los sensores, lo que facilitó la evaluación. Esta herramienta resultó fundamental para analizar el comportamiento de cada modo de manejo en las diferentes pruebas realizadas.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras el desarrollo del proyecto de tesis propuesto, organizados según el orden metodológico. En primer lugar, se construyó el sistema de adquisición de datos utilizando una FPGA, memoria SRAM, un convertidor ADC y un módulo USB-TTL. Posteriormente, se caracterizaron los sensores para asegurar la correcta detección de las emisiones contaminantes, permitiendo su recepción por el sistema de adquisición. Después, se equipó el vehículo con una sonda de verificación. A continuación, se llevaron a cabo pruebas basadas en la matriz de pruebas establecida en la metodología, recopilando las señales de emisiones de cada modo para su posterior análisis mediante inteligencia artificial.

4.1. Diseño y desarrollo del sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos se construyó mediante la integración de diferentes componentes, entre ellos están el FPGA (SAPRTAN 6-XC6SLX9), la memoria SRAM (IS61LV51216AL), el ADC (ADS8343EB) y el módulo de comunicación USB-TTL (FT232); en la Figura 4.1 se muestra una imagen real del sistema de adquisición de datos. El FPGA fue programado mediante lenguaje de descripción de hardware (HDL) con el objetivo de controlar los diferentes procesos que aseguran la correcta adquisición de señales analógicas y su envío hacia una computadora personal. Dicho sistema de adquisición de datos tiene la capacidad de adquirir 4 señales analógicas de forma simultánea con una frecuencia de muestreo de hasta 10 kHz, aunque el FPGA puede adquirir señales a una velocidad mayor se ha limitado a 10 kHz debido a un filtro anti-aliasing. La memoria SRAM puede almacenar hasta 512k muestras de 16 bits, en caso de sobrepasar el límite de direcciones para la escritura de datos la información anteriormente almacenada será sobrescrita con la información actual. Respecto al módulo de transmisión de datos, el TTL-USB puede operar bajo diferentes velocidades de transmisión, pero se sugiere realizar el envío y recepción de datos con una velocidad máxima de 115200 Baudios.

Finalmente, debe resaltarse que el diseño del sistema de adquisición de datos no fue diseñado únicamente para la adquisición de señales de emisión contaminante y podría usarse para adquirir otro tipo de señales siempre y cuando estén dentro del rango de 0V a 3.3V. Para la adquisición de señales de emisión contaminante se empleó una frecuencia de muestreo de 500 Hz debido a que los cambios que presentan los gases CO, CO₂, NO_x y O₂ son de baja inercia, lo que quiere decir que no presentaran cambios abruptos en instantes de tiempo muy cortos.

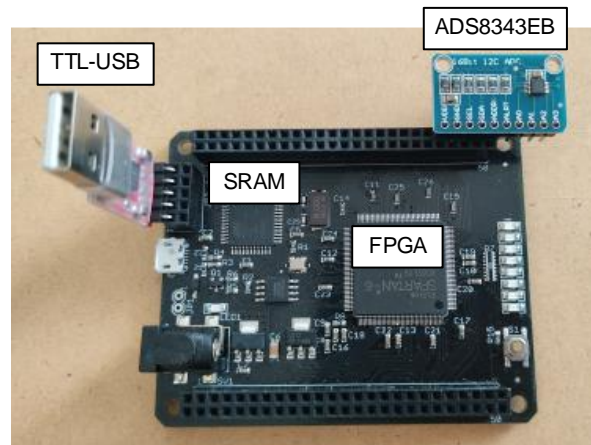


Figura 4.1 Sistema de adquisición empleado para la recolección de señales de emisión de gas contaminante.

Los componentes fueron elegidos por las siguientes características: FPGA por su alto rendimiento ya que pueden ejecutar múltiples tareas en paralelo, lo cual es ideal para aplicaciones de procesamiento intensivo, como procesamiento de imágenes, señales y algoritmos de inteligencia artificial. La SRAM tiene buena velocidad de acceso esta es más rápida que otros tipos de memoria como la DRAM, ya que no necesita ser refrescada continuamente. Esto la hace ideal para aplicaciones que requieren acceso rápido y constante a los datos. El USB- TTL contiene una interfaz sencilla para comunicación serial, simplifican la comunicación entre dispositivos con un puerto USB y sistemas que utilizan UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), permitiendo el intercambio de datos a través de una interfaz estándar, además de contar con buena compatibilidad con microcontroladores y sistemas embebidos.

Debe resaltarse que el diseño del sistema de adquisición de datos no fue diseñado únicamente para la adquisición de señales de emisión contaminante y podría usarse para adquirir otro tipo de señales siempre y cuando estén dentro del rango de 0V a 3.3V. Para la adquisición de señales de emisión contaminante se empleó una frecuencia de muestreo de 500 Hz debido a que los cambios que presentan los gases CO, CO₂, NO_x y O₂ son de baja inercia, lo que quiere decir que no presentaran cambios abruptos en instantes de tiempo muy cortos.

4.2. Selección y caracterización de los sensores

Se seleccionaron los sensores mostrados en la tabla 4.1 ya que estos modelos permiten un rango adecuado de medición en las partes por millón y el porcentaje de volumen para percibir las emisiones contaminantes del vehículo, además de que son sensores comerciales y de fácil acceso.

Tabla 4.1 Características de los sensores.

Sensor	Característica	Rango de medición Partes por millón (ppm)
1) MQ-7	Permite medir gas de Monóxido de Carbono (CO).	20 ppm a 2000 ppm
2) CO ₂ MG-811	Permite medir gas de Monóxido de Carbono (CO).	350 a 100000pm
3) MQ-135	Detector de Calidad de Aire	10 ppm a 1000 ppm
4) 40XV AAY80-390	Sensor de oxígeno	1-25% vol. O ₂

Los sensores fueron instalados en una placa fenólica y alimentados con una fuente de 5 volts para su funcionamiento como se muestra en la figura 4.2. Con la ayuda de un osciloscopio, se registraron las variaciones en sus mediciones, lo que permitió confirmar su correcto funcionamiento. Tras ser configurados para detectar

emisiones, los sensores pueden ser utilizados en otros motores al conectar la sonda de verificación al sistema de escape de cualquier vehículo.

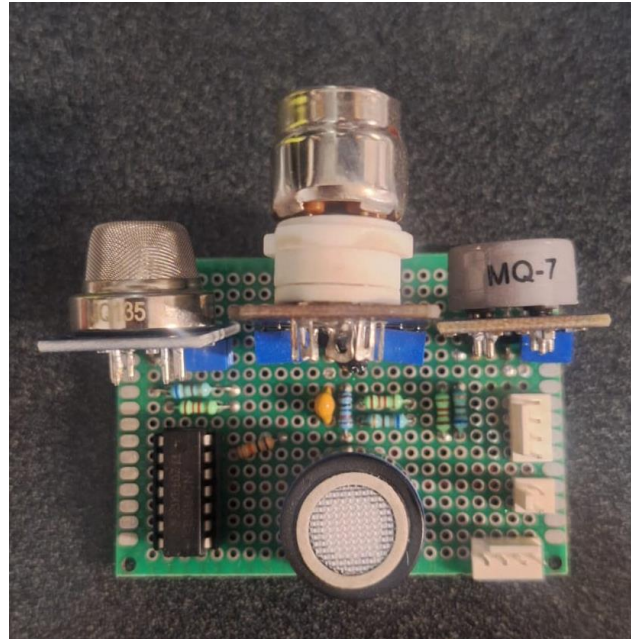


Figura 4.2 Circuito del sistema de medición de gases.

Durante el proceso de calibración, se recopilaron varios datos que permitieron comparar las salidas de los sensores con los resultados obtenidos mediante el equipo Snap-on. A medida que se obtenían más datos, la precisión de las lecturas mejoraba. Tanto las mediciones de los sensores como las lecturas del medidor fueron registradas, lo que facilitó la comparación y permitió formular una ecuación para interpretar los valores de voltaje.

Se determinó que la ecuación característica más eficaz para el sensor de monóxido de carbono es una ecuación polinómica de primer grado, que se expresa

como $f(x) = 2.231x + 0.1051$, siendo x la señal de voltaje generada por el sensor. La figura 4.3 muestra el grafico de la ecuación.

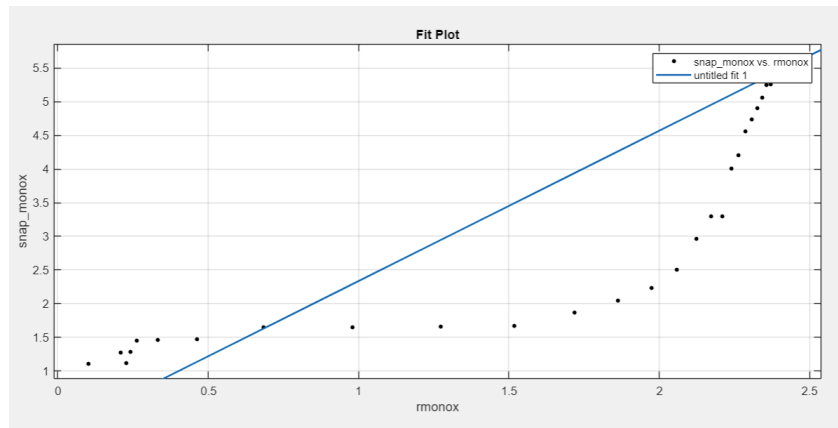


Figura 4.3 Grafico de la ecuación para el CO

Para el sensor de dióxido de carbono, se identificó una función que se ajusta más precisamente a los puntos, resultando en una ecuación polinómica de tercer grado: $f(x) = -10.42x^3 + 28.52x^2 - 25.32x + 16.58$. La figura 4.4 muestra el grafico de la ecuación.

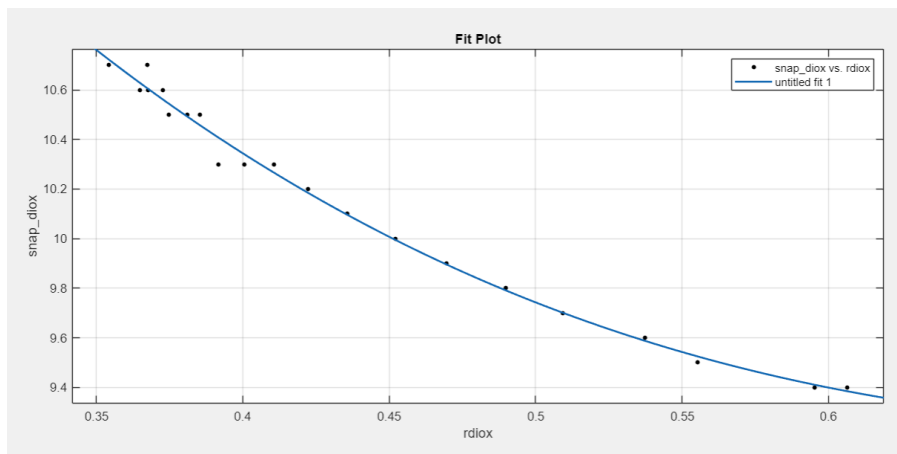


Figura 4.4 Gráfico de la ecuación para el CO2.

En el caso del sensor de oxígeno, los puntos presentan una menor dispersión y una tendencia más lineal, lo cual se refleja en la ecuación de primer grado, que se

expresa como $f(x) = 21.18x - 1.007$. La figura 4.5 muestra el gráfico de la ecuación.

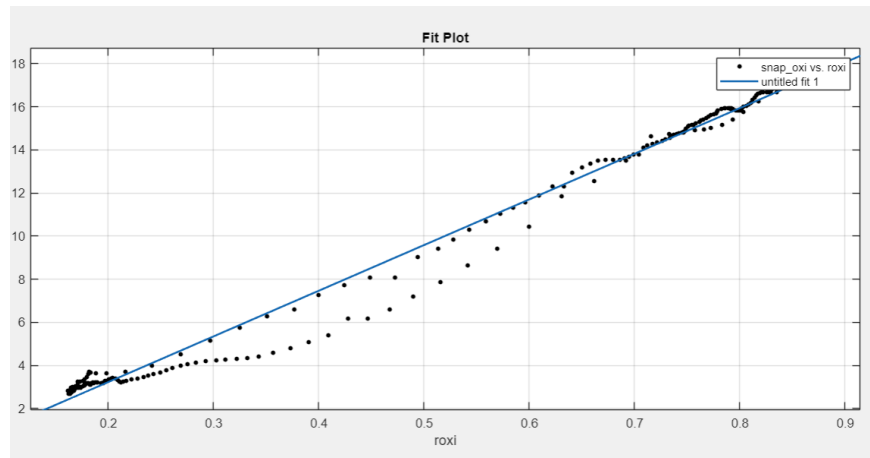


Figura 4.5 Gráfico de la ecuación para el O2.

El sensor de óxidos de nitrógeno, al detectar otros tipos de gases, se obtiene un comportamiento algo peculiar, con puntos dispersos en dos valores específicos. A pesar de esto, es posible identificar una ecuación que se ajuste lo más posible a esos puntos, la cual es de segundo grado y se expresa como $f(x) = 3.577x^2 - 14.43x + 14.57$. La figura 4.6 muestra el gráfico de la ecuación.

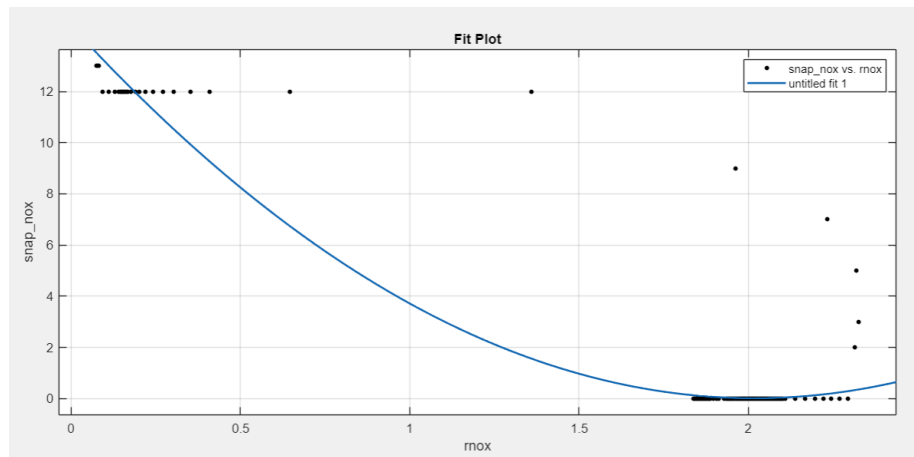


Figura 4.6 Gráfico de la ecuación para el NOx.

La tabla 4.2 muestra en conjunto las ecuaciones utilizadas para la calibración de los sensores.

Tabla 4.2 Ecuaciones para la caracterización de los sensores

Sensor	Ecuación obtenida
CO	$f(x) = 2.231x + 0.1051$ (8)
CO2	$f(x) = -10.42x^3 + 28.52x^2 - 25.32x + 16.58$ (9)
O2	$f(x) = 21.18x - 1.007$. (10)
NOx	$f(x) = 3.577x^2 - 14.43x + 14.57$ (11)

4.3. Acondicionamiento del vehículo para la realización de las pruebas

El vehículo utilizado para las pruebas fue un vehículo sedan modelo 2024 el cual utiliza gasolina de 92 octanos, cuenta con un motor de 4 cilindros de 2 litros, de transmisión automática. el sistema que contiene los sensores fue puesto dentro de una caja de acrílico esto con el fin de mantener los gases recibidos por la sonda, y que fueran recibidos de la mejor manera posible por los sensores como se observa en la figura 4.7.

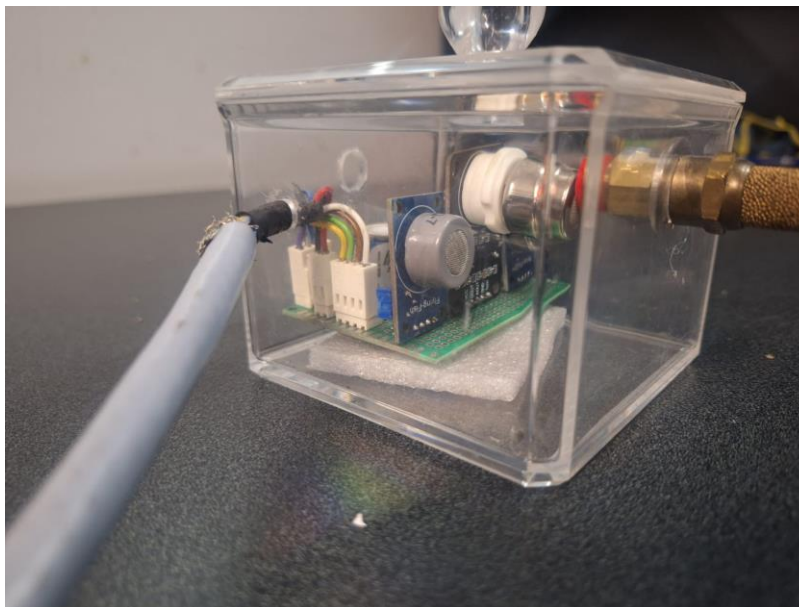


Figura 4.7 Sistema de medición de gases.

Con base a la metodología se acondiciono adecuadamente el vehículo para que el sistema pudiera recibir la información correspondiente como se muestra en

las figura 4.8 en donde se puede apreciar que este se encuentra en la parte trasera del vehículo, en un lugar donde se mueva lo menos posible para no interferir con los gases percibidos, de frente se tiene la entrada de la sonda de verificación, mientras que del lado derecho se encuentra la salida de la información de los sensores hacia el sistema inteligente y la figura 4.9 muestra la sonda conectada directamente al escape del vehículo.



Figura 4.8 Sistema abordo del vehículo.



Figura 4.9 Sonda de verificación.

4.4. Realización de las pruebas en el vehículo seleccionado bajo diferentes modos de manejo

La realización de los experimentos se llevó a cabo de acuerdo con lo anteriormente descrito en la Sección 3.4, en este sentido, se realizaron cada una de las pruebas de la matriz de experimentos de la Tabla 3.2 por un periodo de tiempo de 30 minutos. Así, la primera prueba fue efectuada con una velocidad de 30 km/h mientras que la segunda prueba se realizó a 50 km/h. Para cada una de estas velocidades, el vehículo desarrolló aproximadamente 1500 rpm y 2000 rpm en el motor de combustión, respectivamente. Además, para cada prueba, el vehículo opero en la tercera marcha y cuarta marcha como se muestra en la figura 4.10 y 4.11.



Figura 4.10 Prueba a 30 km/h.



Figura 4.11 Prueba a 50 km/h.

En la figura 4.12 se puede apreciar la manera en la que quedo instalado el vehículo para la realización de las pruebas, como indica la metodología se levanto despegando del piso con ayuda del elevador del laboratorio automotriz, esto con el fin de que el vehículo se mantuviera a una velocidad y revoluciones constante durante la duración de la prueba.



Figura 4.12 Prueba estática.

Enseguida, siguiendo la matriz de experimentos se continuo con la realización de la prueba dinámica en una ruta repetida en el estacionamiento del campus ya que, la prueba tenía una duración de 30 minutos, se recorrieron un total de 4 vueltas siguiendo la ruta mostrada en la figura 4.13 habiendo recorrido un total de 3760 metros aproximadamente. esto con el fin de recabar la mayor información

posible; La figura 4.14 es una ilustración demostrativa del vehículo durante la prueba dinámica.

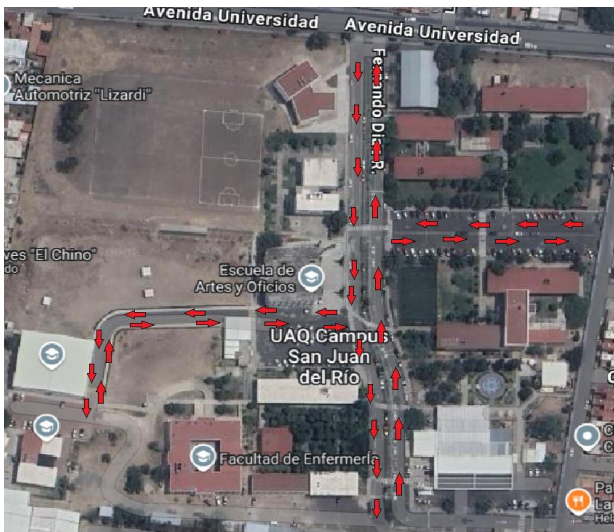


Figura 4.13 Circuito de prueba.

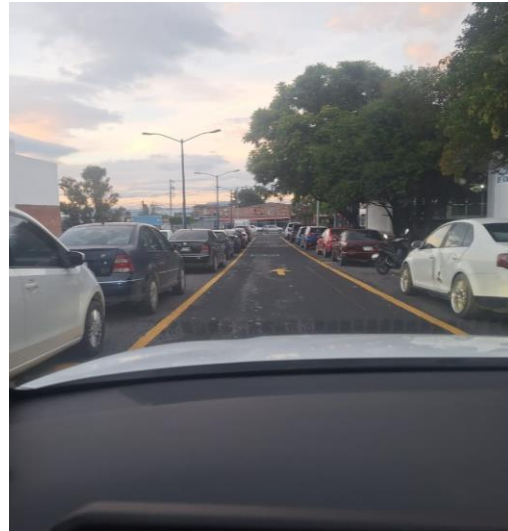


Figura 4.14 Prueba dinámica.

4.5. Procesamiento de señales mediante técnicas de aprendizaje de maquina e inteligencia artificial

Siguiendo la metodología se obtuvieron las señales de cada uno de los sensores del sistema como se muestra en la figura 4.15.

CO	CO2	O2	NO
0.03	0.9	3.61	7
0.03	1.5	2.53	7
0.03	2.3	1.87	6
0.03	3	1.52	6
0.03	4.4	1.23	6
0.03	5.4	1.08	5
0.03	6.6	0.98	5
0.03	7.8	0.92	5
0.02	8.8	0.86	5
0.02	9.7	0.77	4
0.02	10.4	0.67	4
0.02	10.9	0.57	4
0.01	11.5	0.47	3
0.01	11.9	0.4	3
0.01	12.1	0.35	3
0.01	12.4	0.32	3
0.01	12.6	0.29	3
0.01	12.7	0.28	2
0.01	12.9	0.27	2
0.01	13	0.25	2

Figura 4.15 Datos recibidos de los sensores.

Estos datos fueron recibidos y almacenados correctamente obteniendo un total de 900,000 muestras, para posteriormente procesarlas mediante inteligencia artificial. Como se describió en la metodología, se llevó a cabo un análisis de las señales obtenidas mediante el cálculo de indicadores estadísticos enfocados en el procesamiento de señales en el dominio del tiempo. Las señales fueron segmentadas utilizando la Ecuación 6 y sobre cada segmento se calcularon ocho indicadores principales: media, valor máximo, valor mínimo, valor RMS, desviación estándar, kurtosis, varianza y skewness. Las señales adquiridas contenían 900,000 puntos, ya que se tomaron con una frecuencia de muestreo de 500 Hz durante 30 minutos. Por lo tanto, los indicadores estadísticos fueron calculados en 120 segmentos.

Después de calcular estos indicadores para cada experimento y señal, se obtuvo una matriz de 120 filas y 8 columnas, lo que permite generar un conjunto de muestras consecutivas que caracterizan las señales adquiridas. Posteriormente, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis (KW) a cada uno de los indicadores estadísticos para los tres modos de manejo. Los resultados, presentados en diagramas de caja,

muestran la media de las observaciones analizadas, donde la separación vertical entre las medias indica diferencias entre los tres modos de manejo (Eco, Normal y Sport). Antes de mostrar el resultado aplicando los indicadores estadísticos la figura 4.16 muestra la gráfica del comportamiento de los gases obtenidos con los sensores. Se empieza con la prueba estática a 30 km/h.

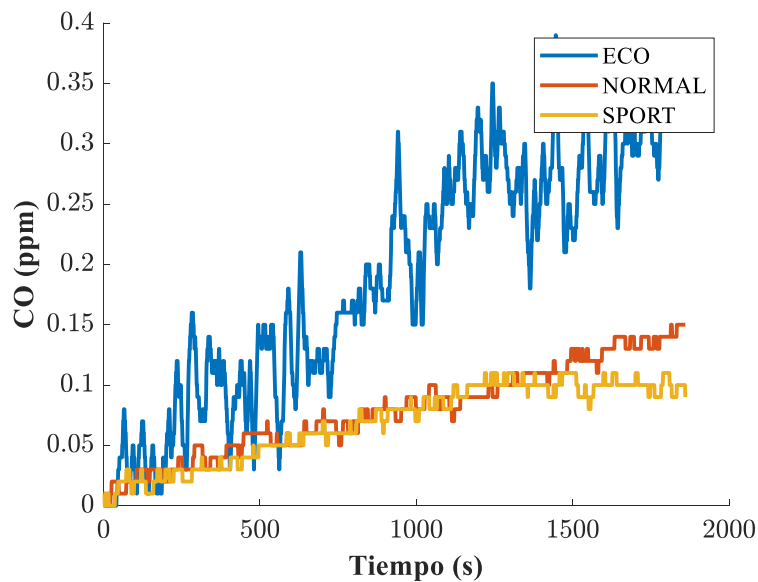


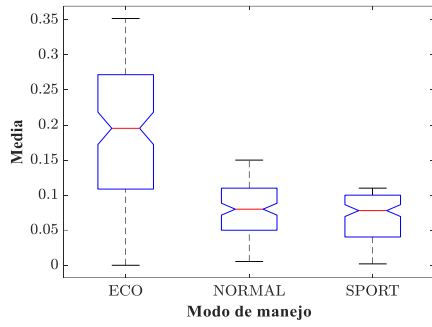
Figura 4.16 Gases de CO en prueba estática (30km/h).

En la figura 4.16 se puede observar algunos cambios en el CO con respecto a los modos de manejo, teniendo como resultado el modo eco con mayor presencia de este.

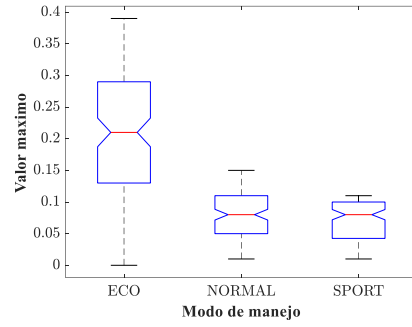
Para la señal de CO, se concluyó que la media (figura 4.17a), el valor máximo (figura 4.17b), el valor RMS (figura 4.17c) y desviación estándar (figura 4.17d) son buenos indicadores para diferenciar las variaciones en la generación de CO según el modo de manejo, mientras que los no mencionados no son tan adecuados para este propósito. La separación vertical de las medias en los diagramas de caja sugiere la existencia de diferentes grupos o categorías.

(a)

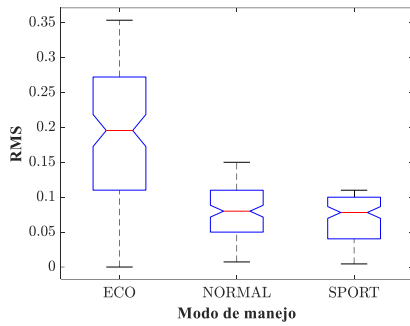
(b)



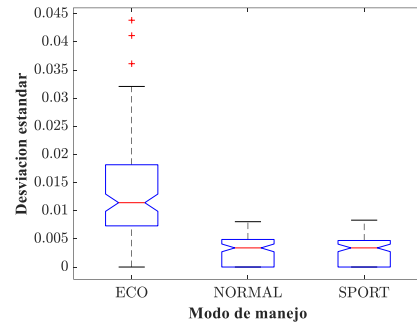
(c)



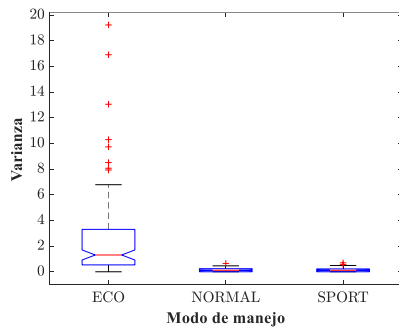
(d)



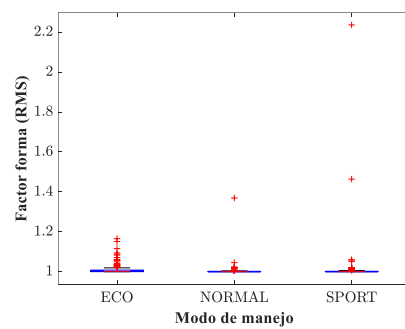
(e)



(f)



(g)



(h)

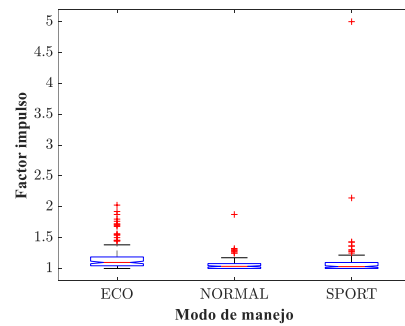
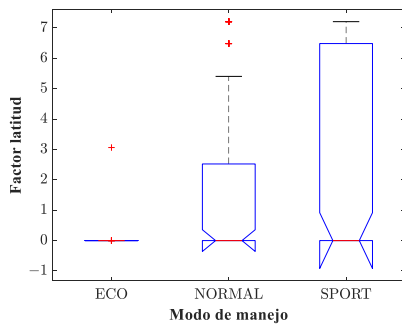


Figura 4.17 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de CO. (a) media, (b) valor máximo, (c)

RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso.

Para el CO₂ también se puede apreciar en la figura 4.18 que en el modo eco este gas se encuentra por encima de los demás modos de manejo.

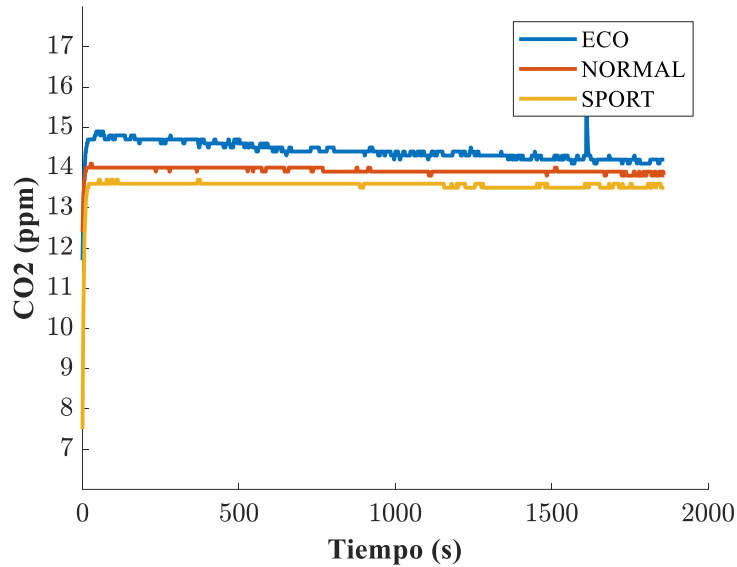
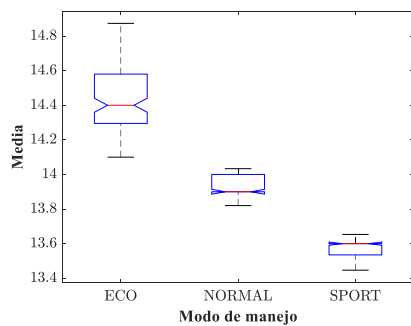


Figura 4.18 Gases de CO₂ en prueba estática (30km/h).

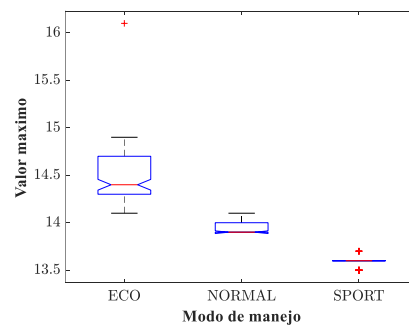
En la figura 4.19 de (a)-(h) se presentan los diagramas de caja generados por la prueba de Kruskal-Wallis (KW) para los 8 indicadores estadísticos calculados de las señales de CO₂. Como se puede observar, tienen un comportamiento similar al CO manteniendo los mismos indicadores que contienen información contundente.

(a)

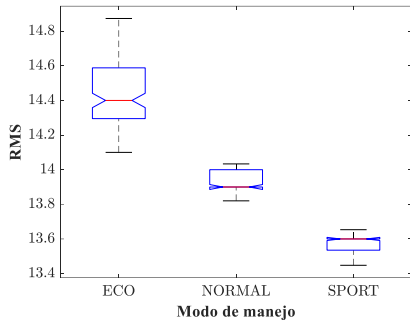


(c)

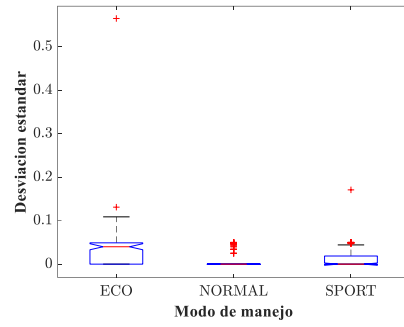
(b)



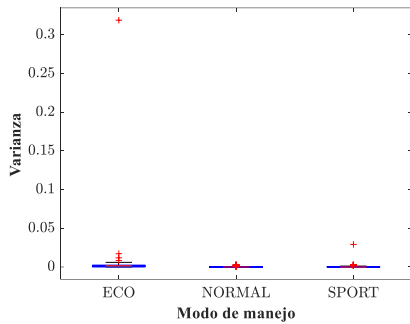
(d)



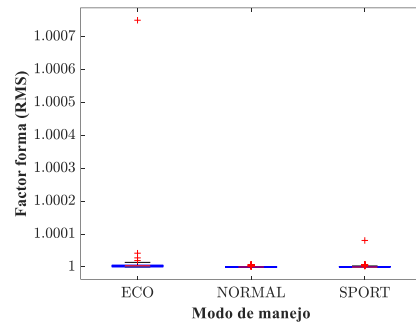
(e)



(f)



(g)



(h)

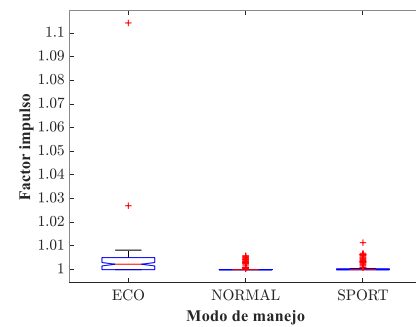
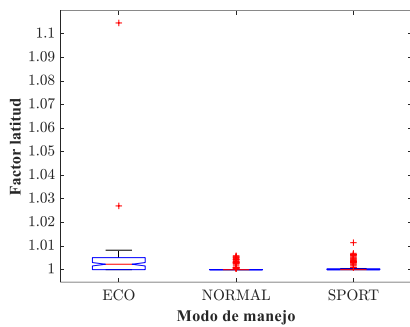


Figura 4.19 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de CO₂. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso.

La figura 4.20 muestra el comportamiento del oxígeno, en donde al iniciar la prueba estos valores se encontraban en niveles muy altos, pero después de un tiempo transcurrido estos valores comenzaron a reducirse manteniéndose estables, aunque se puede apreciar que los valores se encuentran en valores mínimos y con respecto a los modos de manejo no presentan cambios significativos.

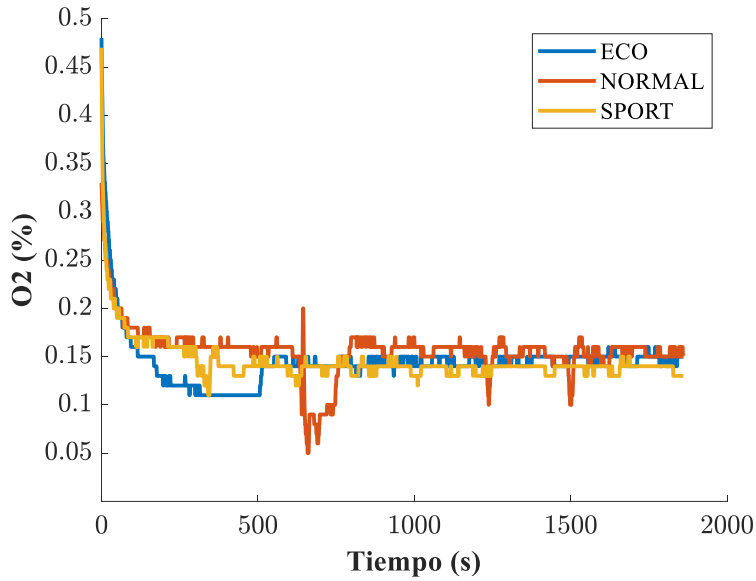
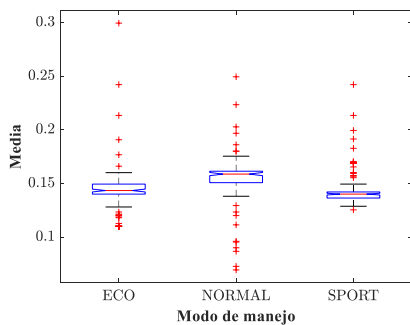


Figura 4.20 Gases de O2 en prueba estática (30km/h).

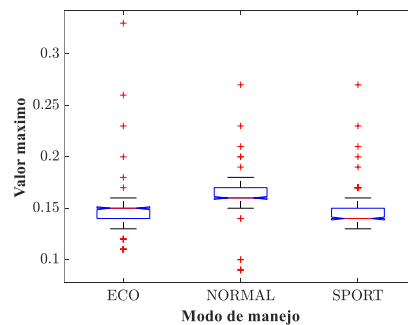
Para la señal de O2, los indicadores estadísticos calculados no muestran separación entre las medias en los diagramas de caja. Esta falta de separación sugiere que los ocho indicadores estadísticos no son suficientemente relevantes para señalar anomalías en la generación de O2 al usar diferentes modos de manejo.

La figura 4.21 muestran el comportamiento aplicando KW a los datos

(a)



(b)



(c)

(d)

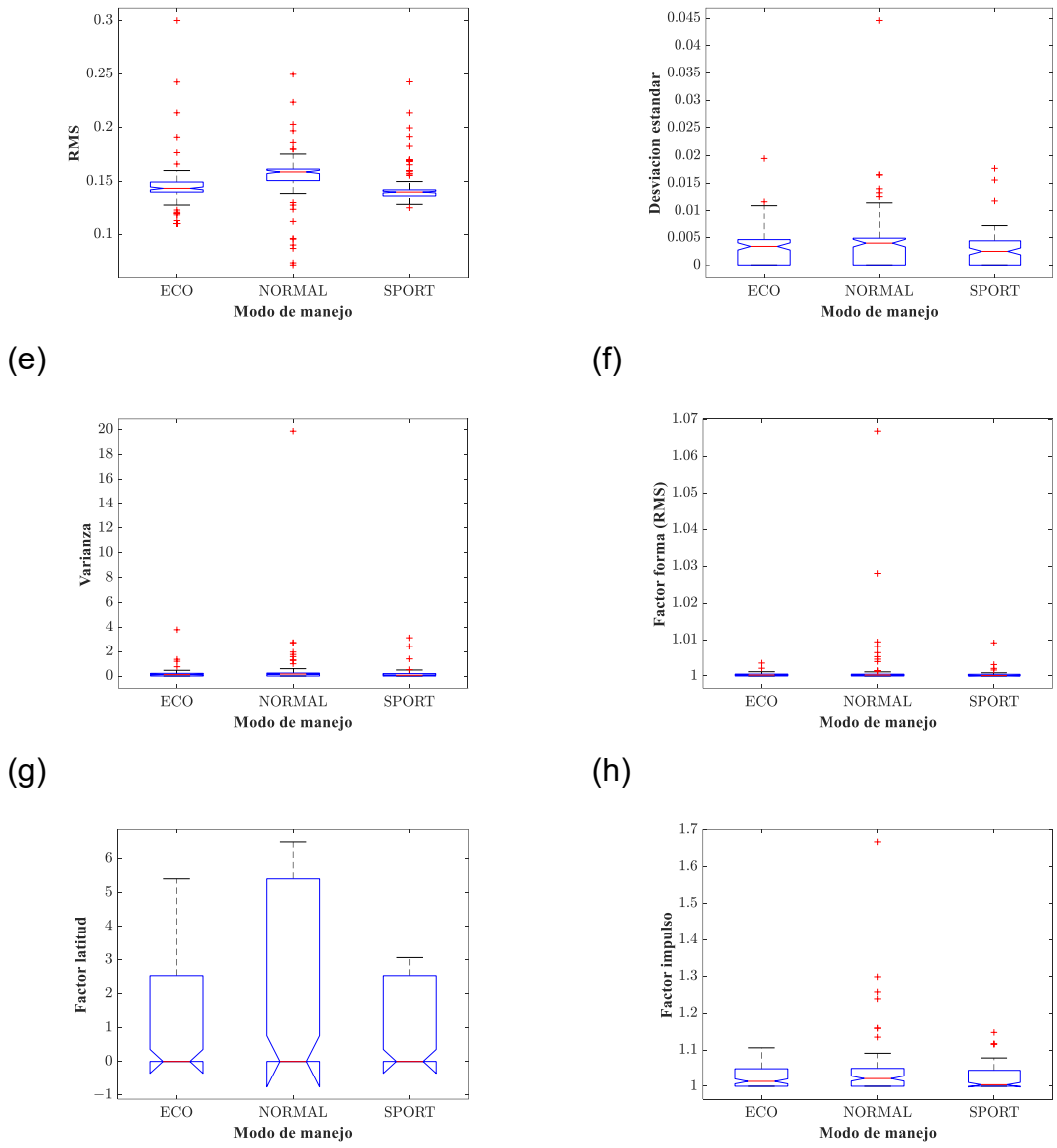


Figura 4.21 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de O₂. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso.

Los datos obtenidos en las pruebas realizadas con un vehículo modelo 2024 muestran que los indicadores estadísticos del NO_x presentaron un comportamiento diferente al de otros contaminantes, manteniéndose mayormente en cero. Esto podría ser debido a la falta de las condiciones necesarias para su formación, es decir, una mezcla pobre en oxígeno durante las pruebas. Para que se genere NO_x, es esencial que haya una combustión a alta temperatura y una abundante presencia

de oxígeno en la mezcla aire-combustible, lo cual ocurre típicamente en situaciones de alta carga o aceleración del motor o bien con un motor con mayor desgaste. Se dejaron como entradas los 24 indicadores de los tres gases CO, CO₂ y O₂ para las pruebas ya que se descartó el NO_x. En el grafico del NO_x como se muestra en la figura 4.22 se puede observar que los valores se encuentran en cero; La figura 4.23 muestran el comportamiento aplicando KW a los datos. se encuentran casi siempre en cero.

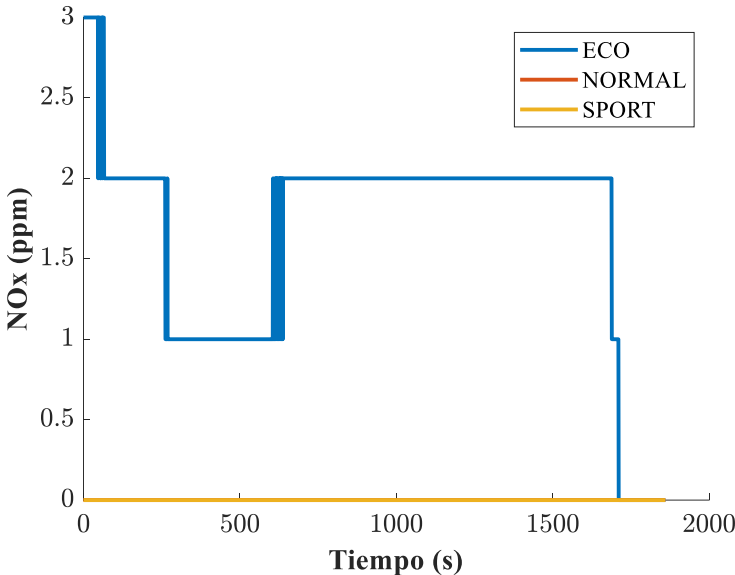
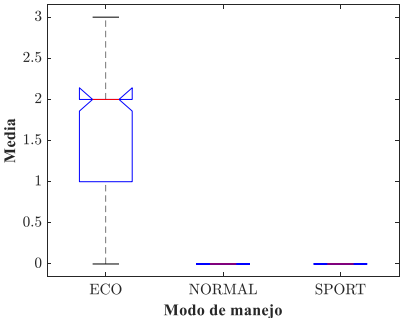
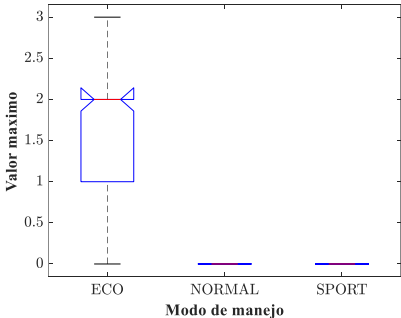


Figura 4.22 Gases de NO_x en prueba estática (30km/h).

(a)

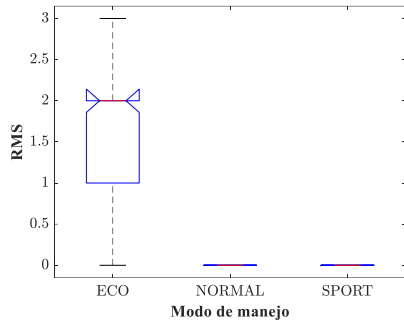


(b)

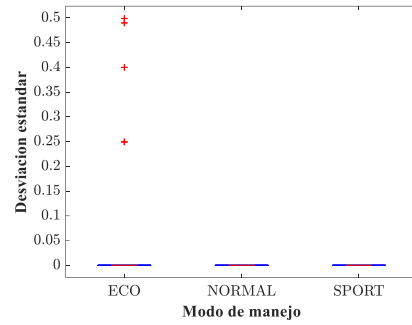


(c)

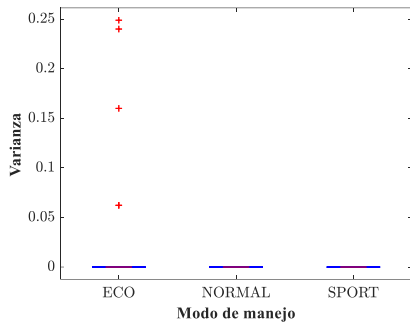
(d)



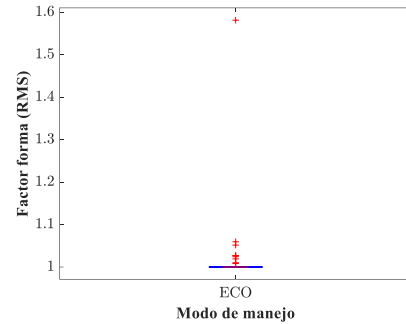
(e)



(f)



(g)



(h)

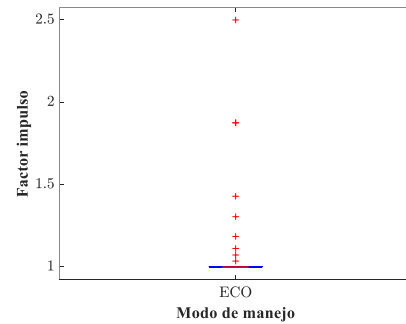
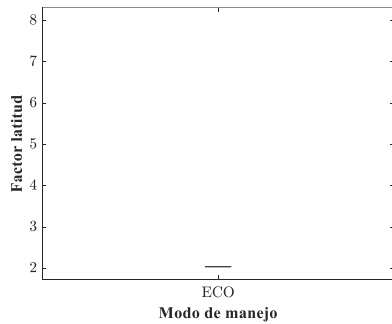


Figura 4.23 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de NOx. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso.

Para complementar el procesamiento de las señales se utilizó el método de mapas autoorganizados por sus siglas en inglés (SOM, Self-Organizing Maps) ya que estos mapas son un algoritmo de aprendizaje no supervisado, al igual que esto es aplicado en el campo de agrupamiento y calcificación. Esta inteligencia artificial funciona mediante un entrenamiento capaz de aprender a relacionar

topográficamente los vectores de entrada con los vectores de la red, en este caso se utilizaron los 8 indicadores estadísticos de cada modo de manejo, pero solo fueron incluidos para 3 gases, ya que el NOx no contenía información adecuada para este proceso, dando como resultado 24 indicadores para cada modo, la figura 4.24 muestra un ejemplo de las entradas al SOM; La figura 4.25 muestra el mapa de color (heatmap) que contiene la distribución de un atributo a través del mapa. La aplicación de los SOM a los datos de KW de la prueba estática a 30 km/h.

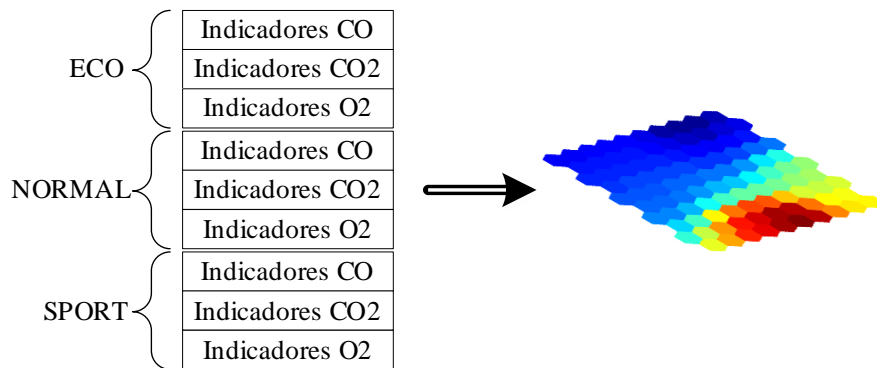


Figura 4.24 Entradas para el SOM.

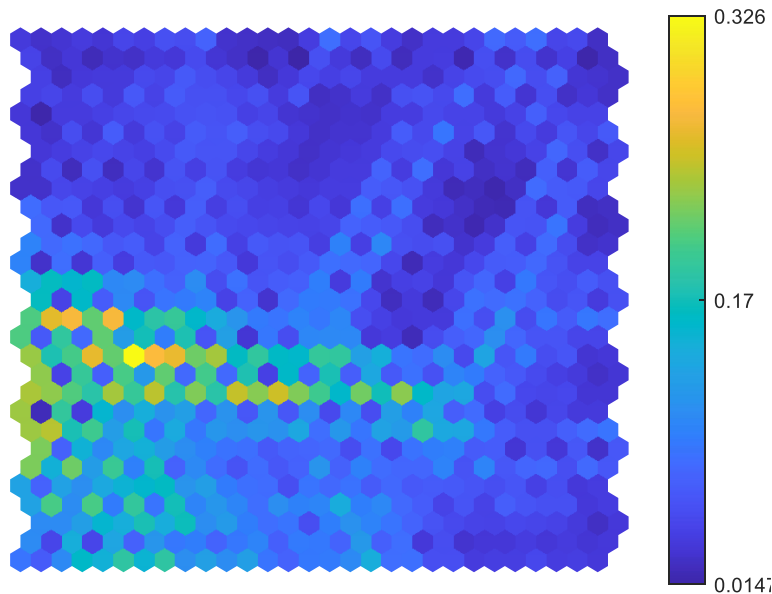


Figura 4.25 Heatmap.

Por otro lado, al usar los mapas auto-organizados también es posible obtener una medida cuantitativa denominada error de cuantización, dicha medida puede usarse con el fin de evaluar nuevas observaciones. En la figura 4.26 se muestra el

error de cuantización de los 3 modos de manejo teniendo el modo eco de las muestras de 1-120, normal 121-240 y el modo sport de 241-360. El error de cuantización en los SOM se refiere a la diferencia entre los datos de entrada y los valores de los nodos ganadores de la red, es decir, los nodos que representan mejor esos datos después de la fase de entrenamiento.

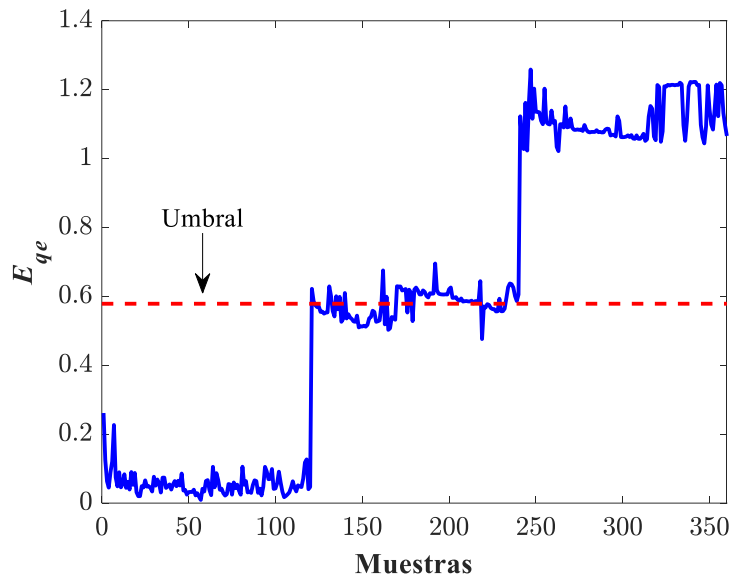


Figura 4.26 Error de cuantización CO2 prueba estática (30km/h).

En la figura 4.26 se puede apreciar el umbral que corresponde a los valores del modo normal, en donde el modo eco presenta una disminución en el error de cuantización y el modo sport representa un aumento, en este caso al comparar esta grafica con la del CO2 de los gases emitidos, se puede visualizar que corresponde a la diferencia que existe entre cada modo de manejo. Con la utilización de los SOM después del método de KW podemos constatar al proyectar datos de alta dimensionalidad en un espacio de baja dimensionalidad (2D) de manera que se mantengan las relaciones topológicas. Los datos presentan comportamientos adecuados con respecto a las emisiones recibidas por los sensores.

En la figura 4.27 se muestra también la distribución de los datos de cada modo donde se observan los agrupamientos de las emisiones para cada modo de manejo, aseverando aún más la relación que tiene el entrenamiento de las neuronas con los gases percibidos.

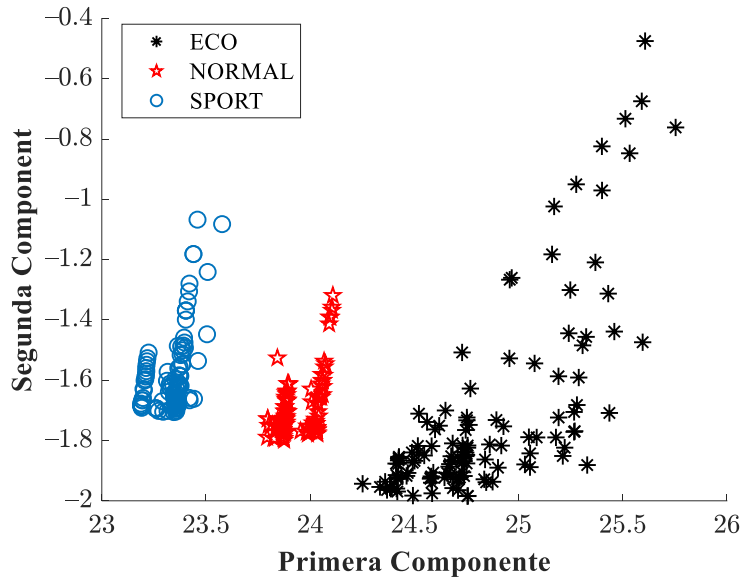


Figura 4.27 PCA de los gases de la prueba estática (30km/h).

4.6. Comparativa de los resultados en porcentaje de contaminación

A continuación, se muestran las gráficas y tablas de la prueba estática a 50km/h.

Para el CO se puede apreciar en la figura 4.28 que muestra un comportamiento diferente con respecto a la prueba de 30 km/h, esto se puede deber a que para esta prueba la mezcla oxígeno-combustible se mantiene en valores igualitarios, ya que al tener una velocidad y revoluciones constantes el motor no se encuentra ante una demanda de potencia y para este caso el rendimiento de combustible no es la prioridad ya que es el modo normal.

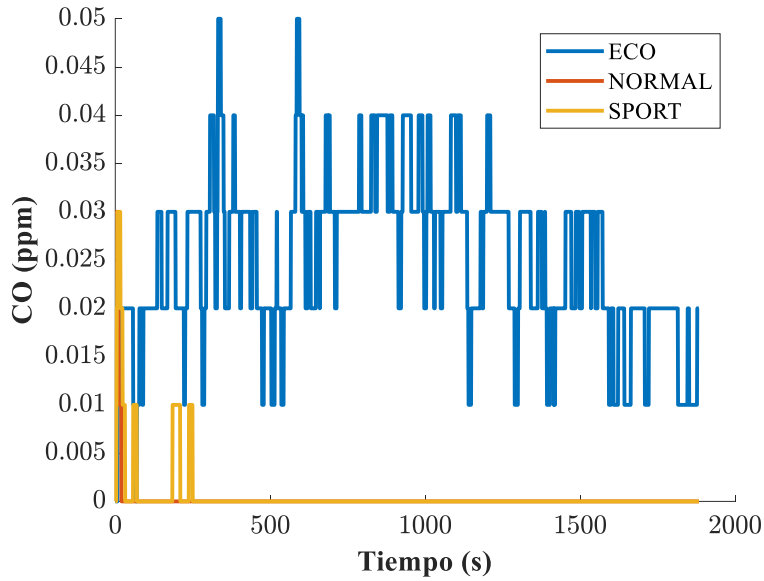
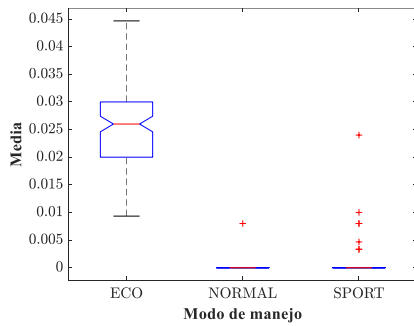


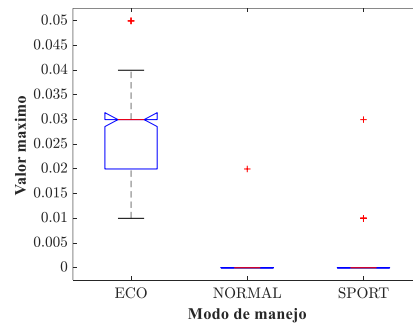
Figura 4.28 Gases de CO en prueba estática (50km/h).

La figura 4.29 muestra los valores estadísticos de cómo se comportan los gases de CO para la prueba de 50km/h con relación a los valores obtenidos de cada prueba.

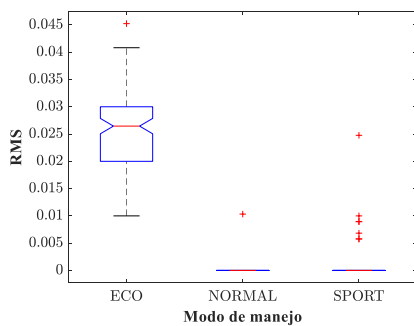
(a)



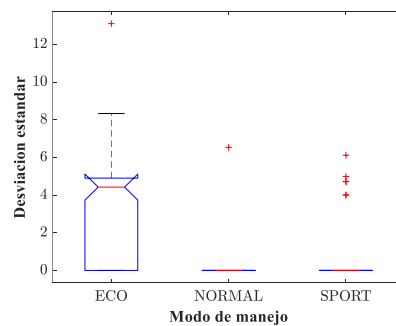
(b)



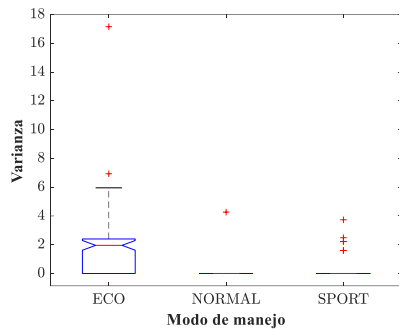
(c)



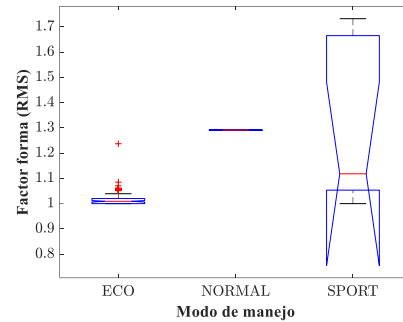
(d)



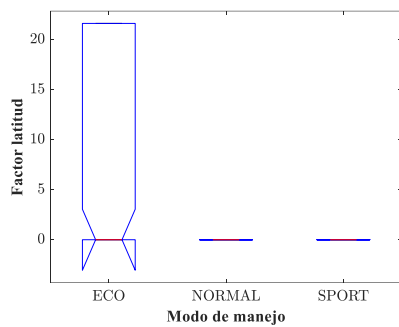
(e)



(f)



(g)



(h)

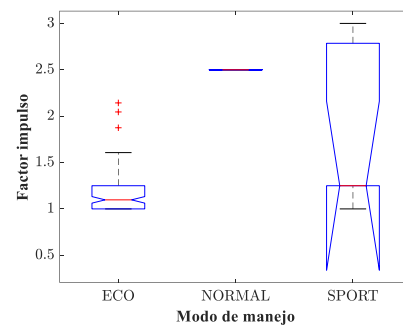


Figura 4.29 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de CO. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso.

Los datos obtenidos en esta prueba para el CO₂ también cambian con respecto a la prueba de 30 km/h ya que en este caso el modo sport se encuentra más elevado y el modo eco se encuentra por debajo de los otros modos de manejo. Esto puede deberse a que para este modo y en revoluciones más altas, los motores logran crear una mezcla de aire-combustible más eficiente ya que para el modo sport se prioriza la potencia del motor y en este caso se anula el ahorro de combustible permitiendo así una mejor mezcla y cuando esto sucede el CO se reduce y el CO₂ es el principal producto de la combustión. Como se muestra en la figura 4.30; La figura 4.31 muestran el comportamiento aplicando KW a los datos del CO₂

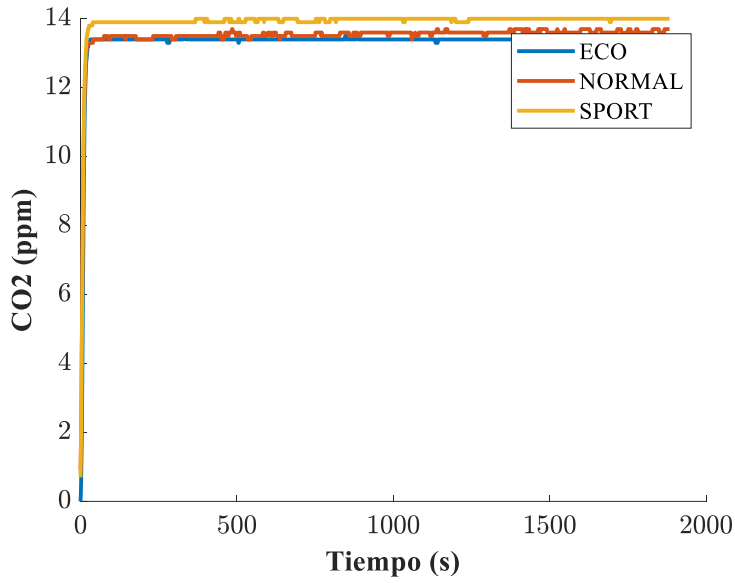
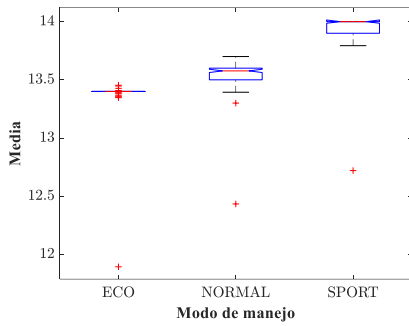
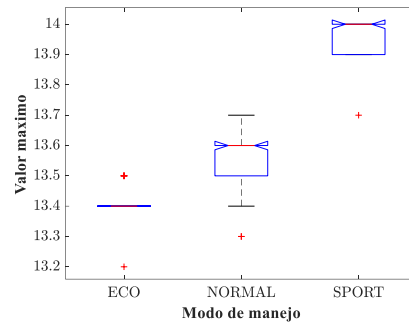


Figura 4.30 Gases de CO2 en prueba estática (50km/h).

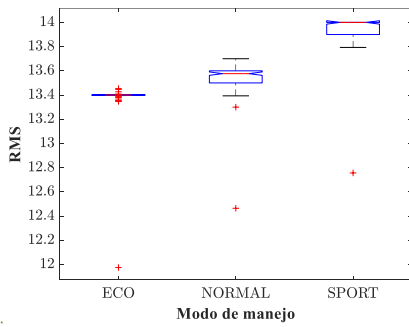
(a)



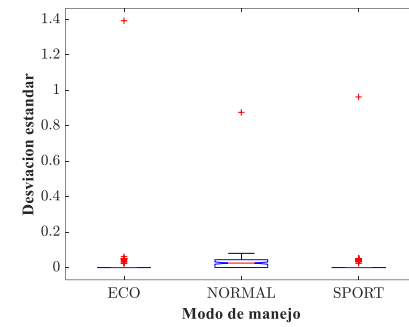
(b)



(c)

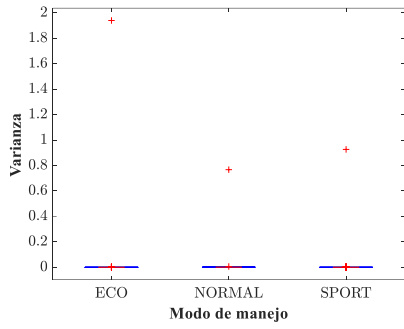


(d)

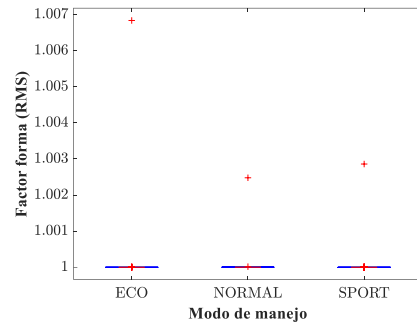


(e)

(f)



(g)



(h)

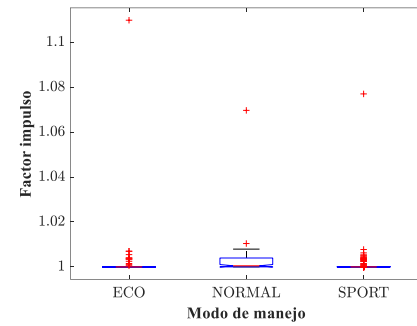
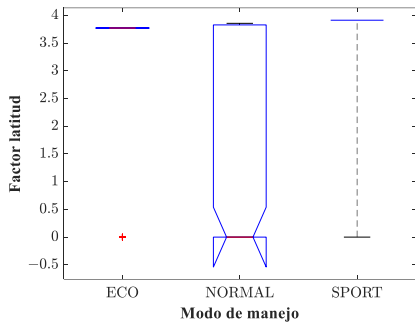


Figura 4.31 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de CO2. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso.

El O2 muestra un comportamiento similar a la prueba anterior como se muestra en la figura 4.32 al igual que la figura 4.33.

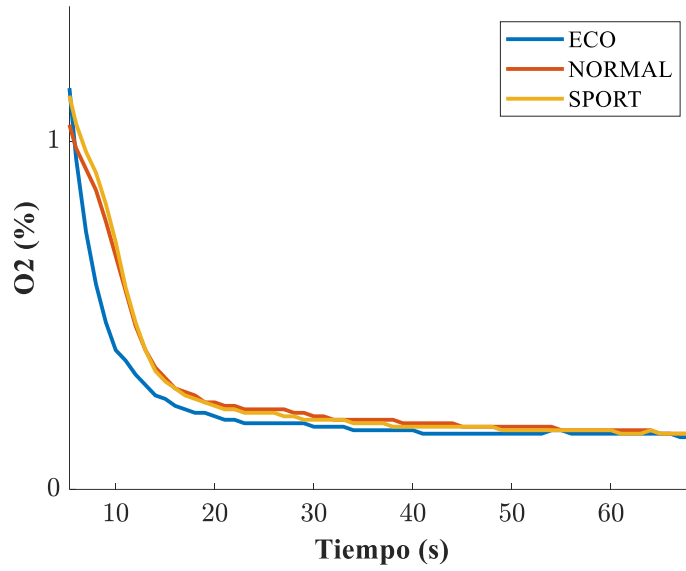
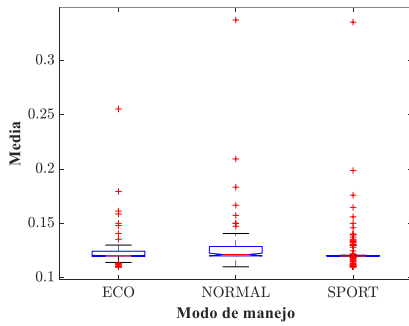
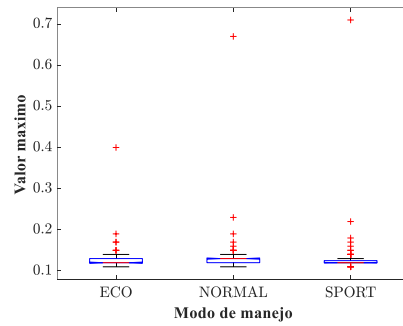


Figura 4.32 Gases de O2 en prueba estática (50km/h).

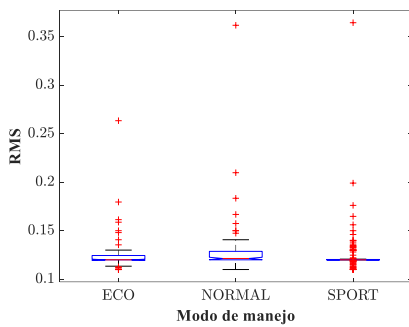
(a)



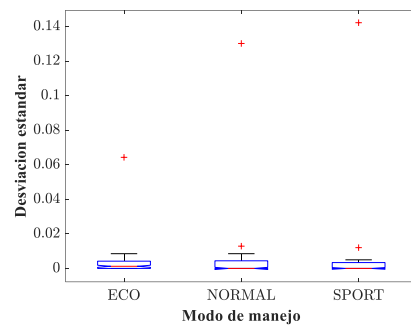
(b)



(c)

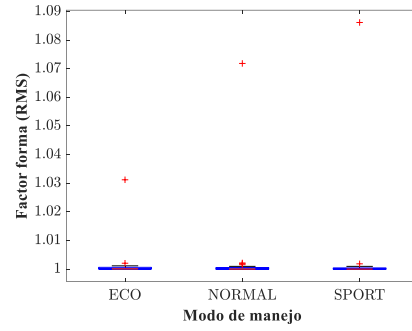
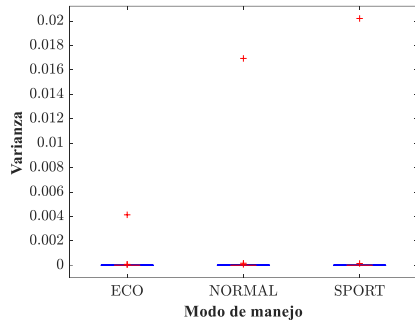


(d)



(e)

(f)



(g)

(h)

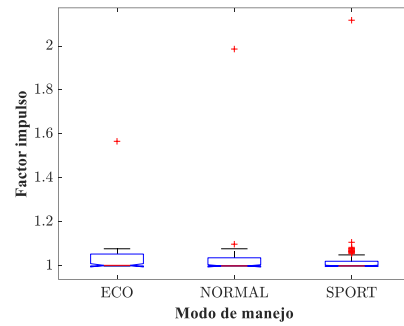
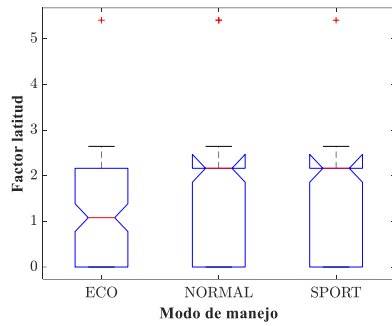


Figura 4.33 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de O₂. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso.

Para el NO_x se aprecia un comportamiento similar a la prueba anterior como se muestra en la figura 4.34 al igual que en la figura 4.35.

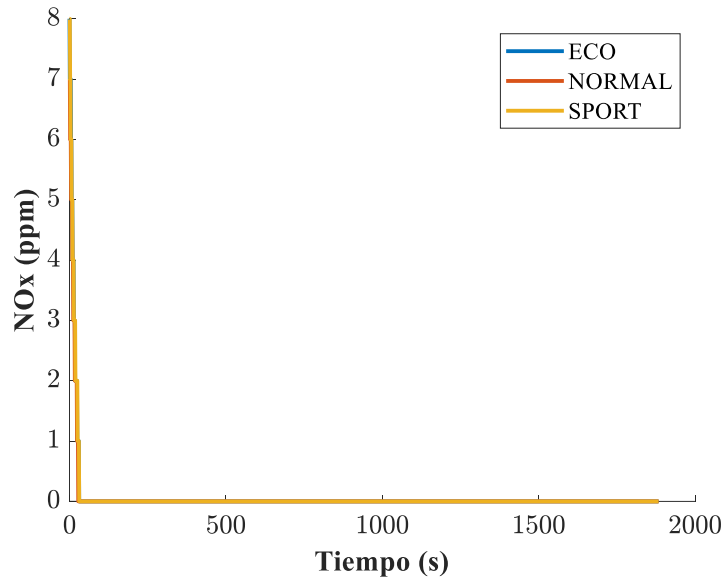
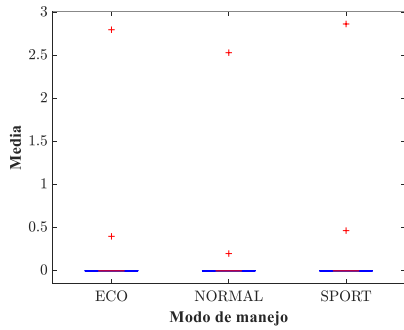
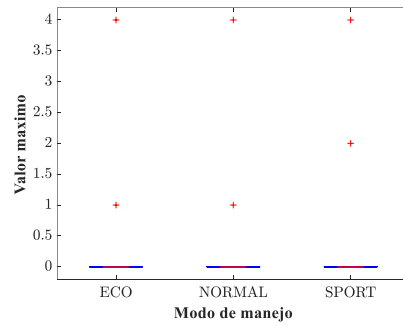


Figura 4.34 Gases de NOx en prueba estática (50km/h).

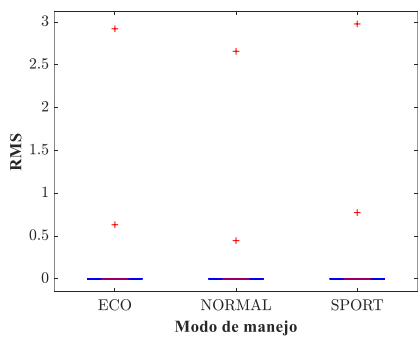
(a)



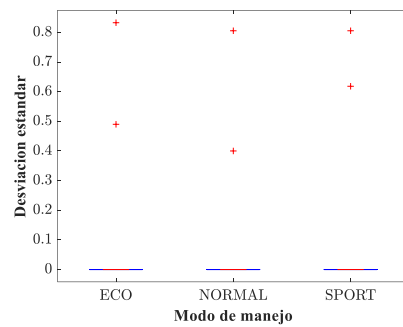
(b)



(c)

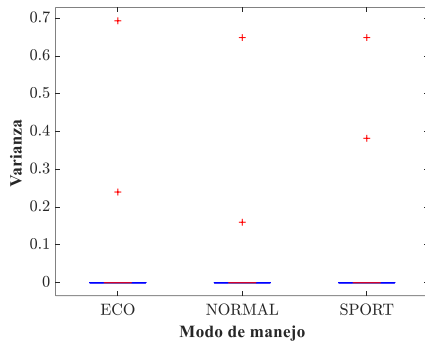


(d)

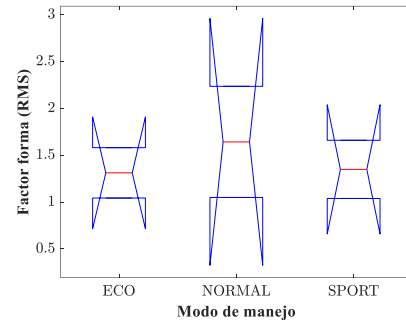


(e)

(f)



(g)



(h)

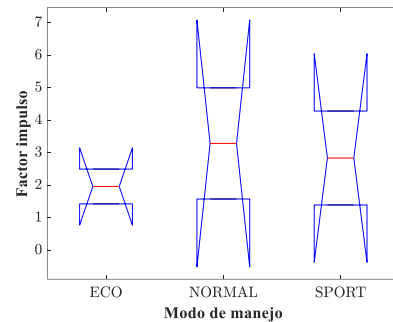
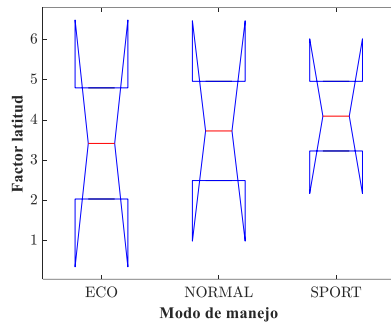


Figura 4.35 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de NOx. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso.

En la figura 4.36 se muestra den de nuevo los valores del CO, pero ahora para la prueba dinámica en donde se observa que esta grafica es muy similar a la del CO a 30km/h manteniendo el modo eco por encima de los demás modos. Comparando los tres gráficos de cada prueba se puede definir que, como el modo eco su prioridad es el ahorro de combustible entonces se restringe el sistema de inyección de el mismo haciendo que la mezcla aire-combustible no sea lo más eficiente posible, lo que da lugar a la formación de CO. La figura 4.37 muestra el método de KW similar a la prueba a 30 km/h

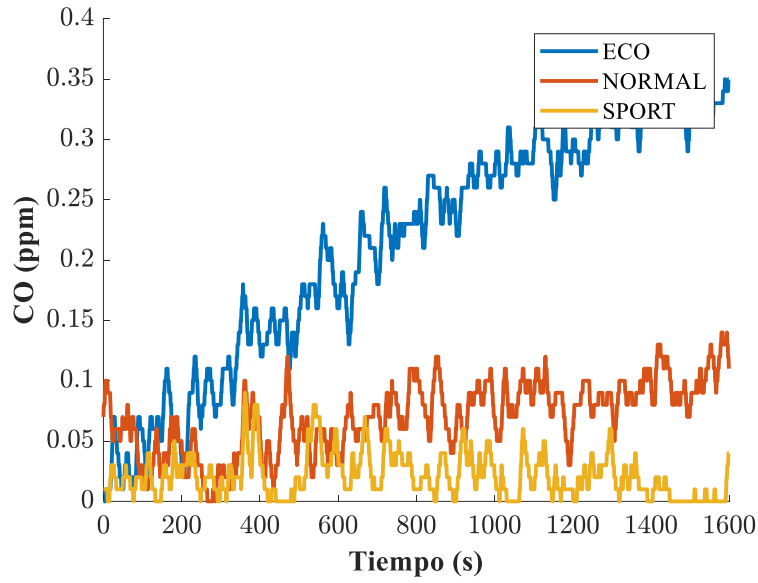
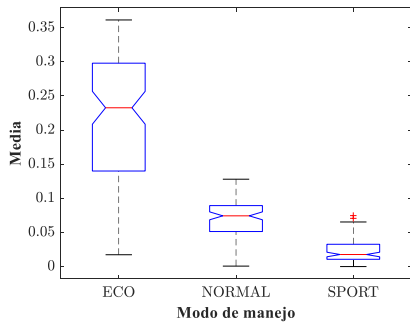
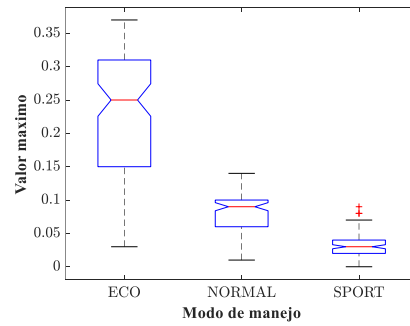


Figura 4.36 Gases de CO en prueba dinámica.

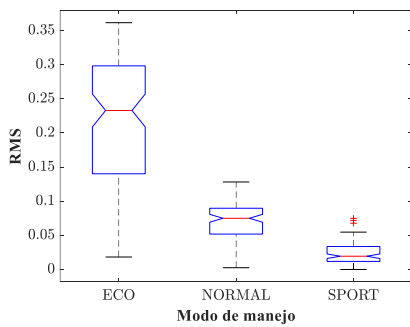
(a)



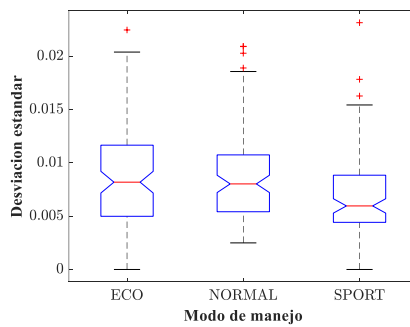
(b)



(c)

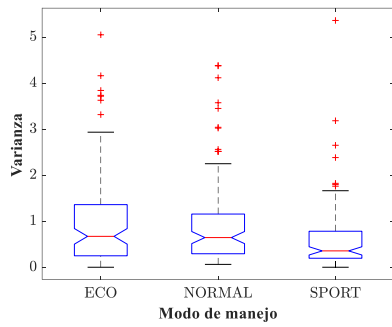


(d)

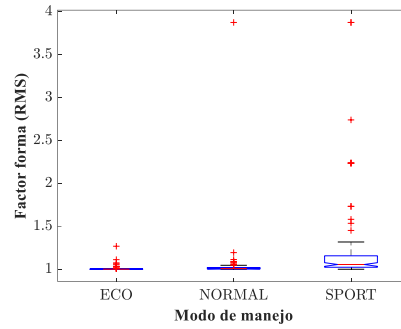


(e)

(f)



(g)



(h)

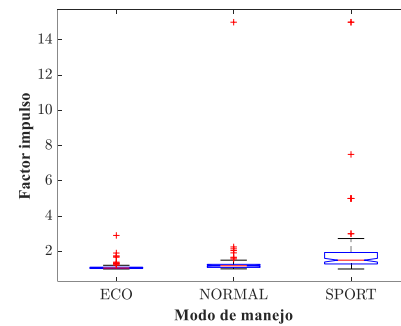
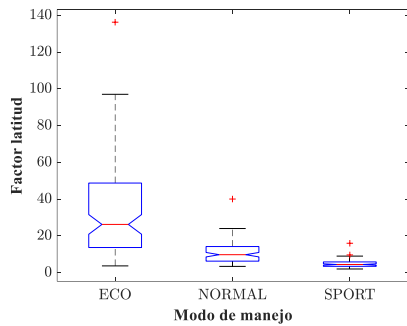


Figura 4.37 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de CO. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso.

En el caso del CO₂ en la prueba dinámica el modo eco se mantiene por encima de los otros modos, pero el modo sport ahora sobre pasa al modo normal. Como se muestra en la figura 4.38; La figura 4.39 muestra resultados del KW con respecto a los datos de las emisiones.

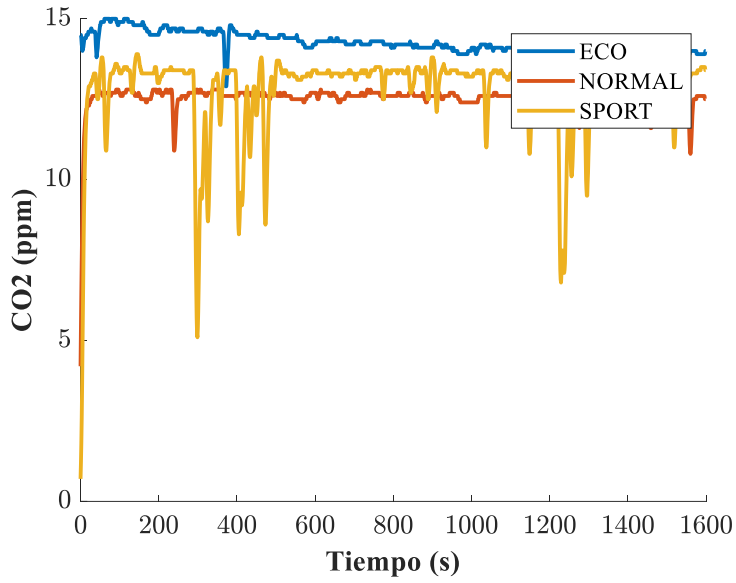
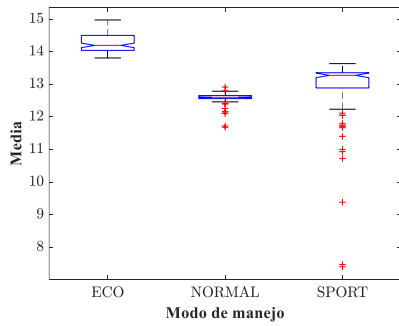
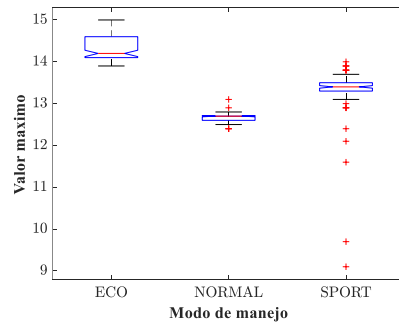


Figura 4.38 Gases de CO2 en prueba dinámica.

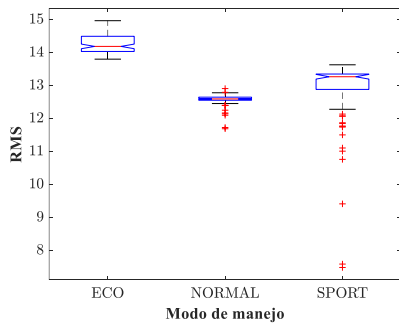
(a)



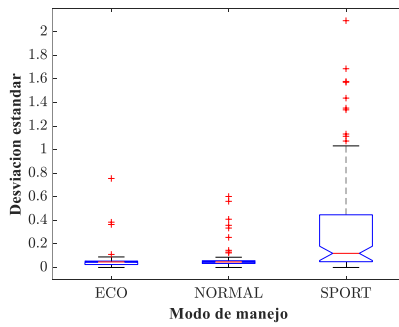
(b)



(c)

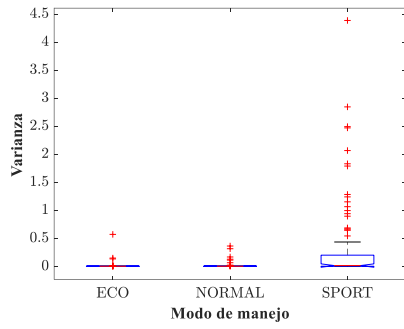


(d)

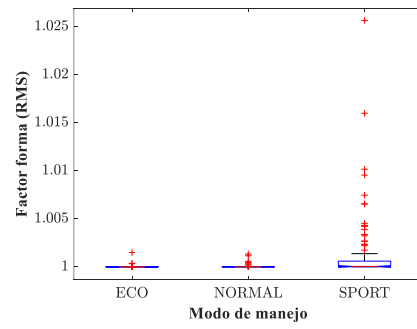


(e)

(f)



(g)



(h)

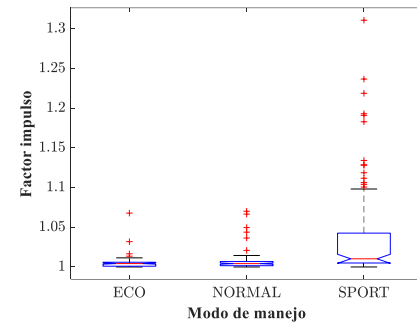
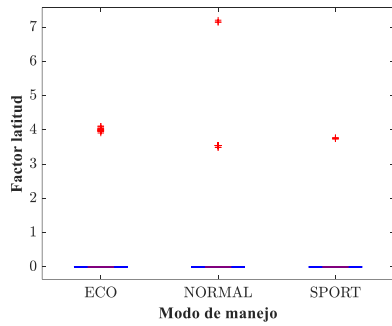


Figura 4.39 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de CO. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso.

En la figura 4.40 se muestra el comportamiento del O₂ el cual sigue teniendo valores no tan significativos, así como en la figura 4.41.

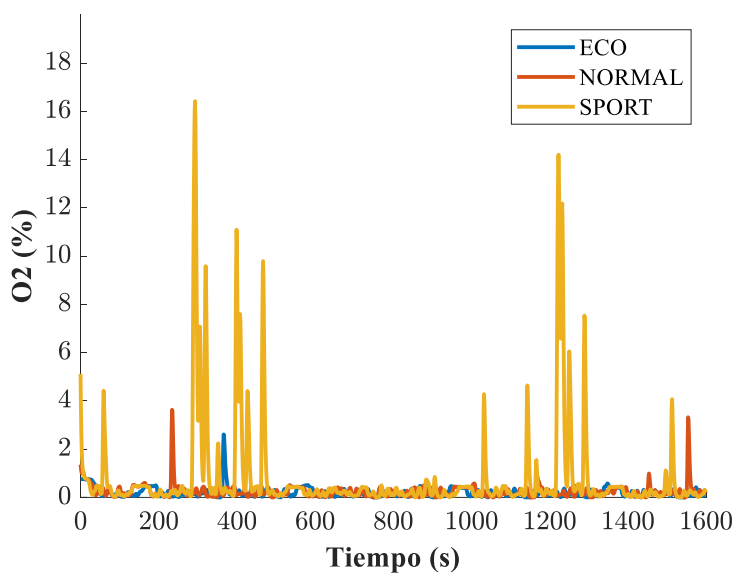
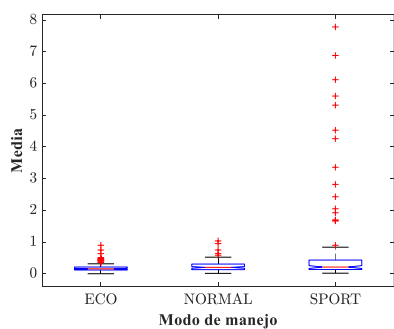
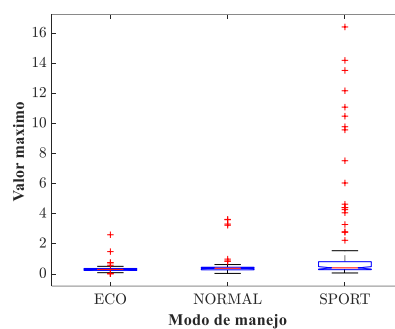


Figura 4.40 Gases de O2 en prueba dinámica.

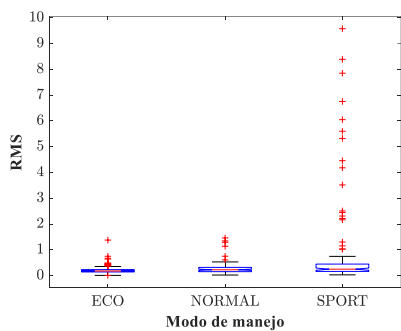
(a)



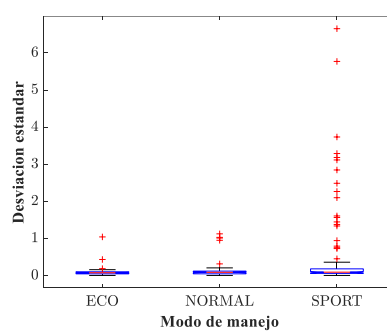
(b)



(c)

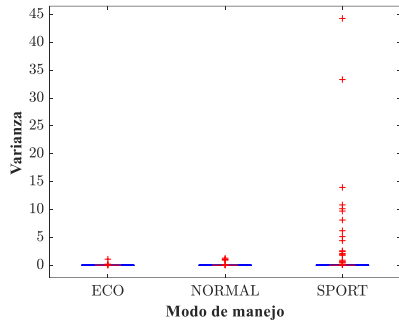


(d)

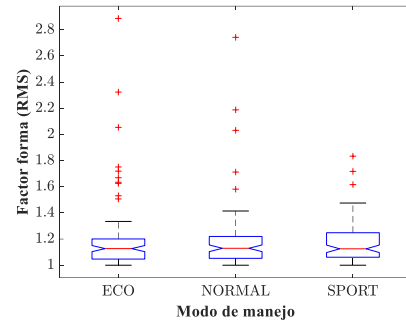


(e)

(f)



(g)



(h)

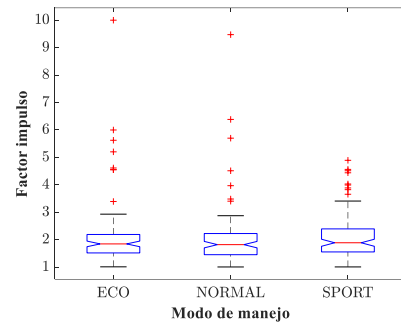
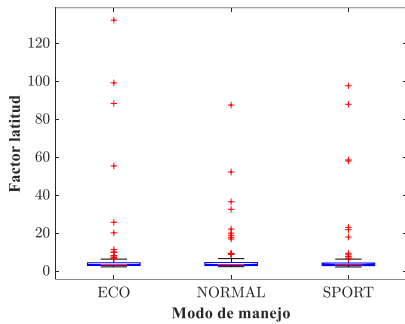


Figura 4.41 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de O₂. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso.

En estas pruebas el NO_x tuvo mayor presencia ya que al ser una prueba dinámica, la ruta exigía frenar y acelerar, y retomando lo mencionado anteriormente que “para que se genere NO_x, es esencial que haya una combustión a alta temperatura y una abundante presencia de oxígeno en la mezcla aire-combustible, lo cual ocurre típicamente en situaciones de alta carga o aceleración del motor”. Como se muestra en la figura 4.42; En la figura 4.43 se muestra el comportamiento aplicando el método de KW

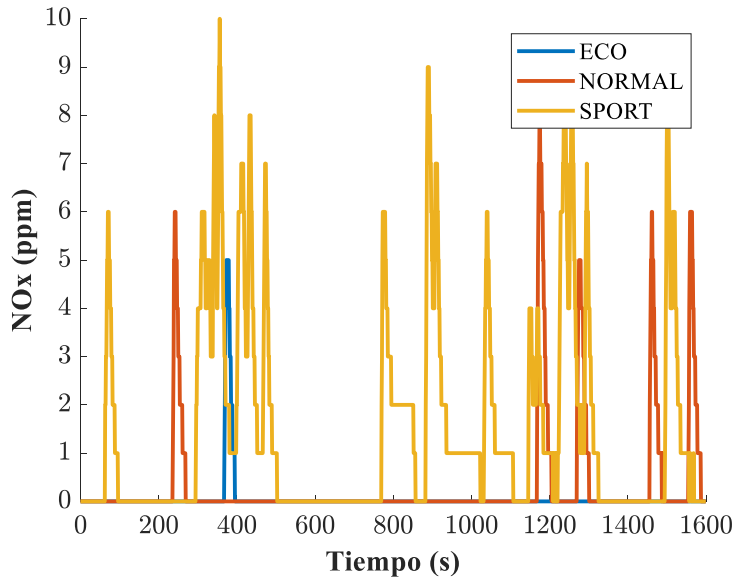
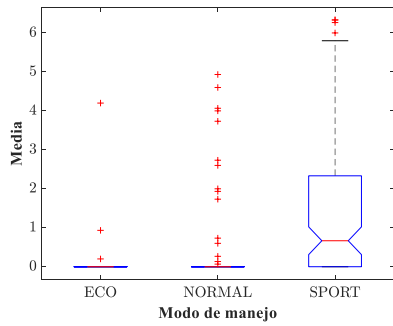
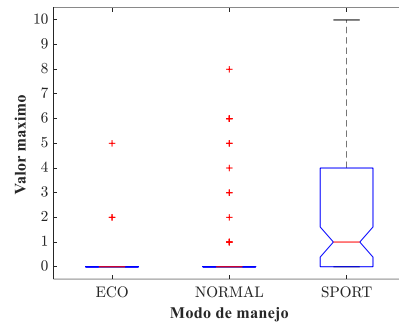


Figura 4.42 Gases de NOx en prueba dinámica.

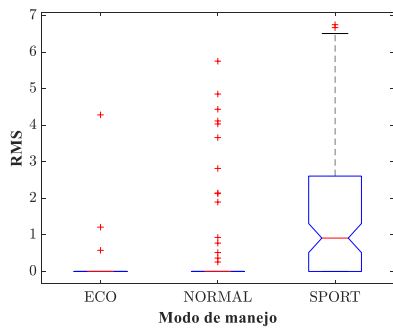
(a)



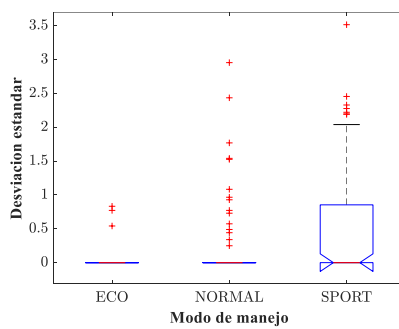
(b)



(c)

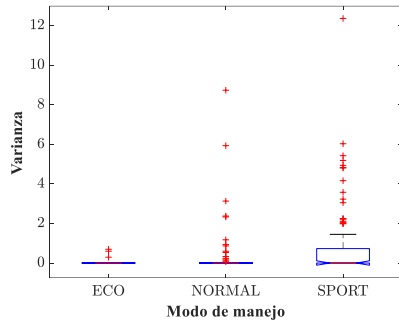


(d)

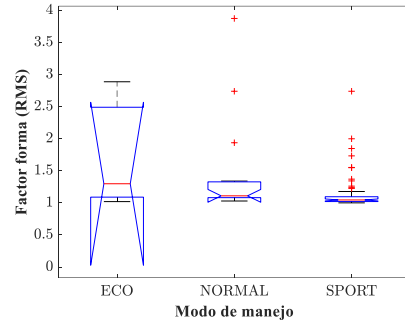


(e)

(f)



(g)



(h)

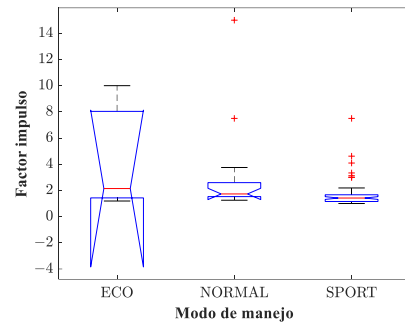
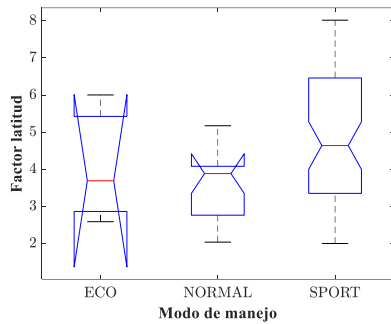


Figura 4.43 Diagramas de caja obtenidos tras aplicar la técnica de Kruskal-Wallis a los indicadores estadísticos de la señal de NOx. (a) media, (b) valor máximo, (c) RMS, (d) desviación estándar, (e) varianza, (f) factor RMS, (g) factor latitud y (h) factor impulso.

Con respecto a la aplicación del SOM se puede apreciar un comportamiento adecuado con respecto a los gases ya que en este caso para el CO₂ que es con el que se generaron estas gráficas, se puede apreciar observando las de los gases que el comportamiento del error de cuantización es igual al comportamiento de cuando un modo se encuentra por encima de otro como se aprecia en las figuras 4.44, 4.45 y 4.46.

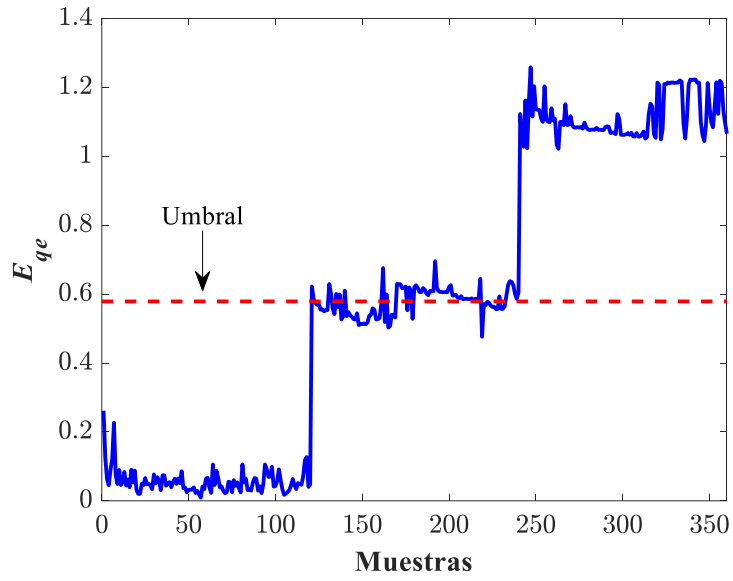


Figura 4.44 Error de cuantización prueba estática (30km/h).

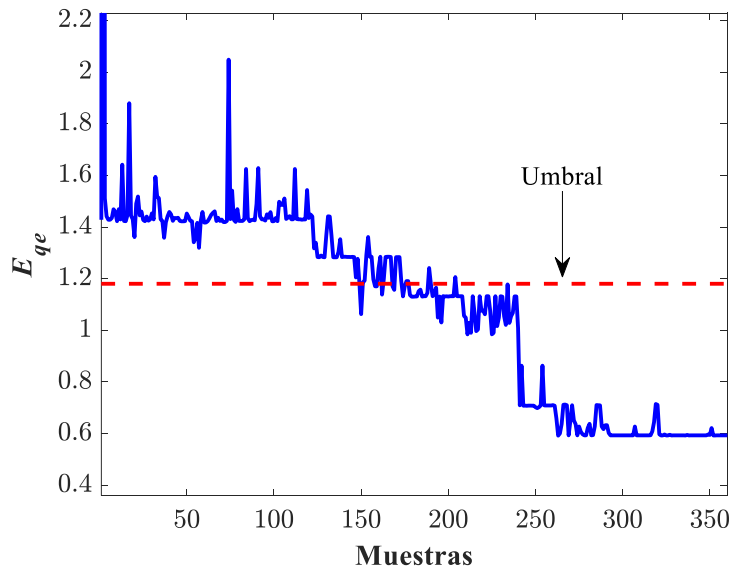


Figura 4.45 Error de cuantización prueba estática (50km/h).

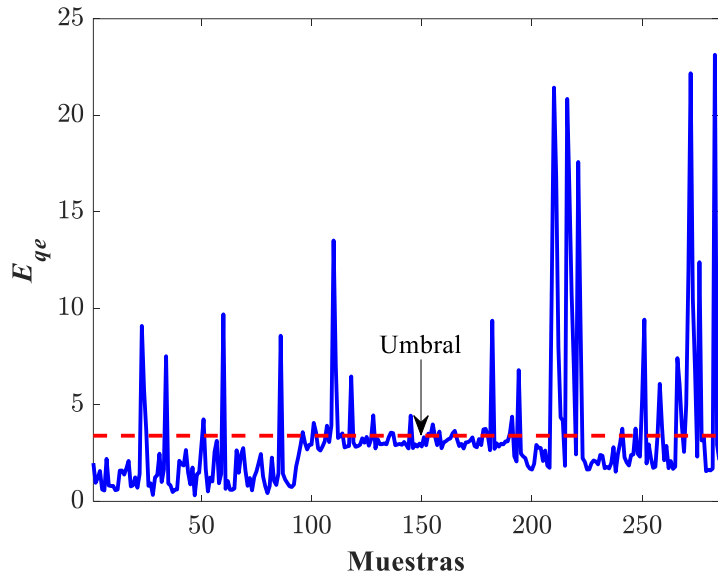


Figura 4.46 Error de cuantización prueba dinámica.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES

Se desarrollo un sistema de medición de gases con base a la metodología presentada para que este pudiera ir a bordo de un vehículo, para así recibir información en tiempo real durante dos tipos de prueba; estática: donde el vehículo se mantuvo levantado en un elevador automotriz para mantener una velocidad y rpm constantes. Dinámica: donde se condujo durante un circuito trazado. Esto con el fin de poder identificar las diferencias de ambas pruebas, utilizando tres modos de manejo diferente (eco, normal y sport). A través del procesamiento de estos datos utilizando indicadores estadísticos y algoritmos de inteligencia artificial, fue posible identificar patrones y tendencias que relacionen los modos de manejo con el impacto ambiental. Ya que como se muestra en los resultados existe una variación dentro de cada modo y con cada prueba realizada, algunos ejemplos más claros pueden ser el contaminante CO y CO₂, donde se aprecian valores distintos.

La implementación de un sistema de monitoreo a bordo para adquirir datos de emisiones contaminantes permitió evaluar de manera diferente en los efectos de los distintos modos de manejo (económico, normal y sport) en los niveles de emisiones en comparación con las pruebas convencionales y con equipos comerciales. Utilizando el método de Kruskal-Wallis se logró identificar diferencias estadísticamente significativas entre los modos de manejo, y fue posible detectar patrones en los datos que reflejen la influencia de cada modo de manejo en las emisiones. Complementariamente, al utilizar los mapas de autoorganización (SOM) facilito una representación visual y no lineal de estos datos, lo que permitirá agrupar y analizar las tendencias de manera intuitiva. Gracias al desarrollo de este trabajo de investigación se obtuvo el artículo para el congreso internacional de ingeniería (CONIIN) del anexo 2.

CAPITULO VI

6.PROSPECTIVAS

En prospectiva, se podrían realizar otras pruebas dinámicas en un trayecto de mayor distancia para así hacer trabajar de manera más agresiva el motor, como si fuera un viaje en carretera y no en ciudad, para así tal vez obtener mayor información con respecto al NOx ya que en estas pruebas se mantuvo en niveles de cero, a excepción un poco en la prueba dinámica y en el modo sport, ya que el origen de este gas se encuentra asociado con las altas cargas al motor o bien pisar el acelerador a fondo ya que en este modo lo que se prioriza es la potencia del motor dejando de lado el consumo de combustible, esto permitiría que se pueda utilizar este gas para el análisis con KW ya que en esta ocasión fueron descartados estos datos ya que al mantenerse la mayor parte del tiempo en cero no permitían un análisis correcto de los mismos, así también se puede concluir que el modo eco al priorizar el consumo de combustible, permite la generación mayor CO y CO₂ ya que no permite que el vehículo tenga una mezcla completa al restringir ciertas condiciones para mantener un consumo de combustible bajo.

Otro cambio que podría implementarse en las pruebas es el uso de diferentes tipos de gasolina en el vehículo en cuestión. En este caso, se utilizó gasolina de 97 octanos, pero sería interesante realizar pruebas con un vehículo que funcione con gasolina de 87 octanos. Esto permitiría evaluar la influencia que tiene el tipo de combustible suministrado y analizar la variabilidad que pueda existir en los distintos modos de manejo.

REFERENCIAS

- ACELA. (2020). *Asociación de combustibles eficientes en Latinoamérica*.
- Al-rifai, J. H. (2017). Correlation analysis of driving conditions and on-road emissions trends for vehicle. *Journal of Urban and Environmental* , 72.
- Antonio, A. R. (2015). *Motores de combustión interna*. Madrid: UNED.
- Arduino.cl. (2010). *MCI electronics*. Obtenido de <https://arduino.cl/que-es-arduino/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20Arduino%3F%20Arduino%20es%20una%20plataforma%20de,una%20manera%20muy%20sencilla%20%28principalmente%20con%20cables%20dupont%29>.
- Baldi, A. (30 de julio de 2021). *islaBit*. Obtenido de <https://www.islabit.com/120997/que-es-un-fpga-y-para-que-se-utiliza.html>
- Bárceñas, F. E. (mayo de 2013). Sistema de monitoreo móvil de la calidad del aire utilizando redes vehiculares de transporte. *Sistema de monitoreo móvil de la calidad del aire utilizando redes vehiculares de transporte*. Querétaro, Querétaro, México.
- Bertoncini, B. V. (2021). Onboard analysis of vehicle emissions in urban ways with different functional classifications. *Urban Climate*, 39.
- Bosch, R. (2021). *Bosch*. Obtenido de Bosch Automotive Aftermarket en América Latina: <https://am.boschaftermarket.com/pa/es/equipos/servicio-de-motor/inspecciones-de-emisiones/bea-950-s1>
- Caldas, J. I. (2020). Análisis de la influencia de la conducción eficiente y sport en la degradación del lubricante de un motor de combustión interna mediante la motorización del aceite. Cuenca, Ecuador.
- Capelec. (2019). *Opacímetro autónomo*. Obtenido de <https://www.capelec.com/es/equipements/emisiones/cap3201-o>
- Chen, J. (2023). Detección de concentraciones de CO₂ y CH₄ en una zona urbana de Beijing carretera con láser de diodo sintonizable montado en un vehículo espectroscopia de absorción. Beijing, China.
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (31 de diciembre de 2017). *Gobierno de México*. Obtenido de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Calidad del Aire Ambiente: <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/4-normas-oficiales-mexicanas-nom-de-calidad-del-aire-ambiente>
- Córdova, L. (22 de diciembre de 2020). *Gluc*. Obtenido de <https://gluc.mx/sociedad/2020/12/22/verificacion-vehicular-en-cdmx-si-dara-servicio-en-diciembre-2020-como-sacar-cita-30322.htm>

Fan, Y. (2016). Significance Analysis of Vehicle Operation Modes for Pollutant Emission at a Signalized Intersection. *Advances in Engineering Research*.

Fernanda, C. C. (2014). Diseño e implementación de un prototipo de monitoreo de automóviles empleando el estándar OBD-II.

Gebisa, A. (2021). Driving Cycles for Estimating Vehicle Emission Levels and Energy Consumption. MDPI.

Gonzales, A. E. (2020). Prototipo para el análisis de crecimiento vehicular y estaciones de monitoreo atmosférico. *ECORFAN*, 12.

Guevara, F. A. (2018). Análisis de emisiones atmosféricas de tres tipos de vehículos con encendido provocado por chispa S.I. (Spark Ignition) 1000cc, en diferentes condiciones de operación en la ciudad de Bogotá. Bogotá.

He, Z. (2020). Vehicle Emission Detection in Data-Driven Method. *Hindawi*, 13.

IBM. (2023). *IBM*. Obtenido de <https://www.ibm.com/mx-es/topics/artificial-intelligence>

IIAM. (2023 de agosto de 2019). *Expertos en la industria automotriz*.

INEGI. (agosto de 2023). *Económica y Sectores Productivos*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/#:~:text=Parque%20vehicular%20Muestra%20el%20n%C3%BAmero%20de%20unidades%20vehiculares,de%20la%20producci%C3%B3n%20y%20venta%20nacional%20de%20automotores>.

Instituto Mexicano del Transporte. (2000). Impacto de tres estilos de manejo en las emisiones contaminantes y rendimiento de combustible de un vehículo de servicio pesado. Querétaro.

Lab, A. (5 de octubre de 2022). *Mapa autoorganizado. Enciclopedia*. Obtenido de <https://academia-lab.com/enciclopedia/mapa-autoorganizado/>

Lairenlakpam, R. (2018). Effect of Real World Driving and Different Drive Modes on Vehicle Emissions and Fuel Consumption. SAE international.

Martinez, R. C. (2023). Manual técnico CL200 data logger. Querétaro.

Mendoza. (12 de febrero de 2020). AUTOMEXICO.COM. Obtenido de automexico.com

Melman, T. (2019). ¿Cómo afectan los modos de conducción a la dinámica del vehículo? comparando el modo sport multi-sense de renault y modos confort durante la conducción naturalista en carretera. *international journal*, 19.

Mendoza. (12 de febrero de 2020). AUTOMEXICO.COM. Obtenido de automexico.com

Mendoza, L. M. (13 de marzo de 2019). *Gobierno de México*. Obtenido de ¿Qué es un dinamómetro vehicular y cómo se usa para la medición de emisiones contaminantes de los vehículos?: <https://www.gob.mx/cenam/articulos/que-es-un-dinamometro-vehicular-y-como-se-usa-para-la-medicion-de-emisiones-contaminantes-de-los-vehiculos?idiom=es>

Morales, M. Y. (2014). Caracterización de un motor de combustión interna con dos tipos de combustible. Querétaro, México.

Navarrete, G. G. (2019). Sensores de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire. *CTS Epistemos*, 37.

Norma Oficial Mexicana. (7 de septiembre de 2005). *NOM-42-SEMARNAT-2003*. México: Diario oficial.

Norma Oficial Mexicana. (miércoles de junio de 2015). *NOM-041-SEMARNAT-2015*. *Diario oficial*, pág. 11.

Ortiz, C. M. (marzo de 2018). Implementación de un control pid fuzzy para la regulación de nivel del módulo mps pa compact woekstation mediante la tarjeta stm32f4 Discovery.

Pallarozo, D. A. (2021). Análisis de las emisiones de gases contaminantes de un vehículo Toyota prius c hybrid 1.5l en rutas establecidas en la ciudad de cuenca, para determinar su impacto. Ecuador.

Parmar, D. (25 de septiembre de 2023). *Geekflare*. Obtenido de <https://geekflare.com/es/single-board-computers/>

Peppes, N. (2021). Driving Behaviour Analysis Using Machine and Deep Learning Methods for Continuous Streams of Vehicular Data. MDPI.

Pielecha, J. (2020). Emisiones de escape y consumo de energía análisis de vehículos convencional, híbrido y eléctrico en ciclos de conducción reales. *MDPI*, 21.

Ramos, O. R. (12 de junio de 2008). Simulación en simmechanics de un sistema de control difuso para el robot udlap. Cholula, Puebla, México: Bibliotecas UDLAP.

Ruiz, B. J. (2022). Desarrollo de un protocolo de conducción ecológica mediante análisis de las señales pids y de los valores de emisiones de escape. Ecuador.

SEAT. (28 de abril de 2017). *Motor pasión*.

SEDEMA. (11 de septiembre de 2018). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/comisionambiental/es/articulos/metodos-estatico-y-dinamico-de-la-verificacion-vehicular?idiom=es#:~:text=Este%20m%C3%A9todo%20mide%20los%20gases%20de%20escape,>

20%28HC%2C%20CO%2C%20CO2,u%20otros%20combustibles%20alternos%20estando%20el%20veh%C3%ADculo

Sole, R. (18 de julio de 2021). *Profesional review*. Obtenido de <https://www.profesionalreview.com/2021/07/18/que-es-raspberry-pi/>

Solorio, M. (2007). *Manual para programar PIC'S enfocado al laboratorio de microprocesadores que se imparten en la FES Aragón*. Obtenido de wiki CCH: <https://www.wiki.cch.unam.mx/Microcontroladores>

Varela, D. T. (2018). *Grupo de investigacion en sistemas inteligentes*. Obtenido de <https://virtual.cuautitlan.unam.mx/intar/sistdig/creditos/>

Vela, L. G. (2019). Revisión de la normativa internacional sobre límites de emisiones contaminantes de vehículos de carretera. Sanfandila, Queretaro, México.

Verificentrosdcmx. (2023). Obtenido de <https://verificentrosdcmx.com/tecnologia-y-equipos-utilizados-en-la-verificacion-vehicular-en-mexico/>

Volvo. (19 de marzo de 2020). *volvo*. Obtenido de <https://www.volvocars.com/mx/support/car/xc40/19w46/article/69b52de58da4d094c0a801515d2828b8>

Yorleany. (2 de julio de 2023). *Tipos de indicadores*. Obtenido de <https://tiposdeindicadores.com/indicadores-estadisticos/#:~:text=Existen%20muchos%20tipos%20de%20indicadores%20estad%C3%ADsticos%2C%20pero%20algunos,datos%20con%20respecto%20a%20su%20media.%20M%C3%A1s%20elementos>

APENDICES

1. Sección de código utilizada

```
%% Cargar datos snap on
load('carac3.mat');
snap_monox = table2array (Carac3(36:169,2)); %extracción muestras de interés

%% Cargar datos obtenidos con el microcontrolador
A1 = sprintf('Prueba_Caracterizacion3.txt');
Data = load (sprintf ('%s', A1));
%% Frecuencia de muestreo del microcontrolador
FSC 500

%% Conversión de los datos obtenidos por el microcontrolador a voltaje
monox = Data(:,2).*(3.3/4096);
tC = (0:length(monox)-1)/FsC; %vector tiempo

%% MUESTRAS SELECCIONADAS
monox = monox(17500:45000);

%% LONGITUDES DE VECTORES
Lsmonox = length(snap_monox(:,1))+5; Lmonox = length(monox(:,1));

%% Resamplio de muestras
rmonox = resample(monox,Lsmonox, Lmonox);
rmonox = rmonox(1:Lsmonox-5);
```

2. Artículo publicado

Design of a pollutant gas measurement system for vehicular applications

Miguel Resendiz Trejo.
Autonomous University of Querétaro.
UAQ.
San Juan del Rio Queretaro, Mexico.
mresendiz77@alumnos.uaq.mx

Juan Jose Saucedo Dorantes
Autonomous University of Querétaro.
UAQ.
San Juan del Rio Queretaro, Mexico.
juan.saucedo@uaq.mx

Roberto Carlos Morales Martinez
Autonomous University of Querétaro.
UAQ.

San Juan del Rio Queretaro, Mexico
rmorales03@alumnos.uaq.mx

David Alejandro Elvira Ortiz.
Autonomous University of Querétaro.
UAQ.
San Juan del Rio Queretaro, Mexico.
david.elvira@uaq.mx

Carlos Gustavo Manriquez Padilla
Autonomous University of Querétaro.
UAQ.
San Juan del Rio Queretaro, Mexico.
carlos.manriquez@uaq.mx

Abstract— Since the selection of spark plugs can directly influence the adequate performance of an internal combustion engine, this performance, in turn, affects the polluting emissions produced. The objective is to carry out an analysis of polluting emissions, using signals acquired by sensors, with which the effect of different spark plugs on combustion engines will be examined. It is proposed to design and develop an emissions monitoring system, integrating CO, CO₂, NO_x and O₂ measurement sensors, complying with vehicle regulations. Subsequently, perform the processing and analysis of gas emission signals using Octave software, using time domain processing techniques to determine the impacts of different types of spark plugs in internal combustion engines.

Keywords— spark plugs, polluting emissions, engine, sensors.

I. INTRODUCTION

Recent technological advances have left their mark in various areas, including the automotive sector, which has seen significant benefits. The integration of technology into modern vehicles aims to offer solutions that improve comfort, performance, and safety. However, it is important to note that some technologies designed to improve vehicle performance have not been able to improve combustion in internal combustion engines to reduce polluting emissions. There are different factors that can affect combustion efficiency and commonly malfunctions in the ignition system, fuel injection system, among others, generate effects that affect efficiency. Thus, among the elements that affect engine

combustion are the spark plugs, which generate the spark necessary to ignite the fuel and begin the combustion cycle in the engine. Over time, spark plugs have evolved to improve their performance and efficiency through the use of more durable alloys, ceramic coatings, and more precise designs. However, this evolution does not guarantee a reduction in emissions, since vehicles are developed with very different characteristics between brands, which raises doubts about the impact that a certain type of spark plug can have on the polluting emissions produced by a vehicle [1].

In recent years, the number of vehicles that make up the vehicle fleet in Mexico has been increasing over the years, according to what is reported on the website of the National Institute of Statistics and Geography [2], which indicates that in 2017 there were 46 million registered motor vehicles in circulation and in 2022 more than 55 million. Consequently, emissions of polluting gases caused by vehicles have been increasing considerably, this increase has occurred despite the fact that certain regulations have been established by some entities, such as the Ministry of the Environment and Natural Resources – official Mexican standards [3]. The generation of polluting emissions in vehicles such as: carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), Hydrocarbons (HC) and fine particles; is a global problem, so much so that governments of different countries have worked to regulate vehicle emissions. In this sense, different vehicle manufacturers have tried to improve the performance of internal combustion engines through the design and implementation of new