



Inyección de etanol en motores diesel mediante técnicas de inteligencia computacional

Diana María Gómez Jaramillo

Tesis doctoral presentada para optar al título de Doctor en Ingeniería Electrónica y de Computación

Director

Andrés Felipe Agudelo Santamaría, Doctor (PhD) en Energías Renovables

Codirectora

Claudia Victoria Isaza Narváez, Doctor (PhD) en Sistemas Automáticos

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería

Doctorado en Ingeniería Electrónica y de Computación

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	Gómez Jaramillo [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] D. Gómez Jaramillo, "Inyección de etanol en motores diésel mediante técnicas de inteligencia computacional", Tesis doctoral, Doctorado en Ingeniería Electrónica y de Computación, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.



Doctorado en Ingeniería Electrónica y de Computación, Cohorte XX.

Grupo de Investigación Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL).



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

*A mis hijas Mariangel y Luciana por su paciencia e
inmensas manifestaciones de amor*

A mi esposo Frank por su apoyo incondicional

*A mi mamá Maria Lucy por estar siempre presente
para mí y para todos*

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi sincero agradecimiento al programa SÉNECA por brindarme la oportunidad de desarrollar esta tesis, por su compromiso con la educación y la investigación y por proporcionar los recursos económicos para mi formación doctoral.

Al grupo de investigación de manejo eficiente de la energía – GIMEL, al grupo de sistemas embebidos e inteligencia computacional – SISTEMIC, y al grupo de investigación en innovación en energía – GIEN por su valiosa contribución a este trabajo.

También quiero agradecer a la empresa FOTON por el acceso a sus camiones diesel livianos para realizar las pruebas dinámicas en el vehículo y a la empresa 3DATX por facilitarnos el equipo portátil para la medición de emisiones gaseosas y de partículas, ambos fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

Mi agradecimiento a la Institución Universitaria Pascual Bravo por su apoyo en el préstamo de las instalaciones y del freno dinamométrico de rodillos, recursos que fueron esenciales para llevar a cabo esta investigación de manera efectiva.

Un agradecimiento especial va dirigido a mis asesores, Claudia Victoria Isaza y Andrés Felipe Agudelo, por su orientación, apoyo y dedicación a lo largo de todo este proceso. Su experiencia y conocimientos guiaron cada etapa del desarrollo de este trabajo.

Por último, expreso mi gratitud a los compañeros del grupo de investigación GIMEL. Su colaboración y disposición para realizar cada una de las pruebas fueron esenciales para el éxito de esta tesis.

A todos aquellos que han contribuido directa o indirectamente en este trabajo, les estaré siempre agradecida. Sus aportes han contribuido en mi formación académica y en el desarrollo de este trabajo.

Contenido

CAPÍTULO 1	13
INTRODUCCIÓN	13
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
RESUMEN GRÁFICO	15
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo General	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 REVISIÓN DE LITERATURA	18
1.3.1 Uso de alcoholes en motores diesel	18
1.3.2 Sistemas de control para disminuir emisiones contaminantes de motores diesel usando algoritmos de inteligencia computacional	20
1.3.3 Consideraciones para la fumigación de alcoholes e inteligencia artificial en vehículos	24
1.4 Aportes del trabajo de doctorado	25
1.5 Organización de la memoria	26
CAPÍTULO 2	27
Estimación de tiempos de inyección de etanol para motor diésel en banco de ensayos	27
2.1 Pruebas estacionarias de motor en banco de ensayos	28
2.1.1 Mapeo del motor	28
2.2 Instalación experimental en banco de pruebas	32
2.3 Algoritmo de clasificación difuso	33
2.3.1 Clasificador	33
2.3.2 Criterio LAMDA-FAR	35
2.3.3 Zonas de inyección	36
2.3.4 Estimador (Modelo Lineal afín)	38
2.3.5 Sistema de inyección de etanol y sensores	38
CAPÍTULO 3	40
Metodología para la inyección de etanol en un vehículo diesel sobre banco de rodillos	40
3.1 Emisiones de NOx, PN y eficiencia	41
3.2 Índice de sustitución	42
3.3 Estimador Takagi-Sugeno	42

3.4 Pruebas dinámicas de vehículo en banco de rodillos.....	43
3.4.1 Especificaciones técnicas del vehículo de pruebas y del freno dinamométrico de rodillos	43
3.4.2 Cálculo de la relación Potencia-Masa (PMR).....	44
3.4.3 Cálculo de la potencia resistiva en el rodillo	45
3.5 Experimentación.....	46
CAPÍTULO 4	51
Resultados y discusión de la metodología desarrollada en banco de ensayos.....	51
4.1 Resultados de motor en banco de ensayos.....	52
4.1.1 Emisiones de THC	52
4.1.3 Emisiones de PN	54
4.1.4 Eficiencia energética.....	55
4.1.5 Resultados del clasificador difuso.....	56
4.1.6 Zonas de inyección de etanol.....	60
4.1.7 Tiempos de inyección de etanol	61
CAPÍTULO 5	64
Resultados y discusión de la metodología desarrollada en banco de rodillos.....	64
5.1 Resultados de mediciones en vehículo en banco de rodillos	65
5.1.1 Repetibilidad del Ciclo WLTC clase 1	65
5.1.2 Consumo de combustible.....	66
5.1.3 Emisiones de NOx.....	66
5.1.4 Emisiones de PN	69
5.1.5 Aplicación del índice de sustitución.....	71
5.1.6 Tiempos de inyección de etanol en vehículo.....	73
CAPÍTULO 6	77
Conclusiones y trabajos futuros.....	77
6.1 Aportes de la tesis por objetivo	79
6.2 Trabajos futuros.....	79
Anexo A.....	81
Selección de los modos de operación por dinámica longitudinal para pruebas en motor.....	81
Anexo B	89
Sistema electrónico de inyección de etanol	89
B.1 Caracterización de los sensores usados para medir las variables de entrada al sistema de clasificación difuso.....	90

B.1.1 Señal de posición de cigüeñal y señal de posición del árbol de levas	91
B.1.2 Posición del acelerador	91
B.1.3 Temperatura de gases de escape	91
B.1.4 Velocidad del motor	92
B.2 Diseño de la tarjeta electrónica en PCB (Printed Circuit Board).....	93
B.3 Implementación de las tarjetas electrónicas	95
B.4 Disposición final del sistema electrónico	97
Equipos de medición	99
C.1 Equipos de medición para pruebas en motor	99
C.1.1 Consumo de combustible.....	99
C.1.2 Emisiones de NOx.....	99
C.1.3 Emisiones de partículas.....	100
C.1.4 Emisiones de hidrocarburos totales (THC)	100
C.2 Equipos de medición para pruebas en vehículo.....	101
C.2.1 Emisiones de gases	101
C.2.2 Relación Aire/Combustible	102
C.2.3 Consumo de etanol	102
C.2.4 Banco de rodillos	103
Anexo D.....	104
Pruebas de repetibilidad de la instalación experimental fumigando etanol	104
D.1 Pruebas de repetibilidad estadística de las instalaciones experimentales fumigando etanol	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

Lista de figuras

Figura 2.1	Diagrama de bloques del sistema de inyección de etanol.....	28
Figura 2.2	Montaje del riel de inyección de etanol en el motor de ensayo	29
Figura 2.3	Puntos de operación del ciclo de conducción WLTC en el motor CUMMINS.....	30
Figura 2.4	División de datos para entrenamiento y validación	32
Figura 2.5	Instalación experimental en el banco de ensayos	33
Figura 2.6	Representación de las distancias máximas y mínimas en una clase halladas con LAMDA-FAR	36
Figura 2.7	Metodología para la clasificación y estimación de los tiempos de inyección.....	39
Figura 3.1	Diagrama del sistema de inyección de etanol implementado en el vehículo	41
Figura 3.2	Ciclo de prueba WLTC clase 1	45
Figura 3.3	Dimensiones frontales del vehículo sin protuberancias expresadas en [cm].....	46
Figura 3.4	Motor del vehículo con múltiple de admisión modificado	47
Figura 3.5	Vehículo de prueba sobre dinamómetro de rodillos	47
Figura 3.6	Instalación experimental del vehículo en banco de rodillos.....	48
Figura 3.7	Metodología para la clasificación y estimación de los tiempos de inyección.....	50
Figura 4.1	Emisiones específicas de Hidrocarburos (THC).....	52
Figura 4.2	Emisiones específicas de NOx	53
Figura 4.3	Emisiones específicas de PN	54
Figura 4.4	Eficiencia energética del motor	55
Figura 4.5	Etapa de entrenamiento para DC con LAMDA y LAMDA-FAR	56
Figura 4.6	Etapa de validación para DC con LAMDA y LAMDA-FAR	57
Figura 4.7	Etapa de validación para E10 con LAMDA y LAMDA-FAR.....	58
Figura 4.8	Etapa de validación para E20 con LAMDA y LAMDA-FAR.....	59
Figura 4.9	Etapa de validación para E30 con LAMDA y LAMDA-FAR.....	59
Figura 4.10	Zonas de inyección E10.....	60
Figura 4.11	Zonas de inyección E20.....	61
Figura 4.12	Zonas de inyección E30.....	61
Figura 4.13	Tiempos de inyección estimados para E10 usando MLA.....	62
Figura 4.14	Tiempos de inyección estimados para E20 usando el MLA	63
Figura 4.15	Tiempos de inyección estimados para E30 usando MLA.....	63
Figura 5.1	Seguimiento del ciclo de conducción WLTC clase 1.....	65
Figura 5.2	Consumo de combustible acumulado.....	66
Figura 5.3	Emisiones de NOx	67
Figura 5.4	Emisiones de NOx para la primera fase baja del ciclo WLTC clase 1	68
Figura 5.5	Emisiones de NOx para la fase media del ciclo WLTC clase 1	68
Figura 5.6	Emisiones de NOx para la segunda fase baja del ciclo WLTC clase 1.....	69
Figura 5.7	Emisiones de PN.....	69
Figura 5.8	Emisiones de PN para la primera fase baja del ciclo WLTC clase 1.....	70
Figura 5.9	Emisiones de PN para la fase media del ciclo WLTC clase 1	70
Figura 5.10	Emisiones de PN para la segunda fase baja del ciclo WLTC clase 1	71
Figura 5.11	Emisiones y eficiencia para establecer el índice de emisión	72
Figura 5.12	Tiempos de inyección de etanol para prueba E2.....	74
Figura 5.13	Tiempos de inyección de etanol para prueba E4.....	74

Figura A.1 Ciclo de conducción y el resultado obtenido para este ciclo usando un modelo de simulación de automoción.....	82
Figura A.2 Ciclo WLTC con secuencias de aceleración positivas detectadas para velocidades menores a 80 km/h.....	83
Figura A.3 Caja de cambios.....	84
Figura A.4 Velocidad del motor en secuencias de aceleración positivas detectadas.....	84
Figura A.5 Grado de carga en secuencias de aceleración positivas detectadas.....	84
Figura A.6 Valores del coeficiente de inercia rotacional K_m respecto a α . Imagen tomada de [57].	85
Figura A.7 Histogramas de frecuencia para la velocidad y el grado de carga del motor.....	86
Figura A.8 Histogramas de frecuencia 3D para la velocidad y el grado de carga del motor y la proyección sobre su mapa de intensidad o calor.....	87
Figura A.9 Modos de operación del motor.....	87
Figura A.10 Modos de operación en el plano 3D: Velocidad vehículo-Velocidad motor-Par.....	88
Figura B.1 Esquema de interconexión electrónico del sistema de control de inyección de etanol.	90
Figura B.2 Circuito Comparador.....	91
Figura B.3 Circuito Buffer.....	91
Figura B.4 Curva característica de la señal de posición del acelerador.....	91
Figura B.5 Sensor de temperatura.....	92
Figura B.6 Curva característica del sensor de temperatura de gases de escape.....	92
Figura B.7 Conversor de Frecuencia-Voltaje.....	93
Figura B.8 Curva característica de la señal de velocidad del motor.....	93
Figura B.9 Diseño de la tarjeta final en EAGLE.....	94
Figura B.10 Diseño de la tarjeta de acondicionamiento de los descriptores.....	94
Figura B.11 Tarjeta electrónica implementada con Arduino MEGA 2560.....	95
Figura B.12 Tarjeta electrónica implementada para los descriptores del sistema.....	95
Figura B.13 Sistema electrónico embebido. Microcomputador LattePanda.....	96
Figura B.14 Contenedor de la LattePanda y sistema de fumigación electrónico de etanol definitivo.....	97
Figura B.15 Conexiones de la ECU del sistema electrónico de fumigación de etanol	98
Anexo C	
Figura C.1 Balanza gravimétrica para medir consumo de diesel.....	99
Figura C.2 Analizador de gases para medir NOx.....	99
Figura C.3 Sensor para medir material particulado.....	100
Figura C.4 Analizador de hidrocarburos totales (THC).....	101
Figura C.5 Equipo de medición e interfaz gráfica parSYNC.....	101
Figura C.6 Equipo de medición relación aire/combustible.....	102
Figura C.7 Equipo de medición del consumo de etanol.....	102
Figura C.8 Dinamómetro MD-RG-3000 HP – MUSTANG.....	103
Figura D.1 Velocidad del motor [rpm].....	105
Figura D.2 Potencia [kW].....	105
Figura D.3 Par [Nm].....	105
Figura D.4 Consumo de combustible [mg/s].....	105
Figura D.5 Consumo de aire [g/s].....	105
Figura D.6 Consumo de etanol [mg/s].....	105
Figura D.7 Temperatura de gases de [°C].....	105
Figura D.8 Posición del acelerador [%].....	105

Figura D.9 Tiempo de inyección de etanol [ms]	105
Figura D.10 Velocidad del motor [rpm]	106
Figura D.11 Potencia [kW]	106
Figura D.12 Par [Nm].....	106
Figura D.13 Consumo de combustible [mg/s]	106
Figura D.14 Consumo de aire [g/s]	106
Figura D.15 Consumo de etanol [mg/s]	106
Figura D.16 Temperatura de gases de [°C]	106
Figura D.17 Posición del acelerador [%]	106
Figura D.18 Tiempo de inyección de etanol [ms]	106

Lista de tablas

Tabla 2.1 Conformación de la base de datos	27
Tabla 2.2 Especificaciones técnicas del motor Cummins	28
Tabla 2.3 Modos de operación medidos	31
Tabla 2.4 Zonas de inyección para porcentaje de sustitución de 10%	36
Tabla 2.5 Zonas de inyección para porcentaje de sustitución de 20%	37
Tabla 2.6 Zonas de inyección para porcentaje de sustitución de 30%	37
Tabla 3.1 Especificaciones técnicas del banco de rodillos	43
Tabla 3.2 Especificaciones técnicas del vehículo	43
Tabla 3.3 Ciclos de prueba WLTC	44
Tabla 3.4 Ciclos de prueba WLTC clase 1	44
Tabla 3.5 Potencia en función del área frontal de la protuberancia	46
Tabla 3.6 Pruebas realizadas en banco de rodillos	48
Tabla 4.1 Valores medidos para los modos de operación M5 y M6 usando DC	57
Tabla 4.2 Valores medidos para los modos de operación M5 y M6 usando E10	58
Tabla 4.3 Valores medidos para los modos de operación M5, M17, M19 y M22 usando E30	60
Tabla 5.1 Índices de sustitución para cada modo de operación y combustible	73
Tabla 5.2 Tiempo de inyección medido para el porcentaje de sustitución con mejor desempeño	75
Tabla 6.1 Contribuciones de la investigación	80
Tabla A.1 Características técnicas del motor y del vehículo de pruebas	81
Tabla C.1 Especificaciones técnicas de la balanza	99
Tabla C.2 Especificaciones técnicas del analizador de gases	100
Tabla C.3 Especificaciones técnicas del sensor para medir PM	100
Tabla C.4 Especificaciones técnicas del THC	101
Tabla C.5 Especificaciones técnicas del ParSYNC	101
Tabla C.6 Especificaciones técnicas del MEXA-730λ-HORIBA	102
Tabla C.7 Especificaciones del flujómetro másico SITRANS FCT030	103

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

RESUMEN

Los biocombustibles como sustituto parcial de los combustibles fósiles no renovables, han permitido disminuir emisiones gaseosas y de material particulado (PM) en motores diesel, reduciendo su impacto negativo en el ambiente y en la salud pública [1]. En particular, los alcoholes representan una alternativa viable en la sustitución parcial del diesel, debido a que pueden mezclarse fácilmente con combustibles fósiles. Adicionalmente, al ser oxigenados, permiten reducir simultáneamente las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y de PM, contaminantes críticos que resultan del proceso de combustión en motores de encendido por compresión [2].

Con base en lo anterior, en este trabajo se propuso una metodología que permite estimar los tiempos de inyección y controlar autónomamente el sistema de suministro de combustible secundario (etanol hidratado) de un motor diesel de automoción, con el objeto de inyectar en modo dual, combustible diesel + etanol, y procurar reducir las emisiones contaminantes, manteniendo (o mejorando) el desempeño energético del motor medido en términos de la potencia efectiva sobre el eje del motor (pruebas estacionarias en banco de ensayos) y en la rueda del vehículo (pruebas dinámicas en banco de rodillos). Para la implementación de la metodología propuesta, se desarrolló un sistema electrónico de inteligencia computacional basado en el algoritmo de agrupamiento difuso LAMDA-FAR [3], el cual fue entrenado con un histórico de datos que contenía variables representativas de la operación del motor y emisiones de NOx y PM. Este sistema estima automáticamente, y durante el funcionamiento del motor, no sólo los tiempos de apertura de los inyectores de etanol para cada estado funcional del sistema, sino también los porcentajes de sustitución de combustible en base energética (0%, 10%, 20%, 30%) adecuados, tanto para pruebas estacionarias sobre un motor en banco de ensayos, como para un vehículo montado sobre un banco dinamométrico de rodillos, siguiendo el ciclo de conducción WLTC (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles*) clase 1.

De las pruebas realizadas, mediante la implementación del algoritmo de clasificación difuso, se logró la identificación adecuada de cada estado funcional del motor/vehículo, y el control del sistema de inyección de etanol. Respecto a las emisiones contaminantes de NOx, en las pruebas estacionarias realizadas en 22 modos de operación diferentes, se observó que, a baja carga, las emisiones disminuyen en la medida que el porcentaje de sustitución aumenta respecto al diesel. Para modos de operación medidos a carga media, no se observó una tendencia clara en el incremento o disminución de este contaminante respecto al combustible usado, ya que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre ellos. Finalmente, para los modos de operación medidos a carga alta, no se observó una tendencia clara de estas emisiones con el contenido de etanol. Para las emisiones de PN, se observó que independiente del grado de carga, tienden a disminuir al aumentar el porcentaje de sustitución de etanol respecto al diesel.

En cuanto a las pruebas dinámicas en banco de rodillos, se encontró una disminución en las emisiones acumuladas de NOx durante el seguimiento del ciclo de conducción, así como un incremento en las emisiones de PN, presentándose la mayor producción de este contaminante en la prueba de arranque en frío.

En cuanto a la eficiencia energética, se encontró que, esta disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución, respecto a cuando el motor opera usando sólo diesel comercial. Esto se debe a que, al medir a igualdad de potencia en el eje del motor, se requiere mayor cantidad en volumen de alcohol (aproximadamente el doble) respecto al porcentaje de combustible diesel sustituido. Esto se debe al menor poder calorífico del etanol respecto al diesel.

Palabras clave: Inyección de etanol, Motores diesel, Clasificadores difusos.

ABSTRACT

Biofuels as a partial substitute for non-renewable fossil fuels have allowed to decrease gaseous emissions and particulate matter (PM) in diesel engines, reducing their negative impact on the environment and public health [1]. Specifically, alcohols represent a viable alternative for partial substitution of diesel fuel, due it can be easily blended with fossil fuels. Additionally, due to their oxygenation properties, they enable the simultaneous reduction of nitrogen oxide (NOx) and PM emissions, critical pollutants resulting from the combustion process in compression-ignition engines [2].

Based on the aforementioned, in this work was proposed a methodology that enables the estimation of injection timings and to control autonomously the secondary fuel supply system (hydrated ethanol) in an automotive diesel engine, in order to inject in a dual mode, diesel fuel + ethanol, aiming to reduce pollutant emissions while maintaining (or improving) the engine's energy performance, measured in terms of effective power on the engine shaft (stationary tests on a test bench) and on the vehicle wheel (dynamic tests on a roller bench). To implement the proposed methodology, an electronic computational intelligence system based on the LAMDA-FAR fuzzy clustering algorithm [3], which was trained using a historical dataset containing representative variables of the engine's operation and NOx and PM emissions. This system estimates automatically, during engine operation, not only the ethanol injector opening times for each functional state of the system, but also the energy-based fuel substitution percentages (0%, 10%, 20%, 30%) suitable for stationary tests on an engine test bench and for a vehicle mounted on a roller dynamometer, following the Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles (WLTC) Class 1 driving cycle.

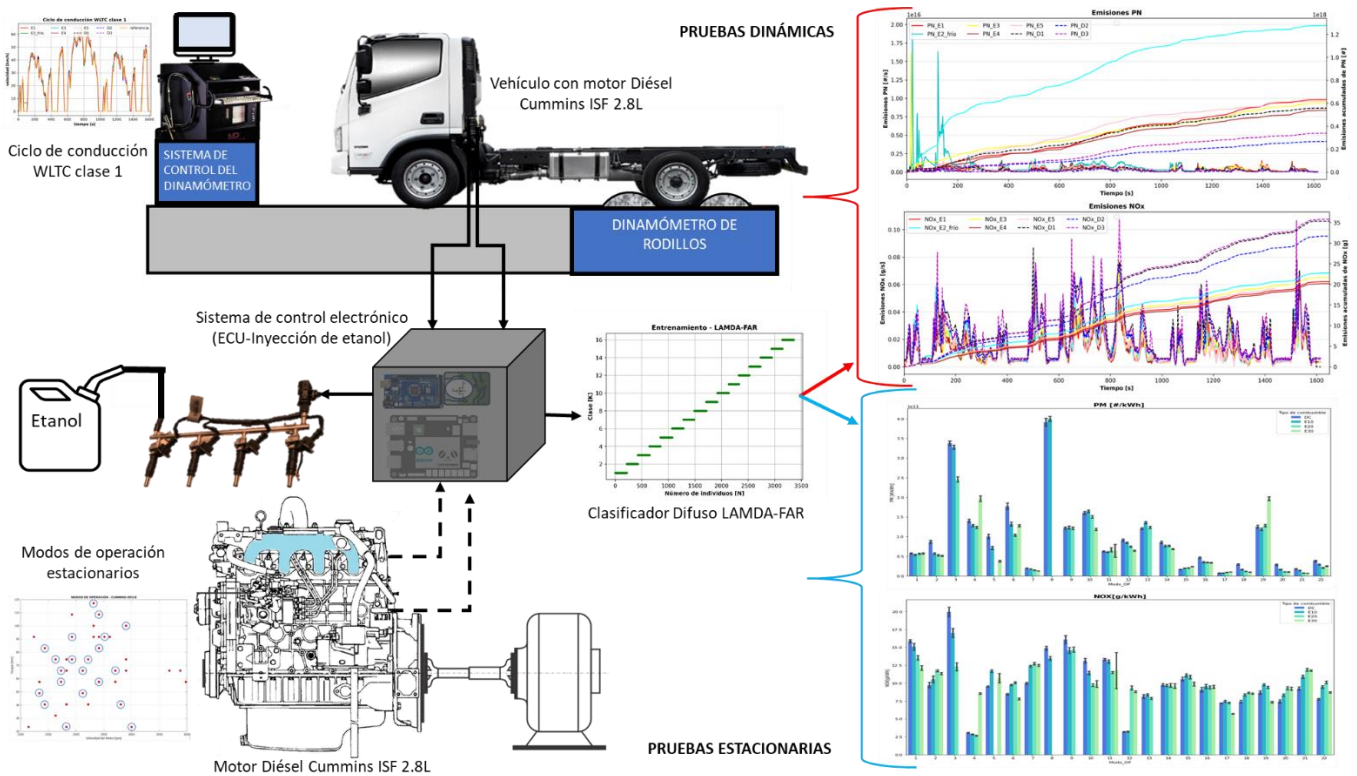
Through the implementation of the fuzzy clustering algorithm, the performed tests achieved the proper identification of each functional state of the engine/vehicle and to control the ethanol injection system. Regarding the emissions of NOx, in the stationary tests conducted in 22 different operating modes, it was observed that at low load, emissions decrease as the percentage of ethanol substitution increases compared to diesel. For operating modes measured at medium load, no clear trend was observed in the increase or decrease of this pollutant concerning the fuel used, as there is no statistically significant difference between them. Finally, for operating modes measured at high load, no clear trend was observed for these emissions with the ethanol content. Regarding PN emissions, it was observed that regardless of the load level, they tend to decrease as the percentage of ethanol substitution increases compared to diesel.

Regarding the dynamic tests on the roller bench, a decrease in cumulative NOx emissions was found during the driving cycle, along with an increase in PN emissions, with the highest production of this pollutant occurring during the cold start test.

Regarding energy efficiency, it was found that it decreases as the substitution percentage increases compared to when the engine operates using only commercial diesel. This is because, when measuring at the same power at the engine shaft, a larger volume of alcohol (approximately double) is required compared to the percentage of diesel fuel substituted. This is due to the lower calorific value of ethanol compared to diesel.

Keywords: Ethanol injection, Diesel engines, Fuzzy classifiers.

RESUMEN GRÁFICO



1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las fuentes de energía renovable son una alternativa para la sustitución total o parcial de los combustibles fósiles convencionales, ya que estos últimos son responsables, en una gran proporción, de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, las cada vez más estrictas regulaciones ambientales respecto al uso de este tipo de combustibles y su elevado costo, se han convertido en factores importantes para tomar decisiones respecto a la necesidad de migrar hacia el uso de energías renovables, buscando reducir la huella de carbono [4].

Los motores diesel son responsables de emitir altas concentraciones de óxidos de nitrógeno (NOx) y de material particulado (PM), contaminantes que resultan del proceso de combustión, y que han demostrado ser altamente nocivos para la salud [1]. Como alternativa al uso de combustibles fósiles, se han llevado a cabo estudios sobre el uso de recursos renovables, como los alcoholes, para realizar sustituciones parciales de combustible en motores diesel, encontrando una reducción de PM debido a su alta volatilidad y fácil oxidación [5]. También se ha evidenciado una reducción de NOx debido a la menor temperatura en el cilindro cuando se inyecta etanol hidratado, lo anterior a razón de la entalpía de evaporación de los alcoholes [6], [7]. Otros estudios han comparado el proceso de combustión en motores de encendido por compresión usando fumigación de alcoholes, donde se inyecta el combustible directamente en el múltiple de admisión del motor, respecto al uso de combustible diesel convencional [8]. Los resultados muestran una reducción de hasta el 90% en las emisiones de NOx, cuando se utiliza el combustible dual (diesel + etanol) y, a baja carga, se ha observado una reducción simultánea de NOx y PM. Por otro lado, el consumo específico de combustible generalmente aumenta con el uso de alcoholes en motores de combustión interna, esto debido a que el poder calorífico del combustible diésel es casi del doble respecto al del etanol [9].

El uso de algoritmos de inteligencia computacional en motores diesel ha sido una herramienta importante en el estudio del desempeño, la predicción de emisiones contaminantes, y el desarrollo de estrategias para controlar tiempos de inyección, permitiendo establecer criterios de decisión para estos sistemas complejos [10]. En el caso particular del algoritmo de agrupamiento difuso LAMDA, ha sido posible estimar los tiempos de apertura de los inyectores del sistema de suministro de etanol para realizar sustituciones en energía del combustible fósil, aún en modos de operación que no se midieron durante la etapa de entrenamiento del algoritmo [3]. Sin embargo, en este trabajo no se midieron emisiones contaminantes como soporte para sustentar la decisión de inyectar o no etanol como criterio de tipo ambiental y de salud pública. Por otro lado, todas las mediciones las realizaron en estado estacionario cuando es importante contar con un sistema que tome decisiones en línea (tiempo real) bajo condiciones dinámicas.

El desarrollo de un sistema de inyección electrónico para fumigación de etanol en motores diesel de automoción, usando algoritmos de inteligencia computacional, que no sólo se implemente en motores diesel operando en estado estacionario, sino que también se pueda validar en condiciones dinámicas en un vehículo diesel, constituye un aporte importante en el uso de combustibles alternativos. Un sistema de este tipo decide en tiempo real y de forma autónoma inyectar o no etanol, buscando minimizar las emisiones contaminantes, maximizar o mantener la eficiencia energética del sistema, y reducir la huella de carbono producida por los combustibles fósiles.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología para estimar en línea los tiempos de inyección de etanol hidratado en motores diesel de automoción, y validarla a partir de su relación con el desempeño del motor/vehículo y con la reducción de las principales emisiones contaminantes.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar un algoritmo de clasificación difusa para estimar los tiempos de inyección de etanol en un motor diesel de automoción en operación estacionaria, buscando reducir las emisiones de NOx y de PM, así como tener buen desempeño energético.
2. Desarrollar una metodología para mapear el vehículo de pruebas, con el fin de estimar los tiempos de inyección de etanol a partir de parámetros de operación y medición de PM.
3. Desarrollar un algoritmo de inteligencia computacional para estimar los tiempos de inyección de alcohol en un vehículo en ruta, teniendo en cuenta las emisiones de PM y el desempeño energético.

1.3 REVISIÓN DE LITERATURA

1.3.1 Uso de alcoholes en motores diesel

Los alcoholes han surgido como alternativa para reemplazar parcialmente el uso de combustibles derivados del petróleo. En el caso particular del etanol, su disponibilidad, así como su fácil almacenamiento y manejo, lo hacen atractivo como combustible alternativo. Adicionalmente, el uso de etanol hidratado ha mostrado un incremento de hidrocarburos no quemados (HC) y monóxido de carbono (CO) a bajas cargas del motor debido a una evaporación incompleta del alcohol, y una reducción significativa de bióxido de carbono (CO₂) y partículas [11]. También se ha observado un incremento en el consumo específico de combustible, debido al menor poder calorífico del alcohol, respecto al diesel convencional [12]. Además, teniendo en cuenta que el uso del etanol se ha incrementado en el sector transporte en Colombia y otros países de América Latina, se sugiere realizar investigaciones sobre los efectos de usar etanol en combinación con combustibles fósiles tradicionales, para estudiar el rendimiento del motor, los parámetros de combustión, y emisiones como el número de partículas (PN) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), entre otros [13]. En general, el uso de biocombustibles ha demostrado un gran potencial para disminuir emisiones y mejorar la eficiencia energética [7].

Las sustituciones en energía de diesel por etanol pueden realizarse a través de diferentes métodos, como mezcla o fumigación. La mezcla es una de las formas de sustitución energética menos compleja, y consiste en combinar combustible diesel con una determinada cantidad de alcohol, directamente en el tanque de almacenamiento del combustible. En este caso, considerando el uso de etanol hidratado, cuyo proceso de producción es menos costoso que el del alcohol anhidro, la presencia de agua en la mezcla y los cambios de temperatura pueden causar separación de fases y producir un efecto corrosivo, tanto en el tanque de almacenamiento de combustible, como en el motor. La solución a este inconveniente sugiere el uso de aditivos en la mezcla, que podrían cambiar las propiedades químicas del combustible diesel [2]. Otra alternativa para el uso de alcoholes como fuente renovable es la fumigación. En este caso, el etanol hidratado se inyecta directamente en el múltiple de admisión del motor, método que ha demostrado ser uno de los más eficientes cuando se utiliza alcohol en motores diesel [14].

Un estudio reciente reporta la reducción simultánea de NO_x y PM al usar etanol, además de una disminución en el diámetro de las partículas de hollín [15]. En este caso, se realizó mezcla directa de etanol anhidro con combustible diesel en un motor de automoción, turbo cargado de inyección directa de primera generación. Se encontró que la adición de etanol retrasó el inicio de la combustión, aumentó la tasa de liberación de calor (HRR *Heat Release Rate*, por sus siglas en inglés), y redujo la duración de la combustión, debido al alto calor latente de evaporación y al bajo número de cetano del etanol.

Jamuwa y colaboradores en 2016 [16] realizaron fumigación de etanol a diferentes caudales, encontrando que, la eficiencia térmica del motor mono cilíndrico utilizado, disminuye hasta en un 11,2% a baja carga, debido al deterioro de la combustión, mientras que para cargas altas, dicha eficiencia mejora hasta en un 6%, en comparación con el combustible diesel puro. Se encontró una reducción de aproximadamente un 22% en las emisiones de NO_x, de 41% en la opacidad de humo, y de 27% en las emisiones de CO₂. Por otro lado, las emisiones de CO y HC aumentaron simultáneamente a baja carga para los diferentes caudales de fumigación de etanol, debido a los cambios en la temperatura de combustión, el número de cetano, el retardo de ignición y la disminución en la duración de la combustión. Adicionalmente, al fumigar etanol, se observó un

incremento en la tasa de liberación de calor y en el coeficiente de variación de la presión media efectiva (MEP por sus siglas en inglés) que permite determinar la estabilidad en la operación del motor. De esta forma, al operar un motor diesel con etanol en modo de combustible dual, se logra obtener mejores características de rendimiento y disminución de algunas emisiones en comparación con el combustible diesel de referencia, pero el funcionamiento del motor se vuelve inestable al incrementarse la tasa de fumigación de etanol, provocando una mayor variabilidad de la combustión. El estudio anterior se realizó en un motor diesel de un sólo cilindro operando bajo condiciones estacionarias y con una cilindrada de 0.553 L.

La fumigación de alcoholes primarios también se ha extendido al uso de motores diesel agrícolas, como se indica en el trabajo de Kumar *et al.* [17], allí se fumigó metanol a una velocidad constante de 1500 rpm y varios grados de carga (1.25, 2.50, 3.75, 5 bar de MEP) y se observó que el precalentamiento del aire de admisión influyó tanto en la combustión como en el rendimiento y las emisiones del motor. Esto se debe a que una temperatura de admisión de aire más alta compensa el efecto de enfriamiento debido a la evaporación del metanol causada por una menor duración de la combustión, lo que lleva a una conversión de energía más eficiente. Por otro lado, esta temperatura afectó significativamente las características del motor diesel al operar en modo dual (metanol + diesel). Respecto a las emisiones, el incremento de HC, CO y la reducción de NOx se presentó en todas las cargas. Cabe resaltar que el metanol tiene un contenido energético ligeramente menor que el etanol (metanol: 22.7 MJ/l, etanol: 26.8 MJ/l aproximadamente). En cuanto a la entalpía de vaporización, el metanol también tiene un valor ligeramente menor que el etanol (metanol: 36 kJ/mol, etanol: 38.6 kJ/mol aproximadamente).

Para determinar el rango de operación viable del uso de alcoholes en motores diesel, Wang *et al.* [18] estudió el efecto de la variación de la carga (desde 6% hasta 100%) y el porcentaje de sustitución de metanol inyectado en el múltiple de admisión (desde 0% hasta 76%) sobre las prestaciones mecánicas del motor, en este caso realizó mediciones a una velocidad constante de 1400 rpm. Este estudio fue realizado sobre un motor diésel de 6 cilindros de inyección directa y turbo cargado donde fue posible identificar rangos de operación eficientes y rangos donde la inyección de metanol estaba limitada por aspectos como combustión deficiente, detonación, y otras anomalías. Sin embargo, en este estudio no se consideró el efecto de la fumigación de alcohol sobre las emisiones contaminantes.

Otro estudio sobre uso de etanol combinado o mezclado con biodiesel en motores de cuatro cilindros de automoción, ha mostrado reducción en la emisión de partículas y CO₂, mientras que las emisiones de NOx aumentaron y la eficiencia del motor se incrementó [19]. El estudio anterior se realizó a carga constante (140 Nm) y para sólo 3 velocidades (1000 rpm, 1500 rpm y 2000 rpm).

También se ha encontrado que, en comparación con el diesel puro, la adición de alcoholes primarios (metanol, etanol y n-butanol) disminuye significativamente el pico de presión del cilindro (P_{max}) como lo argumentan Ning *et al.* en [20]. Lo anterior se debe a que estos combustibles tienen entalpías de evaporación altas respecto al diesel, lo que reduce la temperatura y la presión en el cilindro, debido al efecto de enfriamiento. Los resultados de este estudio respecto a la duración de la combustión indican que, a mayor porcentaje de sustitución, menor es la duración de la combustión. Esto debido al mayor contenido de oxígeno de los alcoholes, lo que lleva a una mayor eficiencia en la combustión. Respecto a las emisiones, el hollín se reduce con el uso de alcoholes, ya que el grupo OH de la estructura molecular del alcohol promueve su oxidación. Sin embargo, estas

emisiones de hollín también pueden verse afectadas por otros parámetros como viscosidad, número de cetano, y contenido de carbono en el combustible, entre otras. Para el caso de las emisiones de NO_x, el uso de alcohol disminuye la temperatura en el cilindro, y en la medida en que se inyecta un mayor porcentaje de alcohol, se hace más evidente la reducción de NO_x, por efecto de reducción de temperatura. Este estudio se hizo para diferentes porcentajes de mezclas (0%, 10%, 20%, 30% y 40%), para una sola velocidad (2500rpm), y para un solo grado de carga.

Ghadikolaei [21] realizó un revisión sobre las emisiones reguladas y no reguladas en motores diesel al usar alcoholes (metanol y etanol), tanto en modo mezcla, como en modo fumigación. En general se reporta un aumento de las emisiones de CO y HC al usar alcohol en modo fumigación, mientras que en modo mezcla hubo reducción respecto al uso de diesel. El PM presentó una disminución tanto en modo fumigación como en modo mezcla, en comparación con el combustible fósil. Las emisiones de CO₂ y de NO_x presentaron una reducción en modo fumigación, y un incremento en el modo mezcla. En cuanto a las emisiones no reguladas, los carbonilos totales y el formaldehído se incrementan al usar alcoholes, independiente del modo en el que se administren (mezcla o fumigación). En otras investigaciones sobre fumigación de alcoholes, como el n-butanol y su efecto en las emisiones reguladas y no reguladas (Gowtham *et al.* [22]), se encuentran resultados similares (aumento de HC, CO, formaldehído y acetona) al incrementarse el porcentaje de alcohol, este estudio se realizó en un motor de un solo cilindro. En general, la cantidad de emisiones de carbonilos se incrementan al reemplazar diesel por etanol fumigado como también lo plantean Jimenez *et al.* en [23].

Para el caso del metanol, Pandey *et al.* [24] estudiaron su efecto en motores de combustión interna en modo mezcla y fumigación, resaltando su potencial como combustible oxigenado en la reducción de emisiones contaminantes. Por otro lado, Ghadikolaei *et al.* [25] investigaron sobre los efectos de usar diesel, mezcla de diesel con etanol, y fumigación de etanol sobre las propiedades químicas y la composición de PM en un motor diesel de 4 cilindros. La experimentación se realizó a baja y alta velocidad (1400 y 2200 rpm) y para cargas del 20% y el 80%. Con el modo mezcla se obtuvo una eficiencia térmica (BTE por sus siglas en inglés) más alta que en el modo de fumigación.

Telli *et al.* [26] experimentaron sobre un motor mono cilíndrico, inyectando etanol hidratado para cuatro grados de carga, a una velocidad constante de 1800 rpm. La sustitución de etanol varió entre 0% y 52%, debido a que para valores superiores se presentaba *knocking* (detonación por autoencendido prematuro de la mezcla). La inyección de etanol se realizó con una unidad de control electrónica que controlaba el tiempo de apertura del inyector (2 ms, 3.4 ms, 4.78 ms y 6.16ms). Los resultados muestran que el uso de etanol hidratado redujo la opacidad de humo para porcentajes de sustitución altos. Por otro lado, a carga alta se presentó una mejor eficiencia, un consumo de combustible mínimo, y una disminución importante de la opacidad de humo.

1.3.2 Sistemas de control para disminuir emisiones contaminantes de motores diesel usando algoritmos de inteligencia computacional

La necesidad de evaluar y predecir el efecto de usar energías renovables en los motores de combustión sobre las emisiones contaminantes como PM y NO_x, entre otras, ha requerido el uso de sistemas de control de lazo abierto, como se evidencia en el trabajo de Pandey *et al.* en 2019 [27]. En esta investigación, se modificó la duración del pulso del inyector, para lograr una combustión controlada por premezcla – PCCI (*Premixed Charge Compression Ignition*, por sus siglas en inglés) para cuatro grados de carga. El resultado fue una reducción simultánea de NO_x y PM, pero

dependiendo del grado de carga, un aumento de CO y HC. En este trabajo no se implementaron técnicas de inteligencia computacional para controlar los tiempos de apertura de los inyectores. En el grupo de investigación de manejo eficiente de la energía - GIMEL de la Universidad de Antioquia, grupo donde se desarrolló esta tesis doctoral, se viene trabajando desde hace algunos años en la inyección de etanol hidratado, que inició con la tesis doctoral de A. López [28] y en la implementación de técnicas de inteligencia computacional para la inyección controlada de este alcohol como se presenta en la tesis doctoral de F. Ruiz [10]. Como producto de estos trabajos, López *et al.* [6] realizó fumigación para sustituciones energéticas del 10%, 15% y 20% de diesel por etanol hidratado, usando un sistema de control de lazo abierto en un motor de automoción operando en estado estacionario. Como resultado se halló una reducción simultánea de NOx y PM, y una reducción de CO y HC a baja carga. Este trabajo solo consideró dos modos de operación (velocidad vs. carga) del motor en estado estacionario. En cuanto al uso de sistemas de control de lazo cerrado para llevar a cabo la fumigación controlada de etanol de un motor diesel de automoción, Ruiz *et al.* [3] realizó una sustitución controlada y autónoma de la cantidad de etanol a inyectar en un motor Pre-Euro, según los modos de funcionamiento del motor. Para porcentajes de sustitución de diesel por etanol hidratado de 10%, 20% y 30%, se desarrolló un criterio para validar el algoritmo de clasificación difusa LAMDA (*Learning Algorithm Multivariable and Data Analysis*), denominado LAMDA-FAR. Este criterio se aplica para aquellos casos en los que los datos son similares, y por tanto las clases o estados (modos de operación) del motor se asemejan mucho entre sí. Esto implica que los grados de pertenencia de los datos a cada clase, presenten valores muy similares entre las diferentes clases lo cual podría llevar a una mala clasificación, dada la incertidumbre que presenta el sistema. Se obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto a los tiempos de inyección de etanol que requiere el motor, de acuerdo con su modo de operación, demostrando que la técnica de clasificación difusa es efectiva, incluso en modos de operación desconocidos, es decir, que no se consideraron en la etapa de entrenamiento del algoritmo. Los errores en los porcentajes de sustitución fueron en promedio de hasta 13%, con casos en los que se alcanzó un error máximo de hasta 40%. En este trabajo no se consideraron las emisiones contaminantes ni se realizaron pruebas dinámicas en vehículos con motores diésel de automoción lo que da paso a continuar con esta línea de investigación.

Otra extensión del algoritmo LAMDA, conocido como LAMDA-HAD, lo propone Morales *et al.* en su trabajo [29]. Esta extensión calcula un grado de adecuación (GAD) adaptativo de la clase de no identificación (NIC: *No Identification Class*) a cada clase, para evitar que los individuos que se clasificaron correctamente sean asignados a dicha clase NIC. Además, calcula la similitud entre el GAD de un individuo y todos los de cada clase para hacer una asignación más confiable. La extensión LAMDA-HAD fue comparada junto a LAMDA-FAR para clasificar los modos de operación de un motor diesel Pre-Euro. Los resultados muestran que LAMDA-HAD es mejor para casos donde las clases son desbalanceadas, es decir, que no tienen el mismo número de datos, mientras que LAMDA-FAR funciona mucho mejor para encontrar nuevas clases del sistema.

Se han realizado propuestas sobre el uso de diferentes técnicas de inteligencia computacional en la predicción de variables de interés para evaluar parámetros de funcionamiento y emisiones en motores diesel, dentro de ellas, las redes neuronales artificiales (ANN por sus siglas en inglés) como indica Veza *et al.* [30] en su revisión bibliográfica sobre este tema. Mahmodi *et al.* [31] en su publicación, usó ANN y metodologías de superficie de respuesta (RSM por sus siglas en inglés) como modelos de clasificación para agrupar combustibles puros y mezclas con biodiesel, en este caso, fue necesario el uso de varios sensores para detectar los diversos combustibles mezclados (biodiesel)

con diferentes volúmenes de diesel. Las ANN no sólo han sido utilizadas como modelos de clasificación sino también como modelos de predicción, este es el caso de Parlak *et al.* [32], donde hicieron predicción del consumo de combustible y de la temperatura de gases de escape al cambiar los tiempos de inyección del combustible, obteniendo un porcentaje de error relativo promedio de aproximadamente 2% con la red neuronal, respecto a los resultados experimentales en la predicción de los parámetros antes mencionados, a partir de los datos con los que el algoritmo fue entrenado. Por otro lado, Kenanoğlu *et al.* [33] muestra en su trabajo que, utilizando modelos de ANN, es posible reducir el consumo de tiempo y los costos experimentales en la estimación de ciertas variables (par, potencia y emisiones de NOx) de un motor de combustión interna impulsado por combustibles alternativos. Como modelos de predicción y/o estimación, también se han usado otras herramientas de inteligencia computacional como algoritmos genéticos (GA por sus siglas en inglés), algoritmos por nube de partículas (PSO - *particle swarm Optimization*, por sus siglas en inglés), o combinaciones de éstos para hacer predicción de emisiones, predicción de consumo de combustible, y estimación de rendimiento en motores diesel como sugiere Sujesh *et al.* [34] en su revisión bibliográfica y Silitonga *et al.* [35] en su publicación. Sin embargo, en estos trabajos se usa sólo combustible diesel o mezclas diesel + etanol, sin incluir la fumigación, y las herramientas computacionales utilizadas (GA y PSO) funcionan básicamente como algoritmos de optimización.

Las ANN se han combinado con el método de optimización de colonias de hormigas (ACO) como en el trabajo desarrollado por Mohammadhassani *et al.* [36] para mejorar las condiciones de operación del motor y reducir las emisiones de NOx y hollín en un motor diesel de automoción. Esta combinación presentó una velocidad de convergencia mayor respecto a combinaciones de ANN con GA. Por otro lado, Singh *et al.* en [37] sugiere otra combinación (técnicas neuro-difusas con GA) para predecir rendimiento y emisiones contaminantes en motores que operan con biodiesel. Los algoritmos de aprendizaje profundo basados en ANN, también han permitido predecir emisiones de NOx en motores diesel de automoción con alta precisión, como lo presenta Yu *et al.* en [38], en este estudio, los datos de entrenamiento se adquirieron a través de una plataforma de monitoreo de vehículos diésel en tiempo real, utilizando la tecnología de servicio general de paquetes vía radio (GPRS por sus siglas en inglés), pero no se hace control inteligente sobre las emisiones con el fin de reducirlas.

Bhowmik *et al.* [39] integraron la teoría de las ANN con la lógica difusa, para seleccionar la topología óptima de una red que permitiera predecir los parámetros de entrada (par y mezcla diésel - queroseno) y de salida (eficiencia, consumo, NOx, HC y CO) de un motor diésel con alta precisión. Encontraron que el número de neuronas influye en el grado de dificultad del algoritmo para tomar decisiones respecto al comportamiento y las emisiones de dicho motor operando con una mezcla diesel-queroseno. Se observó que, a mayor número de neuronas, el error cuadrático medio se incrementaba, siendo este parámetro el indicador de qué tan viable era la red para obtener buenos resultados en la predicción. Otro enfoque híbrido entre ANN y lógica difusa lo presentan Dey *et al.* en [40] para la optimización del funcionamiento de un motor diesel operando con biodiesel y mezclas biodiesel-diesel y alcohol-diesel. La técnica de optimización difusa utilizada permitió hacer una mejor selección del porcentaje de combustible de biodiesel de palma y etanol requerido para obtener resultados equivalentes a los del motor operando sólo con combustible diesel. En este caso fue necesario representar el valor de las variables de entrada con conjuntos lingüísticos difusos.

Kakati *et al.* [41] estudió un motor diésel mono cilíndrico operado con combustible dual con inyección de metanol en el puerto y usó una ANN para predecir su comportamiento, las emisiones y los parámetros de combustión, para tres grados de carga diferentes, manteniendo el motor diesel operando a una velocidad constante, encontrando que podría ser una herramienta de apoyo en el modelado de motores de combustión interna. Otros autores utilizan varias redes neuronales para diferentes propósitos, como en el trabajo de Shivakumar *et al.* [42], donde proponen modelar el rendimiento de un motor, que funciona con aceite residual de cocina mezclado con diésel, usando una ANN y, para modelar las emisiones contaminantes de dicho motor, entrenan una ANN diferente.

El uso de las ANN en motores diesel que usan combustibles oxigenados (etanol y butanol) ha permitido predecir las emisiones y la eficiencia térmica en motores de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) como en el trabajo de Rezaei *et al.* [43], en este caso se usaron dos funciones, una de alimentación directa y una de base radial, donde la primera requería menos neuronas haciendo el modelo menos complejo, pero se necesitaba el doble de tiempo para el entrenamiento de la red neuronal, respecto al modelo de función de base radial. En general, las ANN se han adaptado a la solución de sistemas complejos, como los motores de combustión interna como también lo expone Billa *et al.* en su investigación [44], buscando solución a ciertos problemas, según el tipo de combustible que se utiliza (tradicionales, alcoholes, gas, biocombustibles, entre otros). Para esto se han usado modelos de ANN con enfoque de múltiples entradas y una sola salida, o múltiples entradas y múltiples salidas. Los resultados han determinado que es más conveniente el modelo de ANN de múltiples entradas y múltiples salidas, teniendo en cuenta la precisión, conveniencia y tiempo de cálculo en la predicción de rendimiento y emisiones. Aunque el entrenamiento de la red consume un tiempo considerable, se recomienda hacer estudios con modelos de redes con un número mayor de capas ocultas, para incluir aspectos importantes de la combustión del motor, y las emisiones de material particulado como indican Bhatt y Shrivastava en su publicación [45]. Otros estudios se han limitado a realizar simulaciones para diferentes condiciones de operación, a través de un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés). En este caso se desarrolló un software inteligente con algoritmos neuro-difusos para motores RCCI (motores de encendido por compresión controlado por reactividad) [46]. Este tipo de motores utilizan 2 combustibles, uno de baja reactividad (diésel) y uno de alta reactividad (gasolina). Los resultados de este estudio muestran que el sistema inteligente neuro-difuso adaptativo (ANFIS) fue más efectivo que el basado en una red neuronal artificial, en cuanto a la predicción de las emisiones y los parámetros de rendimiento de dicho motor. Lo anterior debido a que el ANFIS usa tanto las bondades de los algoritmos difusos, como la capacidad de aprendizaje y las funciones de pertenencia. En términos generales, las ANN son útiles para modelar sistemas complejos como motores que usan combustibles tradicionales o alternativos, pero requieren algún tipo de aprendizaje supervisado, siendo necesario hacer un entrenamiento específico para cada variación del motor. Finalmente, las redes neuronales son modelos de tipo supervisado, por lo que no es posible identificar nuevos casos (modos de operación del motor) que no se consideren durante la etapa de entrenamiento del algoritmo.

En este trabajo de investigación, se requiere hacer estimación en estados o modos de operación no previstos a priori, lo que sugiere el uso de una técnica semi-supervisada o no supervisada que permita identificar dichos modos, y esto es algo que, como se mencionó anteriormente, un método supervisado como las ANN no permiten, contrario a lo que sucede con el algoritmo LAMDA, el cual es capaz de identificar estados diferentes a aquellos con los que el algoritmo fue entrenado.

La revisión en literatura evidencia que el uso de algoritmos de inteligencia computacional es útil para desarrollar sistemas de monitoreo, clasificación y predicción en motores diesel, esto con el objetivo de determinar las prestaciones del motor en términos de eficiencia, y encontrar aquellos tiempos de inyección adecuados donde la fumigación de etanol es viable, usando por ejemplo los grados de pertenencia en algoritmos difusos como LAMDA, teniendo como criterio la reducción de contaminantes críticos como NOx y PM. Lo anterior permite pensar que es viable el desarrollo de un control inteligente para la inyección de combustibles alternativos, como en el caso de los alcoholes. Esto puede viabilizar el desarrollo de sistemas de inyección comerciales que permitan el uso de combustibles de baja huella de carbono a gran escala.

1.3.3 Consideraciones para la fumigación de alcoholes e inteligencia artificial en vehículos

Para realizar pruebas en vehículos es importante considerar el efecto en las emisiones contaminantes de las condiciones de conducción y de la topografía del terreno en el que se conduce. Estos efectos son dinámicos, e influyen significativamente sobre las condiciones de operación del motor. En este caso se puede realizar un análisis modal de emisiones, a partir de la potencia específica del vehículo (VSP) [47]. La VSP resulta ser un descriptor de interés para estimar emisiones instantáneas producidas durante la operación de un vehículo en ruta, ya que se tiene en cuenta la influencia de las características de conducción. Además, este parámetro describe adecuadamente el consumo instantáneo de combustible. Chong *et al.* [48] presentan una serie de pruebas para estimar emisiones gaseosas a partir del cálculo de la VSP en un grupo de vehículos, usando combustible diesel. Las estimaciones se comparan con mediciones, encontrando que los valores medidos y calculados son semejantes. Wang *et al.* [49] emplean la VSP como variable de entrenamiento de una ANN, con la cual se predicen las emisiones gaseosas de autobuses urbanos bajo diferentes condiciones de operación. En este estudio se obtuvo un buen resultado en la predicción de emisiones gaseosas, pero no se incluyen emisiones de PM. Como en el caso anterior, a partir de las ANN se han desarrollado modelos para vehículos diesel, considerando diferentes datos de entrada, pero enfocados en el mismo objetivo de predecir las emisiones contaminantes [50], [51].

Yu *et al.* [38] desarrollaron un modelo de aprendizaje profundo enfocado a la predicción de emisiones instantáneas de NOx en vehículos diesel, el cual hace uso de la descomposición empírica de modo de conjunto completo con ruido adaptativo (CEEMDAN), y una red neuronal de memoria a largo y corto plazo (LSTM). El modelo híbrido proporcionó resultados confiables, lo que permitiría reemplazar los sensores físicos usados para la medición de NOx. En este estudio se sugiere que, para trabajos futuros, el modelo debe considerar aspectos como la temperatura, la humedad, la presión atmosférica, y la altitud, entre otras variables, ya que también tienen un impacto en las emisiones.

El algoritmo LAMDA también se ha aplicado en la clasificación y diagnóstico de fallas en un vehículo en ruta que operaba con gasolina [52]. En este caso, el algoritmo identifica el estado funcional del sistema en tiempo real (estado normal, conducción agresiva, taponamiento del filtro de aire, falla en el inyector, falla en la bujía y llanta baja), mientras el vehículo está en movimiento, con un porcentaje superior al 90% de datos bien clasificados. En la detección de anomalías en vehículos diesel, se han utilizado otros algoritmos de inteligencia artificial de tipo no supervisado, como los modelos de aprendizaje de máquina, con el fin de explicar posibles causas del consumo anómalo de combustible [53].

En general, la integración de la inteligencia artificial para el manejo de grandes cantidades de datos y las tecnologías digitales avanzadas, son considerados factores importantes en la transición

emergente del sector energético hacia sistemas que busquen reducir las emisiones de carbono y optimizar el funcionamiento en sistemas complejos como los motores de vehículos [54].

A partir de la anterior revisión bibliográfica, es posible argumentar que el uso de alcoholes como sustituto parcial del diesel, se ha hecho principalmente en motores mono-cilíndricos y de automoción operando en estado estacionario, evidenciando una línea de investigación interesante sobre el comportamiento de este tipo de motores cuando operan en condiciones dinámicas. En el área de la inteligencia artificial, se ha explorado con fuerza el uso de ANN como modelos clasificadores o de pronóstico que dependen de la exactitud de los datos disponibles y limita el aprendizaje a la etapa de entrenamiento del algoritmo. Mientras que, con el uso de clasificadores difusos, como el algoritmo de agrupamiento difuso LAMDA y las mejoras que se han desarrollado del mismo, ha sido posible identificar nuevas clases que no se tuvieron en cuenta durante la etapa de entrenamiento. Además, los trabajos previos que mostraron la efectividad del algoritmo LAMDA-FAR en la estimación de tiempos de inyección de etanol, no consideraron el análisis de emisiones contaminantes como indicador de viabilidad ambiental para el uso del etanol hidratado como combustible alternativo. Tampoco incluía pruebas dinámicas sobre el vehículo. Por lo anterior, se evidencia que hay un vacío en el conocimiento del área, tanto en el uso de etanol fumigado en vehículos diésel y sus implicaciones a nivel ambiental y de prestaciones mecánicas, como en el uso de la inteligencia artificial para realizar inyección controlada y autónoma de combustibles alternativos. No se tiene información sobre la existencia estudios en los cuales se hayan realizado mediciones sobre un vehículo diesel reproduciendo un ciclo de conducción en banco de rodillos, utilizando métodos de inteligencia computacional, y considerando el efecto de las emisiones contaminantes al realizar la inyección de etanol de forma autónoma y controlada, por lo tanto, sería un aporte importante en materia de investigación.

1.4 Aportes del trabajo de doctorado

En este trabajo se desarrolló un sistema electrónico de clasificación difuso para la fumigación de etanol hidratado en el múltiple de admisión de un motor diesel de automoción. Dicho clasificador se basó en el criterio LAMDA-FAR [3]. Para estimar los tiempos de inyección de etanol se utilizó un modelo lineal afín para el sistema estacionario del motor ubicado en banco de ensayos, para lo cual fue necesario usar los promedios de las variables (descriptores) de entrada al algoritmo y unas constantes calculadas a partir de la pseudo inversa de Moore [55]. Para el sistema dinámico del vehículo ubicado en banco de rodillos, los tiempos de inyección se estimaron usando el modelo difuso *Takagi-Sugeno* [56], que utiliza los grados de pertenencia obtenidos a partir del sistema de clasificación, con el fin de ponderar los tiempos de apertura de los inyectores, considerando los estados funcionales más cercanos al modo de operación en el que esté funcionando el motor. A diferencia de trabajos anteriores, en esta tesis se realizaron pruebas estáticas en motor en banco de ensayos para 22 modos de operación y pruebas dinámicas en un vehículo en un dinamómetro de rodillos, siguiendo un ciclo de conducción WLTC (*World Harmonized Light-duty Vehicle Test Procedure*) con un vehículo diesel de automoción de inyección electrónica de combustible con tecnología Euro 4. Tanto para las pruebas estacionarias como dinámicas, se realizaron mediciones de parámetros efectivos del motor como emisiones gaseosas y de PM. Con el sistema electrónico desarrollado, se realizó inyección ponderada de etanol buscando maximizar la eficiencia del motor y minimizar las emisiones de NOx y de PN. Para esto, se estableció un índice de porcentaje de sustitución, el cual, a partir de las mediciones realizadas en estado estacionario, determina el porcentaje de sustitución en energía adecuado entre valores fijos de 0%, 10%, 20% y 30%, de esta forma el sistema toma la decisión autónoma de inyectar o no etanol en cada modo de operación en

el que se encuentre el motor. Las contribuciones de esta tesis, teniendo en cuenta los objetivos de esta, se destacan en la sección 6.1.

1.5 Organización de la memoria

Esta tesis está organizada de la siguiente manera: El capítulo 1, corresponde a la introducción y en ella se encuentra la justificación, los objetivos (general y específicos) y la revisión bibliográfica. El capítulo 2 expone la metodología y los resultados del algoritmo de inteligencia computacional basado en el criterio LAMDA-FAR, el cual permite determinar el estado funcional en el que está operando el motor, incluso para modos de operación que no se midieron en la etapa de entrenamiento y se estiman los tiempos de inyección a partir del modelo lineal que allí se describe. En el capítulo 3 se presenta la metodología para estimar en línea los tiempos de inyección de etanol hidratado en un vehículo ubicado en banco de rodillos a partir del clasificador desarrollado para el motor en banco de ensayos. El capítulo 4 contiene los resultados de la validación del sistema de inyección electrónico de etanol hidratado desarrollado, en un motor diesel en banco de ensayos y la forma cómo se estimaron los tiempos de inyección de etanol usando el modelo lineal afín. El capítulo 5 muestra los resultados de las emisiones contaminantes y los consumos de combustible para un vehículo de pruebas diesel en banco de rodillos y se explica cómo se determinan los tiempos de inyección en modos de operación desconocidos utilizando el modelo difuso Takagi-Sugeno, además, se propone el uso de un índice de sustitución que permita determinar la pertinencia o no de inyectar etanol a partir de las emisiones contaminantes y la eficiencia energética. Finalmente, en el capítulo 6, se presentan las conclusiones de esta tesis doctoral, las contribuciones y se sugieren algunos trabajos futuros.

CAPÍTULO 2

ESTIMACIÓN DE TIEMPOS DE INYECCIÓN DE ETANOL PARA MOTOR DIÉSEL EN BANCO DE ENSAYOS

En este capítulo se propone una metodología basada en LAMDA-FAR [3], la cual permite estimar el tiempo de inyección de etanol hidratado en un motor diesel de automoción, considerando emisiones contaminantes y eficiencia energética. En la metodología propuesta se entrena un algoritmo de clasificación difuso, para identificar los estados funcionales de un motor diesel que funciona en modo dual (diesel + etanol hidratado en modo de fumigación). Para cada estado funcional con el que se entrena el clasificador se conoce el tiempo de inyección adecuado para el etanol. El clasificador usado permite encontrar estados o clases nuevas que no habían sido incluidas en la etapa de entrenamiento y, para ese nuevo estado funcional, establece el tiempo de inyección de etanol a fumar en el múltiple de admisión. Para la implementación, se construyó una base de datos que incluye un número importante de modos de funcionamiento representativos del motor, tomados del ciclo de conducción internacional WLTC (*Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle*). En trabajos anteriores se midieron menos modos de operación sobre un motor de inyección mecánica Pre-Euro Isuzu 4JA1 [3], [6] (2 modos de operación donde incluyeron emisiones contaminantes y 17 modos de operación sin medición de contaminantes, respectivamente), mientras que en este trabajo se midieron 22 modos de operación con emisiones contaminantes sobre un motor Cummins ISF 2.8L tecnología Euro 4. En la adquisición de los datos se consideran tres variables o descriptores de interés, debido a que son representativas de la operación del motor y pueden medirse fácilmente en vehículos: velocidad del motor, temperatura de los gases de escape a la salida del motor (antes de la turbina) y porcentaje de aceleración. La base de datos se conformó como se indica en la Tabla 2.1, donde los datos fueron tomados con un periodo de muestreo de 1s:

Tabla 2.1 Conformación de la base de datos

Combustible	Número de modos de operación	Número de datos por modo de operación	Número total de datos
Diésel comercial (DC)	22	300	6600
Etanol 10% (E10)	22		6600
Etanol 20% (E20)	20		6000
Etanol 30% (E30)	18		5400
TOTAL	82	300	24.600

Esta base de datos fue utilizada para entrenar el clasificador difuso, el cual permite identificar el estado actual del motor durante su operación. El resultado del clasificador permite asignar en tiempo real una duración de inyección, previamente medida, para aquellos estados funcionales que formaron parte de la etapa de entrenamiento. Para los nuevos modos de operación del motor, se estima un tiempo de inyección a partir de los grados de pertenencia del clasificador y los tiempos de inyección para los modos conocidos. Finalmente, y de manera autónoma, el sistema implementado determina qué porcentaje de etanol hidratado inyectar, y si es conveniente o no inyectar, en función de un índice que se propone, el cual busca minimizar las emisiones

contaminantes y maximizar la eficiencia energética. La Figura 2.1, representa el sistema de control en lazo cerrado implementado, el cual permite determinar los tiempos de inyección de etanol en un motor diesel de automoción. La descripción de esta figura se desarrolla más adelante en este capítulo.

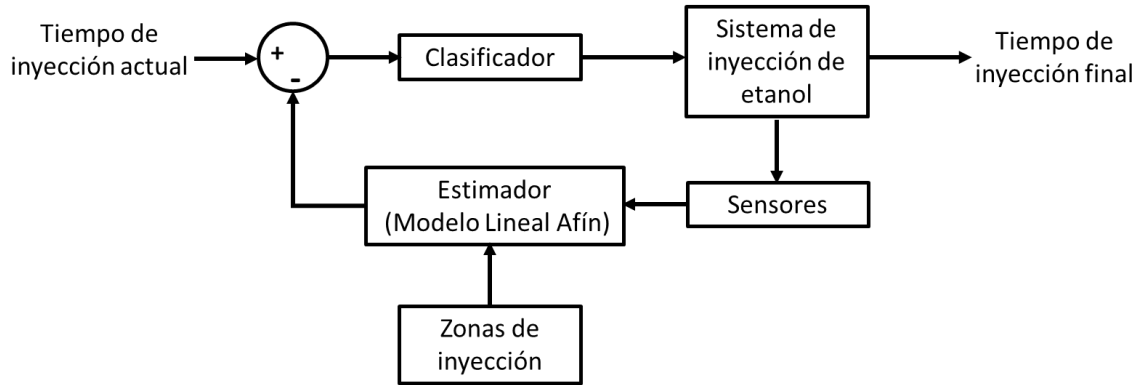


Figura 2.1 Diagrama de bloques del sistema de inyección de etanol

2.1 Pruebas estacionarias de motor en banco de ensayos

A continuación, se presenta el caso de estudio para la obtención de los datos de entrenamiento de un sistema de fumigación de etanol en modo dual sobre un motor operando en banco de ensayos.

2.1.1 Mapeo del motor

Los datos para la etapa de entrenamiento del algoritmo de clasificación difusa se obtienen de un motor diesel Euro 4 montado en banco de ensayos, y que opera en condiciones estacionarias. La Tabla 2.2 muestra las especificaciones técnicas del motor utilizado.

Tabla 2.2 Especificaciones técnicas del motor Cummins

Referencia	Cummins ISF 2.8L
Número de cilindros	4
Cilindrada	2.8 L
Torque máximo	360 Nm a 3600 rpm
Potencia nominal	120 kW

Para realizar la fumigación de etanol, el motor tuvo que ser modificado, instalando un riel de inyección en el múltiple de admisión, con sus respectivos inyectores. El suministro de etanol se realizó a través de un sistema de inyección multipunto, controlado electrónicamente (ver Figura 2.2).

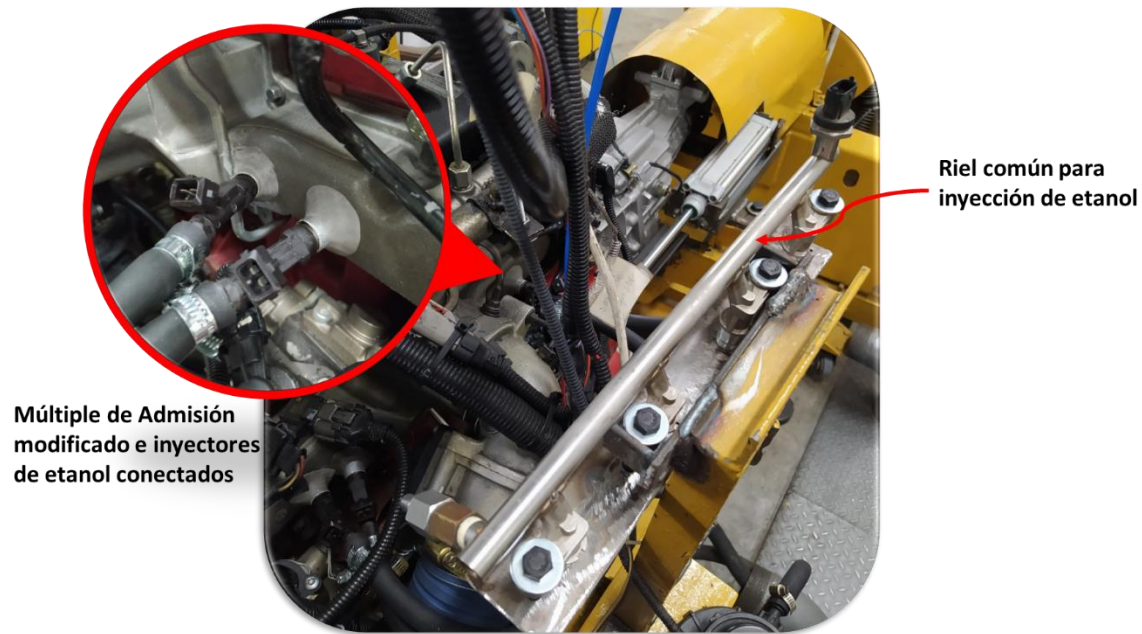


Figura 2.2 Montaje del riel de inyección de etanol en el motor de ensayo

Los puntos de operación a medir se obtienen a partir del ciclo de conducción WLTC, el cual forma parte de la norma para homologación de vehículos por parte de algunas entidades ambientales a nivel internacional, con el fin de regular emisiones contaminantes. Del ciclo WLTC se consideraron sólo las secuencias transitorias de aceleración positivas y velocidades de hasta de 80km/h, ya que, para la gran mayoría de vías en Colombia, ésta es la velocidad límite. En el caso del motor, se hace un estudio de dinámica longitudinal y simulación de automoción (ver Anexo A) para un vehículo que opera con un motor de las mismas características, y se traduce el registro de velocidad en función del tiempo, a modos de operación o estados funcionales. Dichos modos se representan con dos variables de interés que son la velocidad del motor [rpm] y el par [Nm] que representa la carga, los cuales resultan ser descriptores muy comunes para representar el mapa de operación de este tipo de sistemas. La Figura 2.3, muestra los puntos de operación que se midieron en el motor en estado estacionario, los cuales fueron tomados del ciclo WLTC siguiendo el análisis de dinámica longitudinal mencionado anteriormente, los cálculos para este análisis fueron desarrollados por Ballesteros en su tesis doctoral [57]. Cabe destacar que dichos modos de operación representan aquellos puntos del mapa del motor que más se repiten en el seguimiento del ciclo, tomando como referencia la altura de las barras de un histograma de frecuencias. El ancho de cada barra influye en la precisión de la selección del punto puesto que cada una de ellas contiene un rango de modos de operación. Los puntos encerrados en color azul corresponden a los modos de operación seleccionados dentro del mapa de operación resultante del análisis de dinámica longitudinal. Estos puntos, a diferencia de los que no fueron resaltados, aseguraron operación estable y confiable del motor, además son modos de operación que pertenecen a las dinámicas de otros ciclos de conducción de interés (FTP – *Federal Test Procedure*, por sus siglas en inglés y AMVA – Área Metropolitana del Valle de Aburrá)

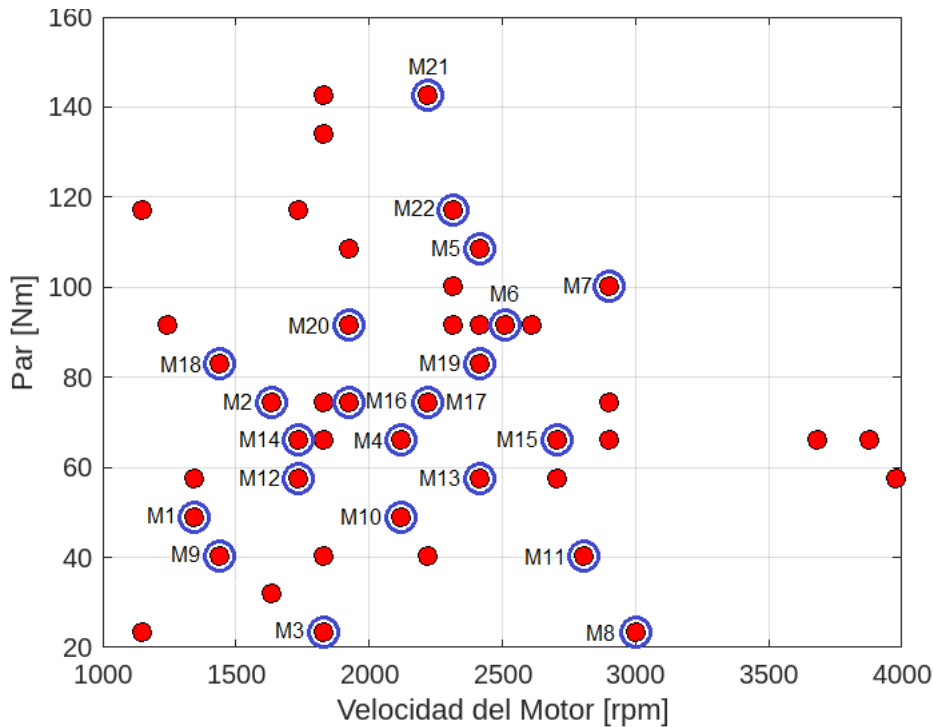


Figura 2.3 Puntos de operación del ciclo de conducción WLTC en el motor CUMMINS.

Para cada punto de operación se inyectaron diferentes porcentajes de sustitución en base energética (0%, 10%, 20%, 30%), asegurando siempre igualdad de condiciones en términos de la potencia medida sobre el eje del motor. En cada uno de ellos se midieron las variables de operación del motor (velocidad, temperatura de gases de escape y posición del acelerador, consumos de aire y combustible y presión en el turbo compresor), estas variables fueron adquiridas mediante el software KAMSÁ®, desarrollado en el grupo GIMEL en el marco de este trabajo de investigación, a una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Las emisiones de NOx fueron medidas con el CAPELEC y muestreadas a 10 Hz, mientras que el PN, medido con el equipo Pegasor se muestreó a 1 Hz (ver Anexo B). Finalmente, las variables cuyos datos se adquirieron a 10 Hz fueron remuestreadas a 1Hz. En la Tabla 2.3 se indican los modos de operación medidos.

En la medida que el porcentaje de sustitución de diesel por etanol se incrementaba, se encontró que no era posible medir algunos de los puntos de operación, ya que había zonas del mapa de operación del motor donde se presentaron problemas de funcionamiento en el motor por combustión deficiente o combustión detonante (*knocking*), entre otras. Por lo tanto, no se logró medir los 22 modos de operación para todos los grados de sustitución.

Para obtener la base de datos a partir de las mediciones en banco de ensayos, se procedió a realizar la sustitución en energía de diesel por etanol hidratado. El procedimiento consiste en llevar el motor hasta el modo de operación deseado, especificado por la velocidad y el par (lo cual equivale a una potencia específica) inyectando sólo diesel. Una vez alcanzada esta potencia (100%) de forma estable, se procede a decelerar el motor hasta disminuir la potencia una cantidad igual al porcentaje de sustitución deseado (0%, 10% 20%, 30%). En este punto se inyecta etanol durante el tiempo necesario, con el fin de alcanzar nuevamente la potencia inicial de referencia para el punto de

ensayo. Así se garantiza que la potencia restante para volver al punto de operación (potencia de 100%) se suple con etanol. Lo anterior se repite para cada modo de operación.

Tabla 2.3 Modos de operación medidos

Modo de operación	Velocidad del motor [rpm]	Par [Nm]
M1	1350	50
M2	1644	74
M3	1870	23
M4	2110	66
M5	2310	116
M6	2500	100
M7	2820	100
M8	2700	23
M9	1440	40
M10	2000	50
M11	2800	40
M12	1730	58
M13	2400	57
M14	1880	66
M15	2700	66
M16	1940	75
M17	2320	75
M18	1658	84
M19	2420	82
M20	1900	90
M21	2400	144
M22	2400	108

Luego de haber identificado los tiempos de inyección de etanol, se verifica en qué condiciones es conveniente fumigar una cierta cantidad de etanol, buscando inyectar sólo en aquellos puntos donde haya evidencia de una reducción en las emisiones contaminantes, tomando los contaminantes medidos como referencia, y buscando mantener la eficiencia energética.

A partir de los 22 modos de operación medidos, se seleccionan 16 de ellos para realizar la siguiente distribución de datos: se reservó el 70% de los datos seleccionados al azar para la fase de entrenamiento del algoritmo de clasificación, y el 30% restante fue usado en la fase de validación junto con los otros 6 modos de operación faltantes (M3, M5, M9, M15, M16 y M22) que ingresarían como datos nuevos al algoritmo (ver Figura 2.4) y que fueron escogidos estratégicamente para asegurar que dentro de los datos de validación hubiesen modos de operación que incluyeran diferentes grados de carga (alta, media y baja) del motor.

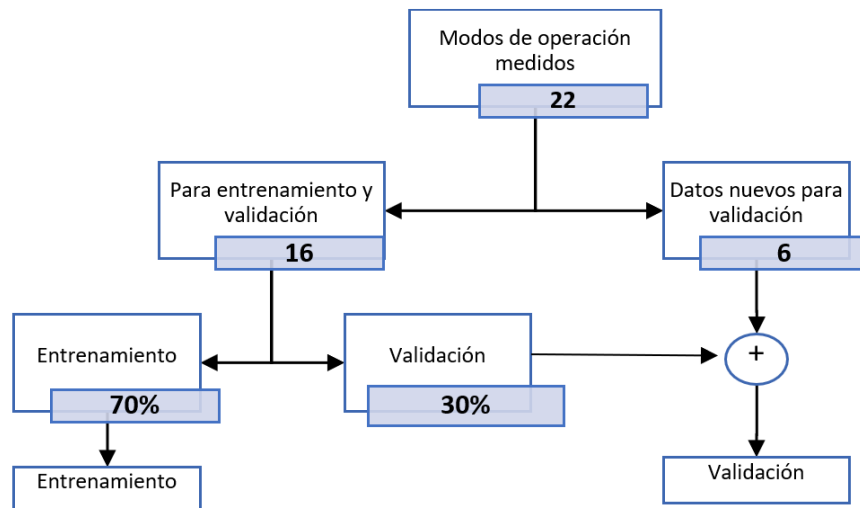


Figura 2.4 División de datos para entrenamiento y validación

2.2 Instalación experimental en banco de pruebas

El motor Cummins ISF 2.8L se acopló a un freno dinamométrico Schenck W230, a través de una transmisión acoplada remotamente de forma neumática. También se perforó el múltiple de admisión para realizar la instalación del riel de inyección de etanol. En cuanto a las variables o descriptores de entrada del algoritmo clasificador difuso, se seleccionaron la velocidad del motor [rpm], la temperatura de gases de escape a la salida del motor [°C], y la posición del acelerador [%], considerando que son representativas de la dinámica y la combustión del motor, y que además pueden medirse fácilmente en vehículos. La velocidad del motor, en rpm, se midió con la señal proveniente del sensor de posición de cigüeñal – CKP (*Crankshaft Position Sensor*, por sus siglas en inglés) el cual genera una señal de 60 pulsos/vuelta por cada giro del eje del motor. Para medir la temperatura de los gases de escape se utilizó un termopar tipo K, ubicado en el múltiple de escape del motor, antes de la entrada a la turbina. Finalmente, la señal de la posición del acelerador se obtuvo a partir de un potenciómetro lineal. Las demás variables como temperaturas en el aceite, turbo compresor y líquido refrigerante, fueron sensadas con termopares tipo K. Para la medición de presiones se usaron transmisores 4-20 mA. La medición del flujo másico de aire se realizó con un sensor de hilo caliente, y para medir el flujo másico de combustible se utilizó, en el caso del etanol, una balanza gravimétrica (Shimadzu TX3203L con capacidad máxima de pesado de 3200 g y una resolución de 0.01 g) usando la técnica de aforo, mientras que para medir el flujo másico de combustible diesel, se utilizó un sensor tipo Coriolis de referencia Danfoss MASS 6000. Cada punto de operación estacionario fue medido bajo condiciones de estabilidad térmica, asegurando que el valor de temperatura de los gases de escape permaneciera constante en el tiempo durante cada medición.

Para la adquisición de los datos se utilizó un sistema CompactRIO de National Instruments™, así como el programa Labview™. El esquema general de la instalación experimental se muestra en la Figura 2.5.

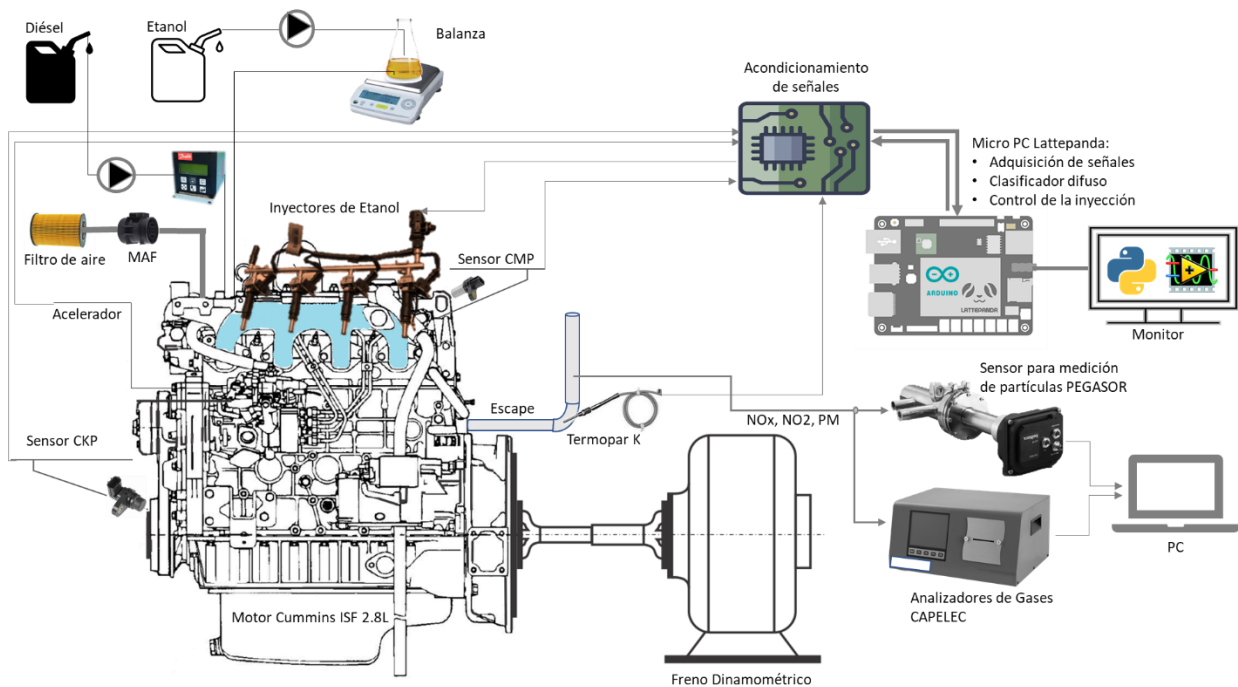


Figura 2.5 Instalación experimental en el banco de ensayos

El sensor de posición del árbol de levas CMP (*Camshaft Position Sensor*) permitió identificar los eventos de inyección de combustible para los diferentes cilindros. Las señales anteriores se llevan a una tarjeta electrónica, para realizar el respectivo acondicionamiento, y luego ingresar al sistema embebido desarrollado con el procesador Lattepada, el cual contiene el control de la inyección de etanol y el clasificador difuso.

La medición de emisiones de NOx se realizó con el analizador de gases CAPELEC CAP3010-4G, el cual mide mediante una celda electroquímica, con una frecuencia de muestreo de 10 Hz. Las emisiones de material particulado se midieron con el sensor difusivo Pegasor (PPS), el cual permite medir las concentraciones de partículas de masa – PM (mg/m^3) y número – PN ($\#/\text{cm}^3$) en tiempo real, con una frecuencia de 10 Hz (ver Anexo C).

2.3 Algoritmo de clasificación difuso

A continuación, se detallan cada uno de los bloques de la Figura 2.1 que hacen parte de la metodología propuesta para estimar los tiempos de inyección de etanol hidratado en un motor diesel de automoción de referencia Cummins ISF 2.8L.

2.3.1 Clasificador

Para el desarrollo del sistema de clasificación, se parte de la adquisición de las variables o descriptores (velocidad del motor, temperatura de los gases de escape y porcentaje de aceleración) medidas a través de los sensores con los que fue instrumentado el motor. Con esta información se alimenta una base de datos que será la entrada para la etapa de entrenamiento del algoritmo de agrupamiento difuso LAMDA. Dicho algoritmo admite datos (o individuos) de tipo cuantitativo y cualitativo. El agrupamiento para la generación de clases se hace de forma recurrente, el aprendizaje puede ser de tipo supervisado o no supervisado y además es posible actualizar y generar clases después del entrenamiento, es decir, en la etapa de reconocimiento. La distribución de datos para cada etapa del algoritmo fue representada en la Figura 2.4.

Cada dato o individuo corresponde a una muestra en un instante de tiempo con los valores de cada descriptor o variable i (Ver ecuación 2.1).

$$x_d = \frac{x_i - x_{min,i}}{x_{max,i} - x_{min,i}} \quad (2.1)$$

Este algoritmo se fundamenta en encontrar el grado de adecuación global (GAD) de un individuo i a una clase existente k , considerando las contribuciones de cada uno de sus descriptores x_d . La contribución de cada variable o descriptor es llamada Grado de Adecuación Marginal (MAD).

Para cada tiempo de muestreo se obtiene un vector de datos $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_d]$. Estos vectores se usan para entrenar el algoritmo. Los MAD se calculan para cada vector de datos \mathbf{x} usando funciones de densidad de probabilidad, entre ellas la función binomial difusa (2.2) [58] y la función Gaussiana (2.3).

$$MAD_{kd}[x_d | \rho_{kd}] = \rho_{kd}^{x_d} (1 - \rho_{kd})^{(1-x_d)} \quad (2.2)$$

$$MAD_{[K,D]}(x_d | \rho_{k,d} | \sigma_{k,d}) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x_d - \rho_{k,d}}{\sigma_{k,d}} \right)^2} \quad (2.3)$$

Estas dos funciones asignan D grados de adecuación marginal a cada individuo X y a cada clase k . Donde $\rho_{k,d}$ es el valor promedio de los datos que pertenecen a cada clase k y se calcula a partir de la ecuación 2.4).

$$\rho_{k,d}(T_k) = \frac{1}{T_k} \sum_{t=1}^{t=T_k} x_d(t) \quad (2.4)$$

Donde T_k es el número de individuos que pertenecen a la clase k .

El parámetro $\sigma_{k,d}$ permite identificar la cercanía o dispersión de los datos normalizados al valor promedio $\rho_{k,d}$ y se calcula como aparece en la ecuación 2.5 cuando se usa la función Gaussiana.

$$\sigma_{k,d}^2(T_k) = \frac{1}{T_k - 1} \sum_{t=1}^{t=T_k} ((x_d(t) - \rho_{k,d}(T_k))^2) \quad (2.5)$$

Las adecuaciones MAD y GAD son funciones de pertenencia difusa y su agregación γ se hace utilizando los conectivos de lógica difusa (T-norma: Intersección y S-Norma: Unión) a cada clase k . Los GAD pueden obtenerse para determinado grado de exigencia α como se expresa en la ecuación 2.6.

$$GAD(X, K_k) = \alpha \gamma [MAD_1(x_1, K_k), \dots, MAD_d(x_d, K_k), MAD_D(x_D, K_k)] + (1 - \alpha) \beta [MAD_1(x_1, K_k), \dots, MAD_d(x_d, K_k), MAD_D(x_D, K_k)] \quad (2.6)$$

Finalmente, un individuo \mathbf{x} se asigna a una clase k si el máximo GAD calculado corresponde al de esa clase. En este caso, cada clase representa un punto de operación del motor (régimen de giro - par) para cada porcentaje de sustitución de diésel por etanol hidratado.

Considerando que, durante la operación del motor, éste puede pasar por modos de operación diferentes a los medidos del ciclo WLTC, en su fase de entrenamiento, se requiere el uso de un algoritmo que permita encontrar nuevas clases o estados funcionales, y decidir qué hacer en aquellos casos donde la incertidumbre puede ser alta, es decir, en aquellas clases cuyos valores de GAD sean muy cercanos. Por lo anterior, se hace uso del criterio LAMDA-FAR, propuesto por Ruiz en 2018 [10], como una mejora al algoritmo LAMDA [58] para este tipo de aplicaciones, dicho

criterio se explica brevemente a continuación.

2.3.2 Criterio LAMDA-FAR

El criterio LAMDA-FAR (*LAMDA-Functional States After Recognition*) se utiliza en aquellos casos en los que las clases o estados funcionales son muy similares entre sí, y por lo tanto, los grados de pertenencia son muy similares para diferentes clases, lo cual podría generar un error de clasificación debido a la incertidumbre del sistema. LAMDA-FAR busca determinar las distancias máximas y mínimas entre los dos grados de pertenencia con los valores de GAD más altos para cada individuo X , y para cada clase K establecida en la etapa de entrenamiento. Si el algoritmo LAMDA reconoce que un nuevo vector de datos pertenece a la clase NIC, entonces el criterio LAMDA-FAR no se aplica. Por otro lado, cuando el nuevo vector de datos entra en el algoritmo y se clasifica en una clase diferente a la clase NIC, entonces esta clasificación se valida en función del criterio LAMDA-FAR. La distancia máxima se define como la diferencia entre el valor máximo del mayor de los GAD (GAD_{sup}), y el valor mínimo del grado de pertenencia inmediatamente siguiente en su orden (GAD_{inf}), como se muestra en la ecuación 2.7.

$$d_{Hk_{max}} = \max(GAD_{sup}) - \min(GAD_{inf}) \quad (2.7)$$

La distancia mínima se define como la diferencia entre el valor mínimo del mayor de los GAD (GAD_{sup}) y el valor máximo del GAD inmediatamente siguiente en su orden (GAD_{inf}), como se muestra en la ecuación 2.8.

$$d_{Lk_{min}} = \min(GAD_{sup}) - \max(GAD_{inf}) \quad (2.8)$$

Después de determinar estas distancias para cada clase k , se evalúa la diferencia entre los dos grados de pertenencia más altos para cada vector de datos de entrada X . Si la distancia obtenida es mayor que $d_{Hk_{max}}$ o menor que $d_{Lk_{min}}$, los datos X se clasifican en la clase NIC. Por otro lado, si la distancia obtenida para los datos X está entre los límites establecidos, se clasificará en la clase preexistente k . La Figura 2.6 muestra las distancias establecidas en el criterio de LAMDA-FAR, para los grados de pertenencia de una clase.

Es importante aclarar que una clase en el algoritmo corresponde a un modo de operación en el motor, y que éste tiene asociado una duración de inyección determinada, dependiendo del grado de sustitución en base energética.

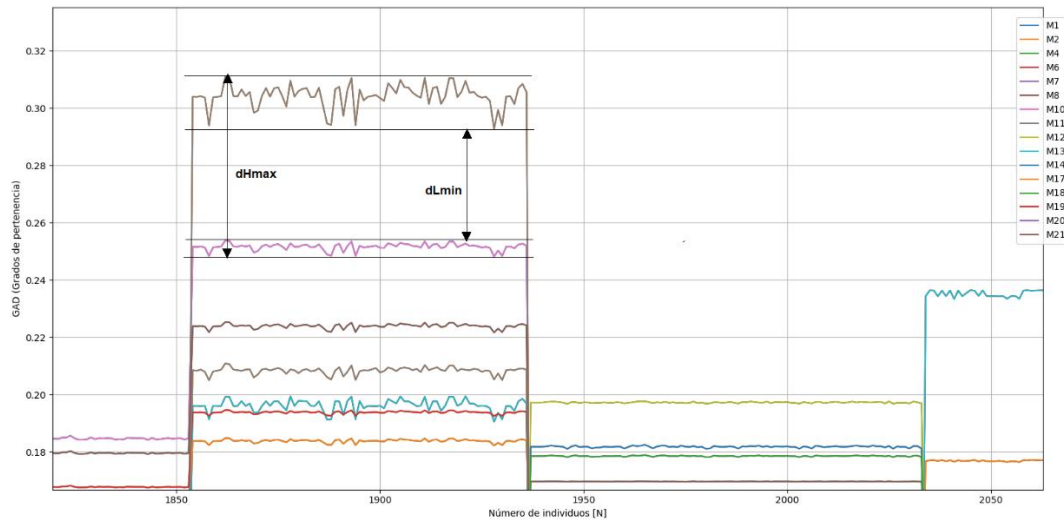


Figura 2.6 Representación de las distancias máximas y mínimas en una clase halladas con LAMDA-FAR

2.3.3 Zonas de inyección

A partir de los modos de operación medidos se determinan las zonas de inyección, para cada porcentaje de sustitución. Las zonas están conformadas por aquellos modos de operación cuyos tiempos de inyección son semejantes entre sí [10]. La distinción de las zonas de inyección, de acuerdo a los tiempos de inyección, se realiza a través de una clasificación no supervisada usando el algoritmo de agrupamiento difuso LAMDA [58]. Las Tablas 2.4, 2.5 y 2.6 muestran las zonas donde se agrupan los diferentes modos de operación para cada porcentaje de sustitución medido.

Tabla 2.4 Zonas de inyección para porcentaje de sustitución de 10%

Zona	Modo de operación	Tiempo de inyección [ms]
1	M3	1,7
	M19	1,85
2	M5	3
	M7	3,4
	M13	3
	M15	3,2
	M18	3,1
3	M1	2,1
	M4	2,3
	M6	2,1
	M8	2,2
4	M10	2,4
	M11	2,45
	M9	2,5
	M16	2,5
	M22	2,5
5	M2	2,75
	M12	2,8
	M20	2,8
6	M14	2,6
	M17	2,7
	M21	2,7

Tabla 2.5 Zonas de inyección para porcentaje de sustitución de 20%

Zona	Modo de operación	Tiempo de inyección [ms]
1	M1	3,5
	M2	3,7
	M3	3,4
	M9	3
2	M4	4,9
	M6	4,7
	M7	4,7
	M10	4,1
	M11	4,1
	M12	4,2
	M14	4,5
	M16	4,7
M18	4	
M22	4,3	
3	M13	5,2
	M15	5,2
	M17	5,1
	M19	5,2
	M20	5,1
	M21	6

Tabla 2.6 Zonas de inyección para porcentaje de sustitución de 30%

Zona	Modo de operación	Tiempo de inyección [ms]
1	M1	4,85
	M2	4,65
	M10	5,1
	M18	5,2
2	M4	6,15
	M12	5,4
	M14	5,5
	M16	6,1
	M20	6,2
3	M6	8,2
	M15	8,1
	M17	8,5
	M19	8,7
4	M5	7,6
	M11	7
	M22	7,4
5	M7	6,4
	M21	6,6

Las zonas de inyección son el insumo para estimar los tiempos de inyección de etanol, de acuerdo con el porcentaje de sustitución establecido, a partir del promedio de los descriptores y de unas constantes características del sistema como se describe en la siguiente sección.

2.3.4 Estimador (Modelo Lineal afín)

Una vez identificadas las zonas de inyección y los modos de operación pertenecientes a cada una de ellas, se procede a construir un modelo lineal afín (MLA) constituido por tantas ecuaciones lineales como número de modos de operación existan en cada zona de inyección i . Cada ecuación lineal está conformada por el tiempo de inyección medido, los descriptores del sistema y un término independiente. De acuerdo a lo anterior, se considera un sistema lineal de m ecuaciones con $D+1$ incógnitas, que se resuelve usando la pseudo inversa de Moore-Penrose [55], donde m será el número de modos de operación de cada zona de inyección y D , el número de descriptores. Para su solución deben considerarse los tiempos de inyección medidos y los valores promedio de los descriptores de cada zona de inyección como se muestra en la ecuación 2.9.

$$t_{iny_med} = A_i \overline{rpm} + B_i \overline{EGT} + C_i \overline{acel} + D_i \quad (2.9)$$

Donde \overline{rpm} , \overline{EGT} y \overline{acel} , representan el valor promedio de los descriptores régimen de giro, temperatura de gases de escape, y porcentaje de aceleración, respectivamente. El subíndice i representa el número de la zona de inyección y A_i , B_i , C_i y D_i son las constantes características del sistema en cada zona de inyección i . Luego, en la fase de validación, se determina el tiempo de inyección estimado partiendo de los valores instantáneos de cada descriptor y de las constantes A_i , B_i , C_i y D_i halladas en la etapa de entrenamiento como se indica en la ecuación 2.10.

$$t_{iny_est} = A_i(rpm) + B_i(EGT) + C_i(acel) + D_i \quad (2.10)$$

2.3.5 Sistema de inyección de etanol y sensores

La descripción del sistema electrónico de inyección de etanol y sus sensores son explicados en detalle en el Anexo B.

La metodología para la clasificación y estimación de los tiempos de inyección de etanol se muestra en la Figura 2.7.

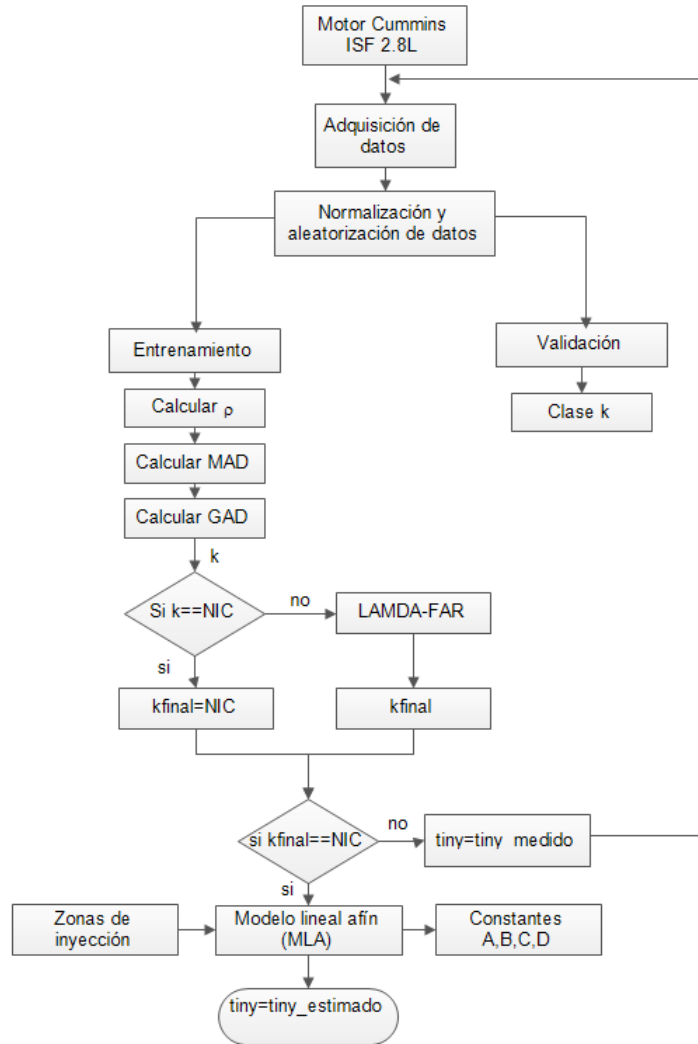


Figura 2.7 Metodología para la clasificación y estimación de los tiempos de inyección

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA PARA LA INYECCIÓN DE ETANOL EN UN VEHÍCULO DIESEL SOBRE BANCO DE RODILLOS

En este capítulo se presenta la metodología propuesta para realizar inyecciones controladas de etanol hidratado en el múltiple de admisión, sobre un vehículo de carga con motor de encendido por compresión (diesel), operando en un banco dinamométrico de rodillos, y siguiendo el ciclo de conducción WLTC (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycles*) clase 1. Un ciclo de conducción puede definirse a partir de una gráfica de la velocidad del vehículo respecto al tiempo (o distancia), y suele representar patrones de conducción real en carretera, estos a su vez están divididos en fases (bajo, medio, alto, extra-alto, entre otras) que dependen de la velocidad del vehículo o de su relación potencia-masa (PMR).

Los tiempos de apertura de los inyectores de etanol, estimados por el sistema de inteligencia computacional implementado (que se presentó en el Capítulo 2 – Figura 2.7), proporcionan una sustitución en energía del combustible fósil por el alcohol, bajo condiciones de operación a presión constante (4 bar en el riel de inyección). La inyección de etanol se realiza cuando se haya evidenciado una reducción de emisiones contaminantes respecto a las mediciones realizadas con solo combustible diesel, de acuerdo con lo establecido en el histórico de datos medido previamente en estado estacionario, lo anterior buscando sacrificar lo menos posible la eficiencia energética del motor, esto es, comparar las eficiencias que resultan al inyectar etanol, respecto a las mediciones del combustible base (diesel comercial).

Para realizar la inyección de etanol en el vehículo, se utilizó un sistema electrónico embebido portátil (el cual se describe en detalle en el Anexo B) y se instaló el mismo múltiple de admisión modificado, usado para las pruebas estacionarias con el motor en banco de ensayos (explicado en Capítulo 2), al igual que el riel de inyección y sus respectivos actuadores.

En cada una de las pruebas dinámicas realizadas, el sistema de inyección propuesto e implementado determinó los tiempos de apertura de cada inyector y el porcentaje de sustitución de diesel (0%, 10%, 20% ó 30% en base energética), de acuerdo con el modo de operación o estado funcional del motor que hubiese sido detectado. El porcentaje de sustitución de combustible, lo estableció el algoritmo de forma autónoma, de acuerdo con el histórico de datos disponible en la fase de entrenamiento. La decisión final de cuánto etanol inyectar o qué porcentaje sustituir, estuvo limitada a las mediciones realizadas a priori de las emisiones gaseosas y de material particulado provenientes del motor y del tipo de combustible con que se alimentó (diesel comercial ó diesel+etanol), buscando siempre reducir las emisiones y mantener en lo posible la eficiencia energética.

En las pruebas dinámicas realizadas sobre el vehículo operando en banco de rodillos, se verificó la eficacia del algoritmo de clasificación difuso para reconocer los diferentes modos de operación del motor. Además, de acuerdo con la clasificación de estados funcionales, la estimación de los tiempos de inyección, y un índice matemático que establece el porcentaje de sustitución (este índice será expuesto en el Capítulo 3), se realizó la inyección autónoma y controlada de etanol teniendo en

cuenta las emisiones contaminantes de NOx y PN. La Figura 3.1 representa el sistema de control en lazo cerrado implementado en el vehículo para determinar los tiempos de inyección de etanol.

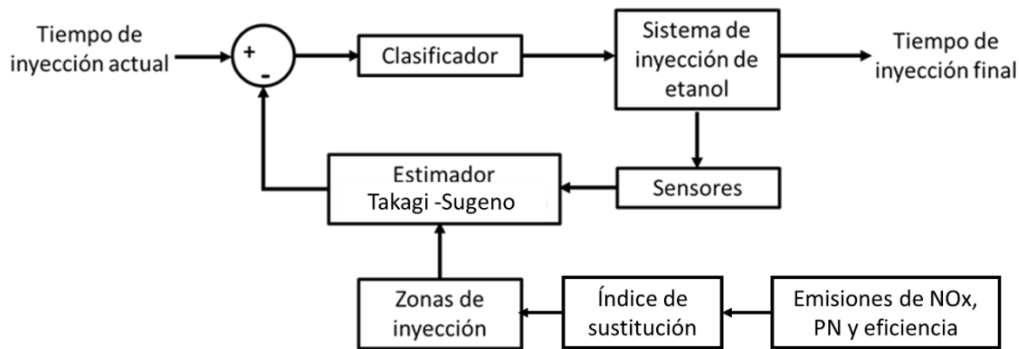


Figura 3.1 Diagrama del sistema de inyección de etanol implementado en el vehículo

Partiendo del histórico de datos de los tiempos de inyección medidos para cada modo de operación, se obtiene el número de zonas de inyección (Z_i) mediante el clasificador difuso LAMDA en modo de aprendizaje no supervisado. En este caso, el objetivo es agrupar modos de operación con características de inyección similares, asociándoles una zona de inyección común, este procedimiento se repite con los datos de cada porcentaje de sustitución de etanol. La elección del porcentaje de sustitución de etanol a inyectar se elige mediante un índice de sustitución descrito más adelante en este capítulo, dicho índice permite utilizar el porcentaje de sustitución que menor cantidad de emisiones contaminantes de NOx y PN se emite al ambiente y que menos comprometa la eficiencia energética del vehículo, esto a partir de los datos de las mediciones de NOx, PN y eficiencia obtenidos previamente a la etapa de entrenamiento del algoritmo. Con los valores de los dos (2) grados de pertenencia (GAD) más altos obtenidos con el algoritmo de clasificación LAMDA (sin tener en cuenta el valor del grado de pertenencia de la clase NIC) y los tiempos de inyección medidos, se ponderan los tiempos de inyección estimados, para esto se usa la teoría del modelo Takagi-Sugeno [56] que también será explicada en breve. La importancia de tener en cuenta los dos grados de pertenencia más representativos de cada individuo clasificado, es poder considerar la incertidumbre del sistema, dado que un dato puede parecerse simultáneamente a varios modos de operación.

A continuación, se describen los bloques funcionales de la Figura 3.1. Los bloques del clasificador, el sistema de inyección de etanol y las zonas de inyección fueron descritas en el Capítulo 2 (Figura 2.1), mientras que el bloque de los sensores hace referencia a la instrumentación del motor que es explicada con detalle en el Anexo B.

3.1 Emisiones de NOx, PN y eficiencia

Este bloque representa la medición de las emisiones contaminantes en las pruebas estacionarias realizadas sobre el motor en banco de ensayos, y es el insumo principal para establecer el índice lógico-matemático que determina el porcentaje de etanol a sustituir sobre las pruebas dinámicas en el vehículo operando sobre el banco de rodillos. Es importante aclarar que cuando se habla de material particulado (PM), se refiere a una mezcla de partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, por lo tanto, dichas partículas pueden medirse en concentraciones máscas o en número de partículas (PN). Para la medición del material particulado (PM) se consideró el número de partículas (PN) que es la medida primaria que entrega el equipo Pegasor (PPS™) (ver Anexo C), mientras que

la concentración en masa es una medida estimada a partir del número, además, a nivel de salud, la medida del número de partículas permite considerar los diferentes tamaños de las misma, donde las más finas son las que ingresan con mayor facilidad al alveolo del pulmón provocando un mayor riesgo para la salud [59].

3.2 Índice de sustitución

Se propone un índice de sustitución ($I_{s,i}$) para el i –ésimo modo de operación ($i= 1$ hasta 22) con el fin de que el sistema decida de forma autónoma qué porcentaje de etanol inyectar, de acuerdo con el estado funcional en el que se encuentre el motor. Con esto se busca una reducción de emisiones contaminantes de NOx y PN, así como mantener o mejorar la eficiencia energética. El índice se presenta en la ecuación 3.1.

$$I_{s,i} = [\min(NOx_i) * \min (PN_i)] + \max (\eta_i) \quad (3.1)$$

Este índice tiene en cuenta la medición de las emisiones para cada porcentaje de sustitución de etanol, y considera con cuál de los porcentajes se emite menor cantidad de contaminantes (NOx y PN). Además, también incluye el efecto de dicho porcentaje sobre la mejora en la eficiencia del motor. De esta forma, se busca un equilibrio entre las emisiones y la eficiencia energética, para inyectar etanol sólo cuando sea lo más conveniente. Este índice aplica para velocidades superiores a los 1200rpm. Esto se debe a que, para velocidades inferiores, el sistema no inyecta etanol, porque a baja carga se presenta un incremento en emisiones contaminantes (principalmente CO y HC), en comparación con el uso de diesel convencional [28].

Con el valor del índice de sustitución ($I_{s,i}$) calculado en la Ecuación 3.1, para cada porcentaje de sustitución y para cada modo de operación i , se procede a encontrar el menor índice hallado (ver ecuación 3.2). Este valor mínimo corresponde al porcentaje al que finalmente se realizará la sustitución de etanol.

$$\%sustitución = \min (I_{s,i}) \quad (3.2)$$

3.3 Estimador Takagi-Sugeno

Debido a que el motor es una máquina compleja, no es posible usar modelos lineales para estudiar y analizar su comportamiento. Por esta razón, se utilizan modelos matemáticos difusos que permitan representar su dinámica. El modelo matemático difuso Takagi-Sugeno [56] hace uso de las reglas utilizadas en la lógica difusa, bajo la premisa de que las entradas y las salidas de un sistema no son particiones duras, sino difusas. Estas reglas determinan la forma en que la salida, definida por una función concreta, se ve afectada por la entrada. En un TSFM (*Takagi-Sugeno fuzzy model*, por sus siglas en inglés), el antecedente difuso corresponde a la entrada y el consecuente, obtenido al aplicar las reglas a las variables de interés, corresponde a la salida. El resultado final es un promedio que permite descomponer un modelo no lineal, en modelos sub-lineales locales. Estudios recientes han usado TSFM en la predicción de emisiones contaminantes atmosféricas [60].

Para este trabajo, la salida del sistema de inyección se calcula como el promedio ponderado de la contribución de cada tiempo de inyección medido para la clase i ($t_{iny_medido,i}$), como se observa en la ecuación 3.3.

$$t_{iny_estimado} = \frac{\sum_{n=1}^i W_i * t_{iny_medido,i}}{\sum_{n=1}^i W_i} \quad (3.3)$$

Donde W_i son los grados de pertenencia para las dos primeras clases (grados de pertenencia que mayor ponderación tienen respecto a los demás, sin incluir el grado de pertenencia de la clase NIC) de cada individuo a la clase i , con $i = 1,2$. El $t_{iny_estimado}$ representa la variable de salida del sistema.

3.4 Pruebas dinámicas de vehículo en banco de rodillos

3.4.1 Especificaciones técnicas del vehículo de pruebas y del freno dinamométrico de rodillos

Con el fin de realizar la validación del clasificador difuso desarrollado para el sistema del motor en banco de ensayos, se realizaron pruebas dinámicas en un banco de rodillos con las siguientes características técnicas [61] (ver Tabla 3.1):

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas del banco de rodillos

Característica	Descripción
Referencia	MD-RG-3000 HP CHASSIS DYNAMOMETER
Potencia	450 HP máxima capacidad de medición 268 HP máxima capacidad de absorción
Máxima velocidad	200 km/h intermitente 175 km/h continua
Peso en eje tracción	1500 kg máximo
Rodillos	Maquinados con precisión y balanceados dinámicamente. Unión de tracción por correa - bidireccional 8.575" (218 mm) de diámetro rodillos 35" (889 mm) largo rodillos 30" (762 mm) ancho de vía interno 88" (2235 mm) ancho de vía externo 17,1" (434 mm) espacio entre rodillos
Estructura	Estructura en acero de alta resistencia. Kit de anclajes de alta resistencia deben ser empotrados al piso.

El vehículo utilizado para seguir el ciclo de conducción corresponde a un vehículo diesel liviano con las características técnicas que se indican en la Tabla 3.2 [62].

Tabla 3.2 Especificaciones técnicas del vehículo

Característica	Descripción
Referencia	FOTON FHR CUMMINS 3.0 TON. EURO IV
Dimensiones generales (LxAxH)(mm)	5400 x 1880 x 2260
Marca del motor	CUMMINS
Referencia del motor	ISF 2.8S 4129V
Cilindraje del motor (cc)	2776
Potencia (HP)	129 @2000 rpm
Par máximo (Kgf-m)	31 @1600 rpm
Dimensiones conjunto llanta-rueda	205/75 R17,5
Relación de transmisión	5,375:1
Peso en vacío (kg)	2200
Peso bruto vehicular (kg)	5200
Capacidad de carga disponible máxima (kg)	3000
Dirección	Asistida hidráulicamente
Transmisión	4x2
Caja de cambios marca ZF Relaciones (máx/min)	5,015/0,789
Distancia entre ejes (mm)	2800
Velocidad máxima (km/h)	102
Capacidad de arranque en pendiente (%)	32

Con el fin de asegurar igualdad de condiciones para la realización de pruebas en un vehículo operando en ruta y en un vehículo ubicado sobre un banco de rodillos, se requiere conocer la relación entre la potencia y la masa del vehículo (PMR), la cual indica la clase del ciclo de conducción que se debe seguir en las pruebas. Además, se debe establecer la potencia resistiva en el rodillo (P_{RK80}) como parámetro de entrada al *software* del dinamómetro de rodillos.

3.4.2 Cálculo de la relación Potencia-Masa (PMR)

El cálculo de la PMR se obtiene a partir de las especificaciones técnicas del vehículo, mostradas en la Tabla 3.2. De allí se toman la potencia [W] y el peso bruto vehicular [kg], como se indica en la Ecuación 3.4.

$$PMR = \frac{\text{Potencia [W]}}{\text{Peso [kg]}} \quad (3.4)$$

En este caso, para una potencia de 129 HP, cuyo equivalente es 96195.3 W, y un peso bruto vehicular de 5200 kg, el resultado de la PMR es aproximadamente 18.5 W/kg. Este valor permite identificar la clase del ciclo WLTC a seguir en cada una de las pruebas a realizar con el vehículo. Lo anterior debido a que existen varios ciclos internacionales de homologación vigentes que permiten determinar, a partir de pruebas en banco de rodillos, las emisiones y los consumos de combustible para vehículos con diferente PMR con el fin de indicar el rendimiento del vehículo. La Tabla 3.3, muestra los ciclos de prueba WLTC [63] y, a partir del resultado de la PMR, la clase de ciclo a utilizar. En este caso el ciclo WLTC clase 1 es el indicado para valores de $PMR \leq 22$. Los ciclos pueden definirse a partir de la velocidad máxima establecida por el fabricante o de la PMR.

Tabla 3.3 Ciclos de prueba WLTC

Categoría	PMR [W/kg]	v_max [km/h]	Secuencia de fase
Clase 3b	PMR > 34	v_max ≥ 120	Bajo 3 + Medio 3-2 + Alto 3-2 + Extra-alto 3
Clase 3a		v_max < 120	Bajo 3 + Medio 3-1 + Alto 3-1 + Extra- alto 3
Clase 2	34 ≥ PMR > 22	-	Bajo 2 + Medio 2 + Alto 2 + Extra- alto 2
Clase 1	PMR ≤ 22	-	Bajo 1 + Medio 1 + Bajo 1

En la Tabla 3.4 se muestran los diferentes parámetros que caracterizan el ciclo WLTC clase 1, y la gráfica de velocidad respecto al tiempo para este ciclo, se muestra en la Figura 3.2 [63].

Tabla 3.4 Ciclos de prueba WLTC clase 1

Fase	Duración [s]	Duración de paradas [s]	Distancia [m]	Porcentaje de paradas [%]	v_max [km/h]	a_min [m/s ²]	a_max [m/s ²]
Bajo 1	589	154	3330	26,1	49,1	-1,00	0,76
Medio 1	433	48	4767	11,1	64,4	-0,53	0,63
Bajo 1	589	154	3330	26,1	49,1	-1,00	0,76
Total	1611	356	11428				

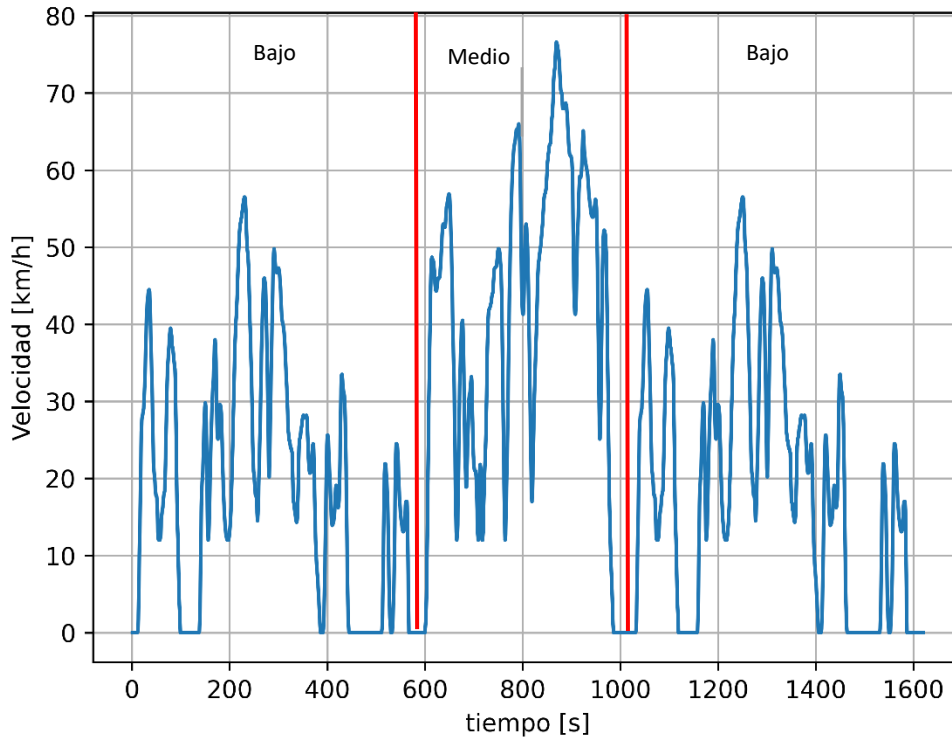


Figura 3.2 Ciclo de prueba WLTC clase 1

3.4.3 Cálculo de la potencia resistiva en el rodillo

Para el uso del banco de rodillos, se requiere programar unos coeficientes en el *software*. Esto se hace a partir de la información obtenida en la norma brasileña NBR 6601 [64], según la cual se realiza el cálculo de la potencia resistiva en el rodillo para una velocidad de 80 km/h (P_{RK80}) para vehículos livianos que operan en dinamómetro de rodillos dobles. El cálculo de la P_{RK80} se realiza mediante la Ecuación 3.5.

$$P_{RK80} = k * a * A + P + (t * M) [kW] \quad (3.5)$$

$k = 8,03 [kg/s^3]$ (constante)

$a = 0,58$ (coeficiente adimensional) para vehículos comerciales livianos

P : potencia, se obtiene a partir del área frontal de las protuberancias (A_p), para el vehículo de pruebas usado $A_p = 0,24 [m^2]$. De acuerdo con la Tabla 3.5, según la norma NBR 6601 la potencia correspondiente sería $P = 1,86 [kW]$.

A : es el área frontal del vehículo sin protuberancias, $A = 5,358 [m^2]$ (Ver Figura 3.3)

t : es cero para vehículos equipados con neumáticos radiales

M : Inercia equivalente, para vehículos cuya masa es superior a 2608 [kg], $M = 2495 [kg]$



Figura 3.3 Dimensiones frontales del vehículo sin protuberancias expresadas en [cm]

Tabla 3.5 Potencia en función del área frontal de la protuberancia

Ap [m ²]	P [kW]
0,084 < Ap ≤ 0,111	0,75
0,111 < Ap ≤ 0,139	0,97
0,139 < Ap ≤ 0,167	1,19
0,167 < Ap ≤ 0,195	1,42
0,195 < Ap ≤ 0,223	1,64
0,223 < Ap ≤ 0,251	1,86
0,251 < Ap ≤ 0,279	2,09
0,279 < Ap	2,31

Por lo tanto, de la ecuación 3.5 se obtiene que, $P_{RK80} = 21,648 [kW]$. Este valor es el que finalmente se ingresa como parámetro de entrada al *software* de control del banco de rodillos.

3.5 Experimentación

Para realizar el montaje experimental en el banco de rodillos con el vehículo de pruebas, se modificó el múltiple de admisión del motor, instalando el riel de inyección de etanol como se observa en la Figura 3.4. Allí se resaltan 2 de los 4 inyectores de etanol. Además, se utilizaron varios equipos de medición para registrar los datos de interés. Las emisiones contaminantes se midieron con un equipo portátil para medición de emisiones contaminantes (PEMS por su nombre en inglés). Su referencia es ParSYNC, del fabricante 3DATX. Este equipo permite medir las emisiones instantáneas (con frecuencia de 1 Hz) de NO, NO₂ y PN, entre otros. La relación aire-combustible (A/F) se midió con el equipo MEXA-730λ marca HORIBA, el cual permite obtener el consumo de combustible, conociendo la medida del flujo másico de aire, realizada a través de un sensor MAF de hilo caliente, previamente calibrado. Para el registro del consumo de etanol se utilizó un flujómetro másico (principio de Coriolis) SITRANS FCT030, marca SIEMENS.

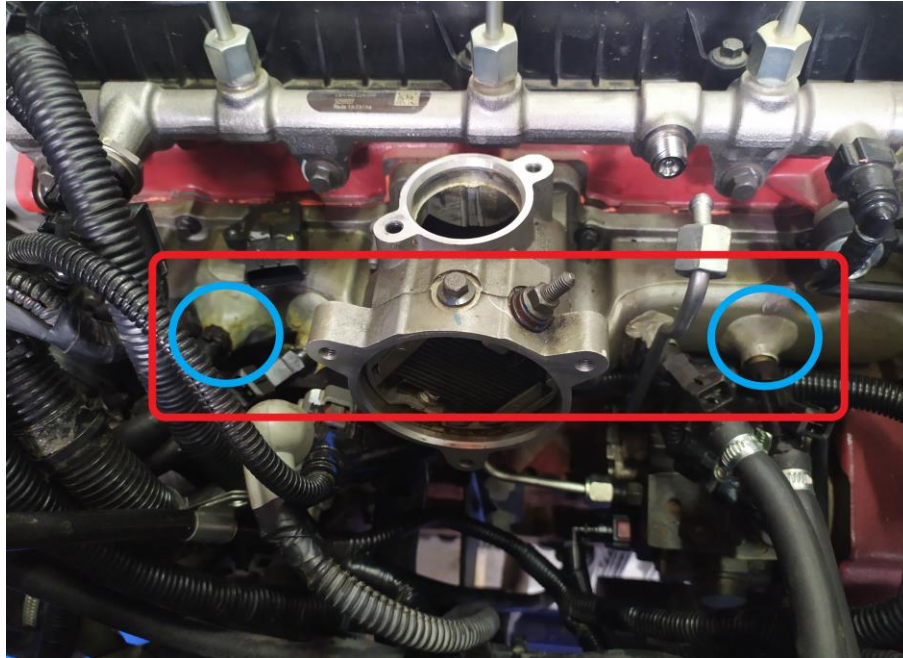


Figura 3.4 Motor del vehículo con múltiple de admisión modificado

La Figura 3.5, corresponde al dinamómetro de rodillos marca MUSTANG y a la ubicación de las ruedas traseras del vehículo de pruebas sobre dicho dinamómetro.



Figura 3.5 Vehículo de prueba sobre dinamómetro de rodillos

Se desarrollaron en total 8 pruebas en banco de rodillos, siguiendo el ciclo de conducción WLTC clase 1, como se indica en la Tabla 3.6. De las 8 pruebas, 3 se realizaron con diesel comercial (con adición de biodiesel de palma al 10%), y las 5 pruebas restantes, se realizaron con etanol a diferentes porcentajes de sustitución. El algoritmo de estimación estimó el porcentaje de sustitución, en función de la reducción de emisiones y la menor pérdida de eficiencia energética. Entre las 5 pruebas realizadas con etanol se consideró el arranque en frío como una prueba de interés, para conocer las emisiones del vehículo operando con etanol, antes de que el motor haya alcanzado una temperatura de operación estable.

Tabla 3.6 Pruebas realizadas en banco de rodillos

No de Prueba	Tipo de combustible	Nomenclatura
1	Diesel comercial (B10)	D1
2	Diesel comercial (B10)	D2
3	Diesel comercial (B10)	D3
4	Diesel comercial + etanol	E1
5	Diesel comercial + etanol	E2 arranque en frío
6	Diesel comercial + etanol	E3
7	Diesel comercial + etanol	E4
8	Diesel comercial + etanol	E5

Antes de iniciar cada ciclo de conducción, se realizaron ajustes a cero y calibraciones a los equipos de medición de emisiones contaminantes y de flujo de combustible, además del sistema de inyección electrónica con su sistema de clasificación difuso embebido. Por otro lado, también se ajustaron las ecuaciones características de cada sensor del vehículo que se conectaron al sistema electrónico de control.

La Figura 3.6, muestra la instalación experimental del vehículo de pruebas ubicado en banco de rodillos, así como los equipos de medición de emisiones contaminantes y de consumo de combustible.

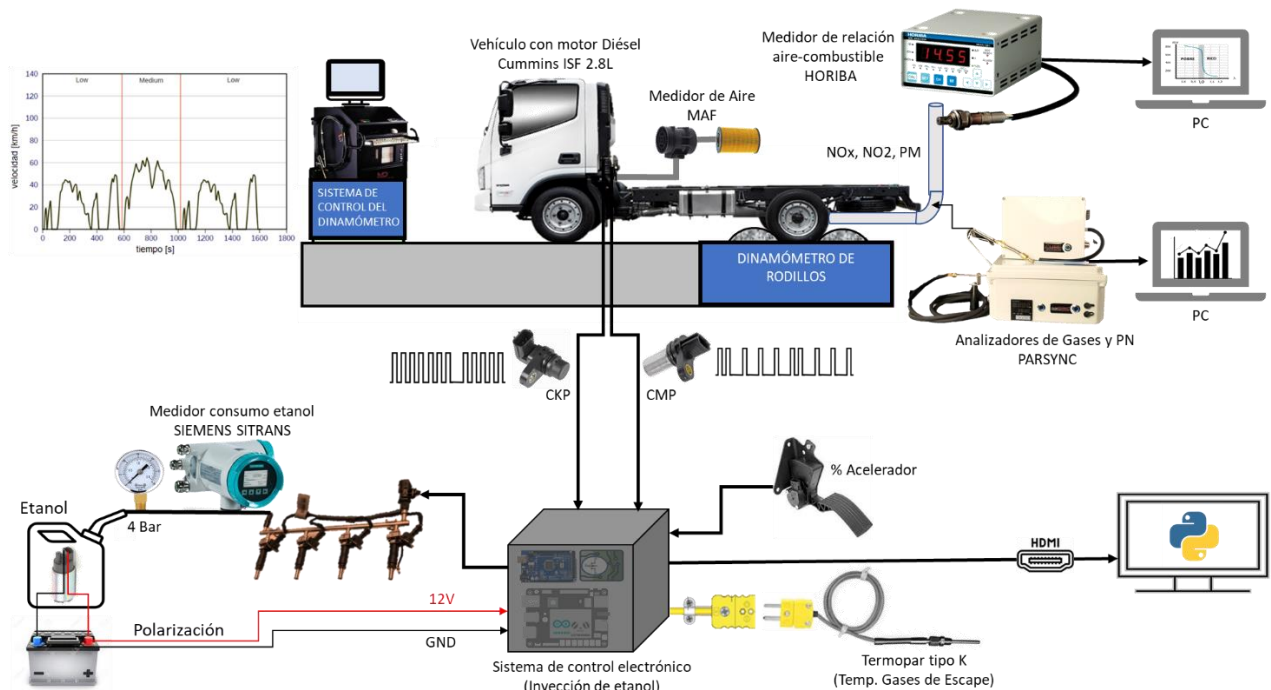


Figura 3.6 Instalación experimental del vehículo en banco de rodillos

A partir del ciclo de conducción establecido, se procedió a ingresar el valor de la P_{RK80} como parámetro de entrada del *software* que controla el sistema del freno dinamométrico de rodillos. Luego, se conectaron al tubo de escape del vehículo el equipo analizador de gases y PN (ParSync), este equipo tiene su propio sistema de adquisición de datos, con una frecuencia de muestreo de 10

Hz. Al tubo de escape también se conectó el medidor de la relación aire-combustible (HORIBA-MEXA-730λ).

Las señales de los sensores de posición del árbol de levas (CMP) y del sensor de posición del cigüeñal (CKP) (entradas digitales) del vehículo (tomadas directamente de los pines de salida de cada sensor), se usan para sincronizar la inyección de etanol con la inyección de diesel y el movimiento del motor, estas señales ingresan a una tarjeta Arduino MEGA 2560 que determina el momento de la apertura de los inyectores de etanol. Esta misma tarjeta es la que realiza el control de conmutación de los inyectores a partir de un circuito transistorizado. La posición del acelerador, la temperatura de los gases de escape a la entrada de la turbina (entradas análogas), y la señal de velocidad del motor proveniente del sensor CKP (acondicionada con un conversor de frecuencia a voltaje) ingresan al microcontrolador ATmega32u4 (Arduino Leonardo) dispuesto al interior del microcomputador Lattepanada. En este microcontrolador es donde se realiza la lectura de los descriptores y se envían los datos de lectura al sistema embebido Lattepanada para que se realice la clasificación difusa y la estimación de los tiempos de inyección. Tanto el Arduino MEGA externo como el sistema embebido Lattepanada y su Arduino Leonardo interno, se comunican a través de los pines de comunicación serial (Tx-Rx).

Las salidas del sistema electrónico son señales digitales que corresponden al control de los inyectores de etanol. Finalmente, la medición del consumo de etanol se registra con un flujómetro másico tipo Coriolis (SIEMENS - SITRANS FCT030) conectado en serie con el riel de inyección del alcohol. Los datos del porcentaje de sustitución inyectado, del tiempo de inyección de etanol y de las variables de entrada al algoritmo de clasificación difuso se registran en el microcomputador Lattepanada, componente electrónico fundamental del sistema de control de fumigación de etanol. Para ampliar la información del sistema electrónico de control, ver Anexo B.

Las pruebas se realizaron sincronizando el inicio de la toma de datos entre varias personas que manipulaban los diferentes equipos. Se verificó que la reproducción del ciclo (real vs. teórico) fuese satisfactoria. Para la reproducción del ciclo, el conductor estaba en la cabina del vehículo, frente a una pantalla que mostraba las señales de velocidad real, velocidad teórica, y la parte del ciclo que está por venir.

La metodología para la clasificación y estimación de los tiempos de inyección de etanol se muestra en la Figura 3.7.

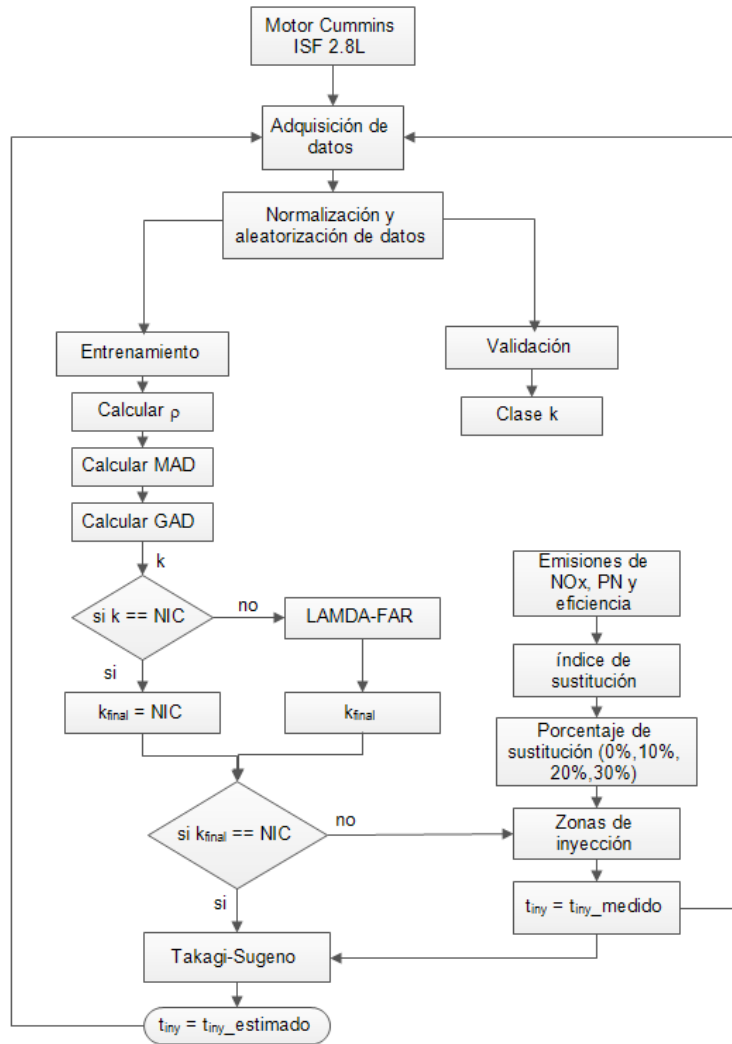


Figura 3.7 Metodología para la clasificación y estimación de los tiempos de inyección

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA EN BANCO DE ENSAYOS

En este capítulo se presentan los resultados de las emisiones contaminantes (THC, NO_x y PN), la eficiencia energética, entre otros parámetros de interés para el motor en banco de ensayos, dichos parámetros son el insumo para el desarrollo de un sistema electrónico de inyección de etanol que permita sustituir, parcialmente, el uso de combustibles fósiles como el diesel por combustibles alternativos como el etanol hidratado. También se presentan los resultados del algoritmo de clasificación difuso para establecer los estados funcionales del motor y determinar así los tiempos de la apertura controlada de los inyectores de etanol.

Debido a que se realizó un mapeo representativo en el motor, ya que se midieron 22 puntos de operación a diferentes velocidades y grados de carga (ver Anexo A), los resultados representan de forma confiable la operación real del sistema. Esta afirmación se valida al tener en cuenta que se realizaron pruebas de repetibilidad de las instalaciones experimentales fumigando etanol en el motor en banco de ensayos (ver Anexo D). Además, estas pruebas preliminares permitieron verificar el funcionamiento de los componentes mecánicos, la instrumentación instalada, y los equipos de medición, tanto de forma individual como al momento de integrar el sistema completo.

También se evidencian los resultados del sistema de clasificación difuso, capaz de detectar los modos de operación del motor, y del sistema de control en lazo cerrado para realizar la sustitución en energía de diesel por etanol hidratado de forma autónoma. Finalmente, se presentan los resultados de los tiempos de inyección de etanol obtenidos a partir del modelo lineal afín con el objetivo de realizar la sustitución autónoma del etanol para cada combustible medido y se incluyen sus respectivos porcentajes de error.

4.1 Resultados de motor en banco de ensayos

A partir de la medición de las principales variables de desempeño del motor, incluyendo las variables descriptoras del sistema de clasificación (velocidad del motor, temperatura de gases de escape y posición del acelerador), las emisiones de NO_x, PN, THC (hidrocarburos totales), y la eficiencia, se obtuvo una base de datos, la cual fue el insumo principal para desarrollar y validar el algoritmo de clasificación difuso que permitió la detección de los estados funcionales del motor siguiendo la metodología propuesta en la sección 2.3. A continuación, se presentan los resultados gráficos de las emisiones reguladas, expresadas como factor de emisión, y la eficiencia energética, obtenidas para los 22 modos de operación medidos en el motor diesel de automoción, operando con combustible diesel comercial (DC), y con adición de etanol hidratado, a diferentes porcentajes: 10% (E10), 20% (E20) ó 30% (E30) en base energética, para realizar una sustitución parcial de combustible fósil (diesel) por combustible alternativo.

4.1.1 Emisiones de THC

La Figura 4.1, muestra cómo aumentan las emisiones de THC, en la medida que aumenta el porcentaje de sustitución de diesel por etanol hidratado, para la mayoría de los modos de operación medidos. Por ejemplo, para el caso de M6, las emisiones de hidrocarburos totales son mayores para el porcentaje de sustitución de etanol más alto (E30), mientras que al inyectar sólo diesel comercial (DC), que corresponde a una sustitución de etanol del 0%, las emisiones de THC son las más bajas para dicho punto de operación. Este resultado puede ocurrir por varios factores, entre ellos, la combustión incompleta de los alcoholes producto de la mezcla aire-alcohol que permanece en la entrada de la cámara de combustión, el largo retraso en el encendido y el bajo número de cetano del etanol respecto al del diésel. Además, la disminución de la temperatura en el cilindro al usar etanol y una evaporación incompleta del mismo, puede ocasionar también el incremento de este contaminante como se argumenta en [6], [15]. La tendencia presentada en el ejemplo anterior, se replica para la mayoría de los modos de operación medidos.

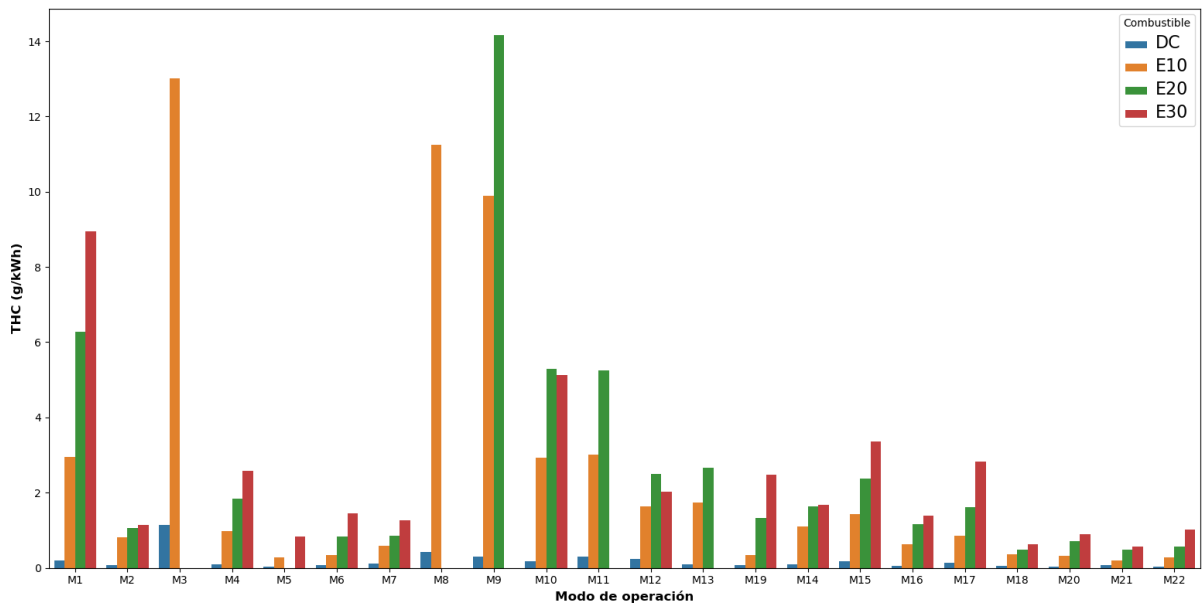


Figura 4.1 Emisiones específicas de Hidrocarburos (THC)

4.1.2 Emisiones de NOx

En la Figura 4.2 se observan los resultados obtenidos para las emisiones de NOx. Allí se muestra el efecto de inyectar etanol dependiendo del par aplicado. Para modos de operación medidos a baja carga (M1, M3, M8, M9, M10 y M11) que corresponden a un par aplicado menor o igual a 50 Nm, las emisiones de NOx disminuyen en la medida que el porcentaje de sustitución aumenta respecto al diesel, esto debido al efecto de enfriamiento que produce el etanol por su alto calor latente de vaporización, y partiendo de que la formación de NOx se produce a causa de las altas temperaturas en el cilindro como se menciona en el trabajo de Pandey *et al.* [27].

Para los modos de operación medidos a carga media (M2, M4, M14, M15, M16 y M17), cuyos valores de par son mayores a 50 Nm y menores o iguales a 75 Nm, los valores de óxidos de nitrógeno son muy similares entre sí para los combustibles DC, E10 y E20 en todos los modos de operación excepto M2, donde se observa un leve incremento de NOx al ir aumentando el porcentaje de sustitución. De manera general, no se observó una tendencia clara en el incremento o decremento de este contaminante respecto al tipo de combustible usado ya que las barras de error se solapan indicando que no hay una diferencia estadísticamente significativa.

Finalmente, para los modos de operación medidos a carga alta (M5, M6, M7, M18, M19, M20, M21 y M22) con valores de par mayores a 75 Nm, se evidenció que al inyectar etanol al 20% (E20) se produce un aumento en las emisiones de NOx respecto a los demás combustibles, excepto para M5 y M19 donde la mayor cantidad de emisiones se presentan al hacer la sustitución al 10% (E10). El comportamiento anterior se puede explicar partiendo de que el motor al estar operando a alta carga incrementa su temperatura y se propicia la formación de NOx. En general, para los modos de operación medidos a carga alta, no se observó una tendencia clara de estas emisiones con el contenido de etanol.

Es importante aclarar que las emisiones de NOx se midieron después del catalizador, dispositivo encargado de convertir los gases tóxicos producto de la combustión como el NOx, en gases nobles a través de una reacción química, la cual se genera a altas temperaturas como se explica en [65], por lo tanto, se evidencia que los modos de operación de baja carga (menor temperatura de operación del motor) tienen factores de emisión superiores a los modos de operación de alta carga.

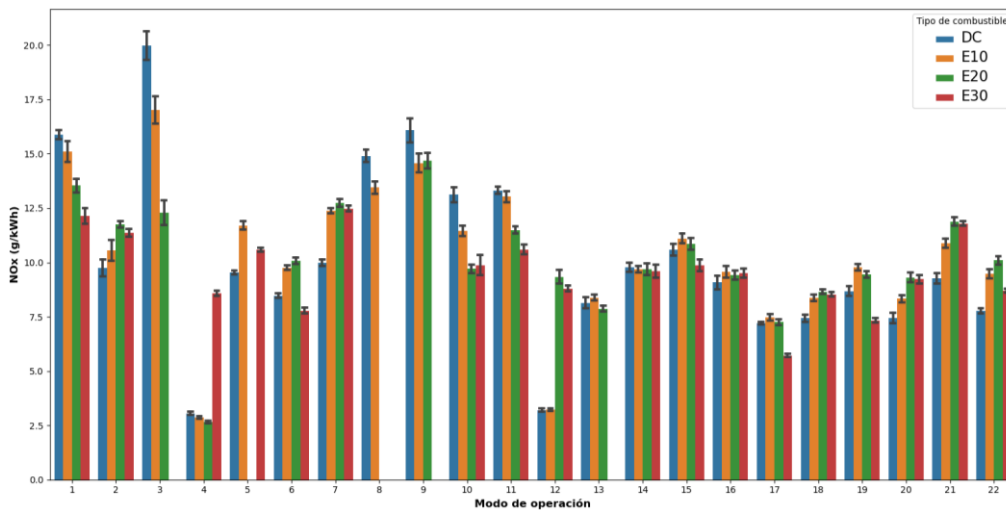


Figura 4.2 Emisiones específicas de NOx

4.1.3 Emisiones de PN

Las emisiones de PN (número de partículas) se presentan en la figura 4.3. Estas emisiones tienden a disminuir, respecto al diesel, al aumentar el porcentaje de sustitución de etanol para los modos de operación (M2, M3, M5, M6, M7, M10, M12, M14, M16, M18, M20, M21 y M22), lo anterior independientemente del grado de carga, este resultado coincide con lo reportado en la literatura sobre reducción de material particulado (PM), ya que el oxígeno presente en el etanol mejora la combustión promoviendo la oxidación de más partículas de hollín, además, ciertas propiedades del etanol como su bajo contenido de carbono, bajo número de cetano y baja presencia de compuestos aromáticos, también permitiría justificar este resultado de acuerdo a lo planteado en [26], [66].

Los modos de operación M1 y M9 no tienen una diferencia estadísticamente significativa al inyectarse diferentes porcentajes de etanol respecto al diesel, estos dos modos de operación de baja carga coinciden en ser los modos de operación en los que se midió la menor velocidad del motor (1350 rpm y 1440 rpm respectivamente).

Finalmente, se observa un incremento en las emisiones de PN al inyectar mayor cantidad de etanol hidratado para los modos de operación M4, M8, M11, M13, M15, M17 y M19, independiente de su grado de carga, pero con la particularidad de que estos modos de operación fueron medidos a velocidades que superan las 2100 rpm, esto tiene sentido considerando que a mayor velocidad del motor, la combustión se realiza más rápido y por lo tanto se reduce el tiempo necesario para quemar completamente el combustible, esto lleva a una menor oxidación de las partículas y puede producirse un mayor número de las mismas como se menciona en el trabajo desarrollado por Wai *et al.* [67]. Finalmente, debido a que en la literatura se reporta poco sobre el efecto de los alcoholes en el número de partículas de hollín que se emiten al ambiente en motores diésel, y pese a que hay muchos estudios que relacionan el efecto de los alcoholes con las emisiones del PM en masa, no hay una relación directa entre el número de partículas de hollín y su masa que permitan justificar el anterior hallazgo como se estudió en [68].

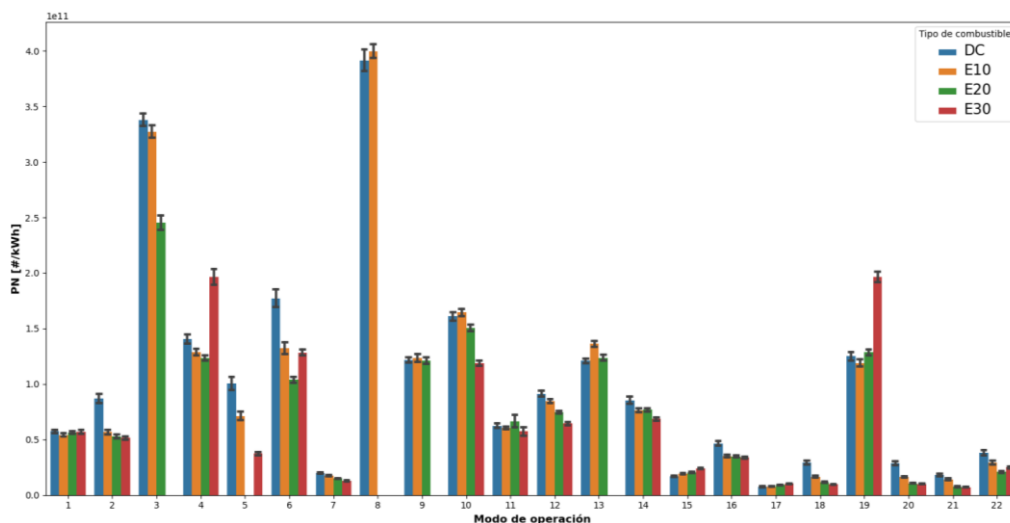


Figura 4.3 Emisiones específicas de PN

4.1.4 Eficiencia energética

Al realizar una sustitución en energía de diesel por etanol hidratado, la eficiencia disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución, respecto a cuando el motor opera usando sólo diesel comercial. Los resultados de la eficiencia para los diferentes puntos de operación medidos al realizar la sustitución por etanol hidratado se pueden observar en la Figura 4.4 y fueron obtenidos a partir de la Ecuación 4.1. Lo anterior se puede explicar debido a que, al medir a igualdad de potencia en el eje del motor, y realizar una sustitución en energía de diesel por etanol, se requiere una mayor cantidad en volumen de alcohol (aproximadamente el doble) respecto al porcentaje de combustible diesel sustituido. Esto se debe al menor poder calorífico del etanol (aproximadamente 27 MJ/kg) respecto al del diesel (aproximadamente 43 MJ/kg). Al mismo tiempo, la cantidad inyectada de etanol desplaza parte del aire que se admitiría sin el uso del alcohol provocando una combustión incompleta (aún con la presencia del oxígeno extra que proporciona este combustible) y una pérdida de energía en el proceso. Por lo anterior, desde el punto de vista de la cantidad del combustible usado respecto a la potencia generada, se obtiene una mejor eficiencia con el combustible fósil que con la inyección de etanol, aunque no se produzca entre ellos una diferencia que impacte significativamente el rendimiento del motor como se observa en los resultados de este trabajo y que coinciden con los hallados en [67]. Además, se observa que las mejores eficiencias del motor (superiores al 30%) se alcanzan para la mayoría de los modos de operación de alta carga (M5, M6, M18, M20, M21 y M22) y las menores eficiencias medidas, se obtuvieron para algunos de los modos de operación a baja carga (M3, M8 y M11).

$$\eta = \frac{P}{mf_{DC} * PCI_{DC} + mf_E * PCI_E} \quad (4.1)$$

Donde,

P corresponda a la potencia en $[kW]$

mf_{DC} y mf_E corresponden al flujo másico de combustible para el diesel y para el etanol en $\left[\frac{mg}{s}\right]$ respectivamente.

PCI_{DC} y PCI_E corresponden al poder calorífico inferior del diesel y del etanol en $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ respectivamente.

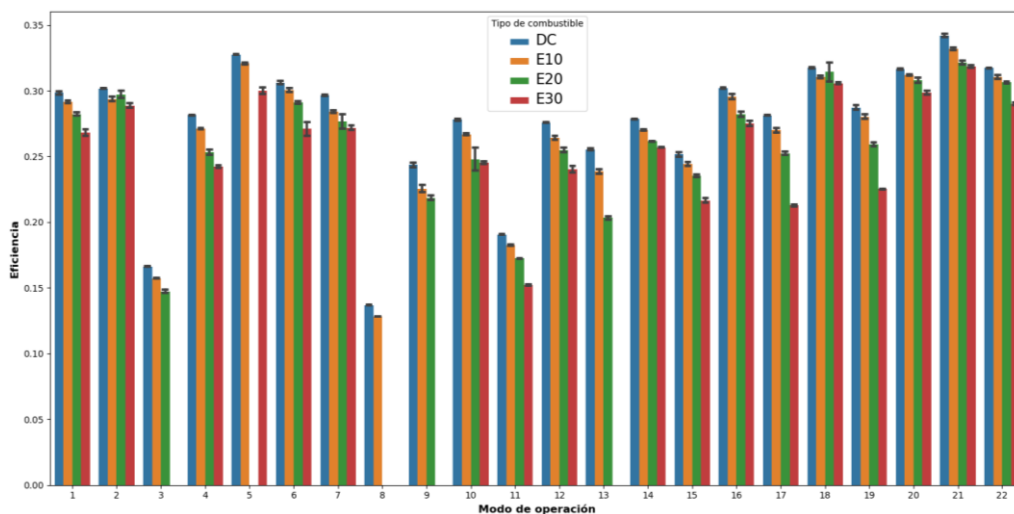


Figura 4.4 Eficiencia energética del motor

4.1.5 Resultados del clasificador difuso

A partir de las variables de entrada del clasificador (velocidad, temperatura de gases de escape y posición del acelerador), se muestran los resultados del entrenamiento del algoritmo y la validación de éste usando los clasificadores difusos LAMDA [58] y LAMDA-FAR [10] para cada uno de los combustibles usados en los 22 puntos de operación medidos. La importancia de estos resultados es determinante para la correcta operación del sistema electrónico de fumigación de etanol hidratado en el motor, al igual que la identificación de nuevos estados funcionales no considerados en la etapa de entrenamiento del algoritmo, ya que, si este proceso no se realiza correctamente, el control de la fumigación de etanol fallará. Para cada porcentaje de sustitución (10%, 20% y 30%) los datos de entrenamiento y validación del algoritmo se obtienen a partir del esquema metodológico presentado anteriormente en la Figura 2.4 del Capítulo 2. Para cada prueba se verifica la pertenencia de un individuo a su respectiva clase y además se valida que, los datos desconocidos para el algoritmo pertenezcan a una nueva clase no identificada (clase NIC). Los datos usados para el entrenamiento fueron ingresados al algoritmo en orden ascendente desde M1 hasta M22 (sin considerar los modos reservados para validación). Mientras que, para la etapa de validación, se ingresan primero los datos nuevos (M3, M5, M9, M15, M16 y M2) y luego los datos pertenecientes al 30% restante de los modos de operación usados para el entrenamiento.

Para todas las figuras que se muestran a continuación con los resultados de la clasificación, el eje de las abscisas corresponde al número de datos o individuos [N] de cada prueba y el eje de las ordenadas hace referencia a la clase [K]. Además, la clase i hace referencia al modo de operación M_i .

4.1.5.1 Clasificación para diesel comercial (DC)

Al usar diesel comercial, se obtiene el resultado mostrado en la Figura 4.5 para la etapa de entrenamiento supervisado. Ambos clasificadores (LAMDA y LAMDA-FAR) proporcionan la misma respuesta para todos los combustibles (DC, E10, E20 y E30) en los 16 modos de operación esperados, donde se obtiene un 100% de individuos bien clasificados (ningún individuo en la clase NIC). Por lo anterior, sólo se presenta la gráfica de entrenamiento del algoritmo para el combustible diesel comercial (DC).

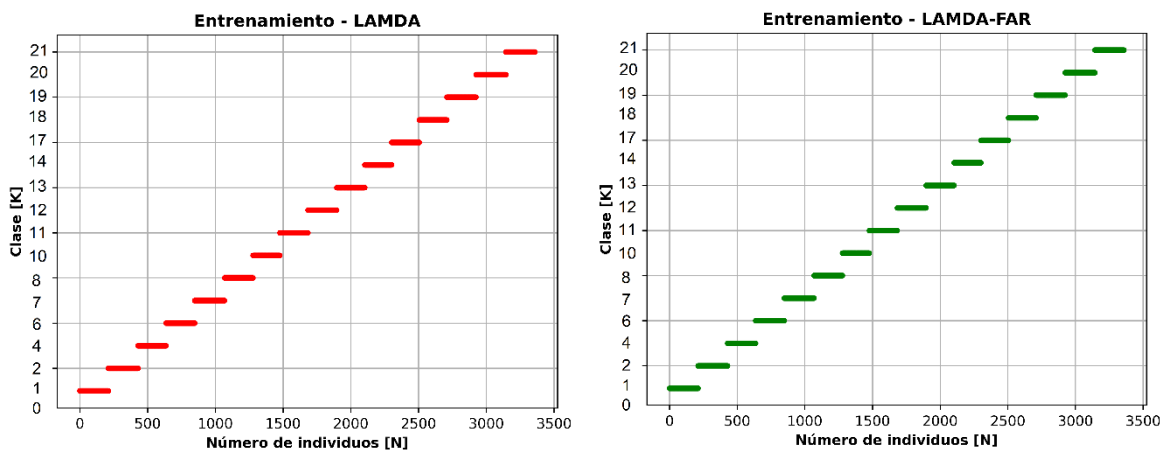


Figura 4.5 Etapa de entrenamiento para DC con LAMDA y LAMDA-FAR

La Figura 4.6, muestra los resultados de la validación para DC, allí se observa que los individuos que hacen parte del 30% de la base de datos de entrenamiento quedan correctamente clasificados en

los 16 modos de operación esperados. Por otro lado, los datos pertenecientes a los modos de operación desconocidos para el algoritmo tienden a agruparse, en el caso del algoritmo LAMDA, en las clases pre-existentes, generándose un error del 100% en su clasificación. Para el algoritmo LAMDA-FAR, se muestra que cinco de los seis modos de operación desconocidos fueron correctamente clasificados en la clase NIC (clase 0) y sólo uno de ellos (M5) fue clasificado en la clase pre-existente (clase 6), generándose un error del 17% de individuos mal clasificados en la NIC. El error se atribuye a que los modos de operación M5 y M6 comparten valores muy similares en los descriptores de entrada al algoritmo como se observa en la Tabla 4.1.

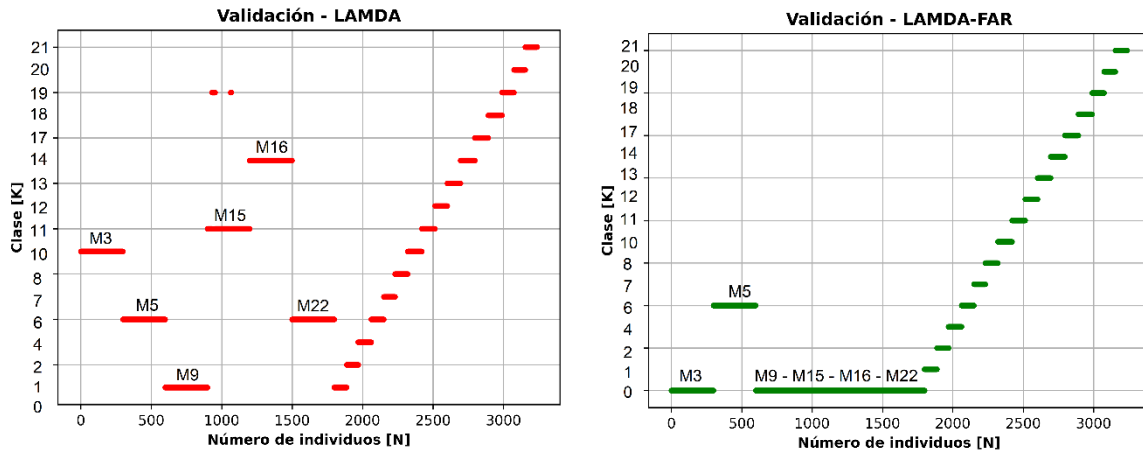


Figura 4.6 Etapa de validación para DC con LAMDA y LAMDA-FAR

Tabla 4.1 Valores medidos para los modos de operación M5 y M6 usando DC

Modo de operación	Velocidad del motor [rpm]		Temperatura de gases de escape [°C]		Posición del acelerador [%]
	min	max	min	max	
M5	2312	2318	425	428	39.5%
M6	2508	2514	407	408	39.5%

4.1.5.2 Clasificación para sustitución de etanol al 10% (E10)

En la Figura 4.7, se muestran los resultados para validación de la sustitución en energía al 10% de diesel por etanol hidratado para los clasificadores LAMDA y LAMDA-FAR. Se evidencia que con el algoritmo LAMDA, los datos nuevos son clasificados incorrectamente (el 100% de los individuos son clasificados en clases diferentes a la NIC), ya que se esperaba que quedaran agrupados en la clase de no identificación, dado que no se usaron en la etapa de entrenamiento del algoritmo. Con el algoritmo LAMDA-FAR, el porcentaje de individuos incorrectamente clasificados se reduce al 18%, mejorando considerablemente los resultados en la etapa de validación del clasificador respecto al algoritmo LAMDA original. Se resalta que LAMDA-FAR proporciona una mejora significativa para la detección de nuevos estados funcionales no previstos en etapas de entrenamiento como también ocurre en el trabajo de Morales *et al.* [29].

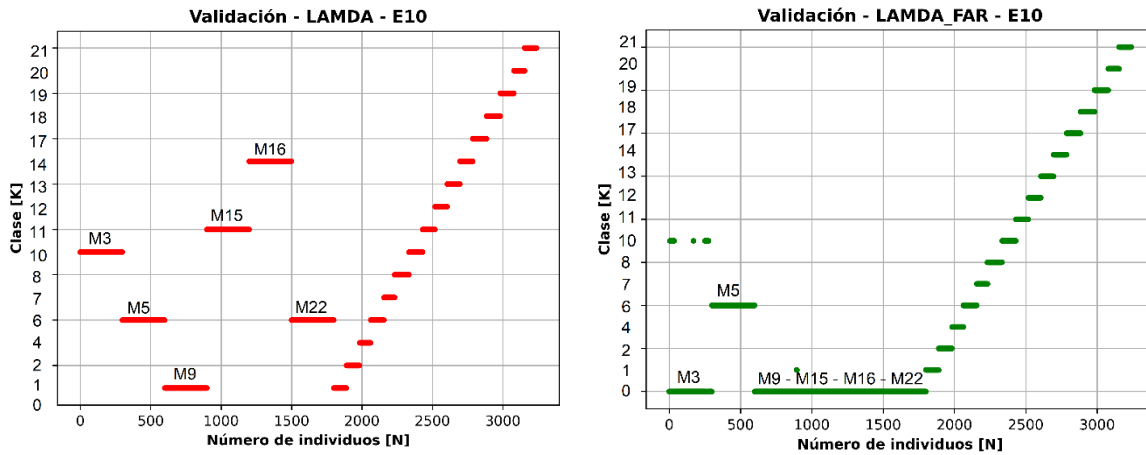


Figura 4.7 Etapa de validación para E10 con LAMDA y LAMDA-FAR

Nótese que en la validación con LAMDA-FAR aparecen algunos datos iniciales de los modos M3 y M5 clasificados erróneamente en la clase 10 ya que presentaron similitudes en la combinación simultánea de los 3 descriptores. Algo similar ocurre con el nuevo modo de operación (M5) que, al ingresar al algoritmo en la validación, es clasificado en la clase pre-existente M6, esto debido a los valores tan cercanos que presentan los descriptores en éstos 2 modos de operación como se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Valores medidos para los modos de operación M5 y M6 usando E10

Modo de operación	Velocidad del motor [rpm]		Temperatura de gases de escape [°C]		Posición del acelerador [%]
	min	max	min	max	
M5	2306	2324	422	424	37.6
M6	2488	2494	405	407	38.4

4.1.5.3 Clasificación para sustitución de etanol al 20% (E20)

La Figura 4.8, presenta los resultados para validación de la sustitución en energía al 20% de diesel por etanol hidratado para los clasificadores LAMDA y LAMDA-FAR. En este caso se tienen sólo cinco modos de operación que ingresan como datos nuevos, ya que, de los 6 modos de operación elegidos como datos desconocidos, sólo en cinco se logró hacer sustitución al 20% dada la inestable operación del motor, la cual no permitió mantener un estado estacionario de medición para el modo de operación M5.

Con el algoritmo LAMDA, los datos nuevos no quedan agrupados en la NIC, se agrupan en otras clases ya existentes, con lo cual se genera un error en la clasificación de los datos nuevos del 100%. Con LAMDA-FAR, el porcentaje de individuos bien clasificados en la NIC es aproximadamente del 99%. Por lo tanto, la mayoría de los datos nuevos quedan agrupados en la NIC como se esperaba.

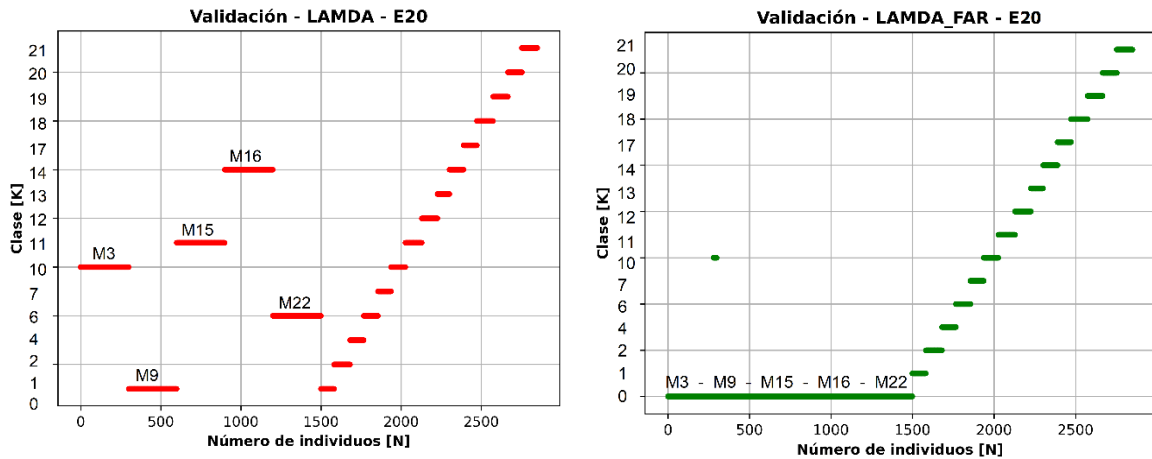


Figura 4.8 Etapa de validación para E20 con LAMDA y LAMDA-FAR

4.1.5.4 Clasificación para sustitución de etanol al 30% (E30)

Los resultados para validación de la sustitución en energía al 30% de diesel por etanol hidratado se observan en la Figura 4.9. En este caso, sólo se logró sustituir este porcentaje de etanol en cuatro de los seis modos de operación identificados como datos nuevos, ya que, al realizar la sustitución a este porcentaje, se presentó inestabilidad del motor, que no permitió mantener un estado estacionario de medición para los modos de operación M3 y M9.

LAMDA agrupa en clases pre-existentes los datos nuevos y no los lleva a la clase NIC como debería ser, mientras que con LAMDA-FAR, se tiene un porcentaje de individuos bien clasificados en la NIC del 50%, este resultado, aunque mejor respecto a LAMDA, no es tan bueno como el que se obtuvo con los otros combustibles. Esto se debe a la similitud de las variables descriptoras entre los modos de operación M5 y M17 como se muestra en la Tabla 4.3 y entre M19 y M22, lo cual implicaría incluir variables adicionales que permitan distinguir de forma más precisa entre una clase y otra.

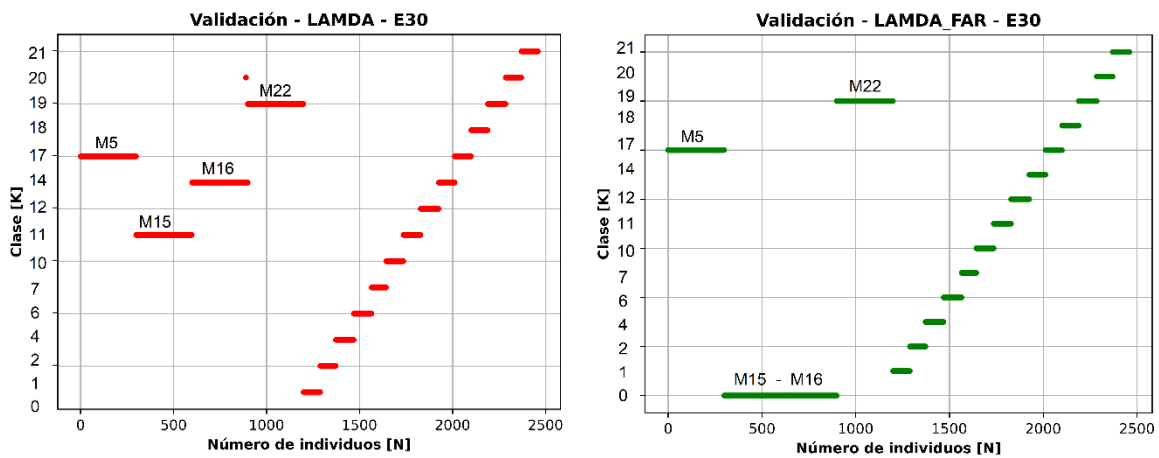


Figura 4.9 Etapa de validación para E30 con LAMDA y LAMDA-FAR

Tabla 4.3 Valores medidos para los modos de operación M5, M17, M19 y M22 usando E30

Modo de operación	Velocidad del motor [rpm]		Temperatura de gases de escape [°C]		Posición del acelerador [%]
	min	max	min	max	
M5	2308	2324	425	427	31.3
M17	2320	2332	416	419	28.6
M19	2426	2434	427	429	29.4
M22	2398	2404	421	422	31.3

4.1.6 Zonas de inyección de etanol

De acuerdo con la metodología presentada en la sección 2.3.3 para la determinación de las zonas de inyección, a continuación, se presentan los resultados obtenidos los cuales se muestran en las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12. Para cada una de estas figuras, el eje de las abscisas corresponde al número de individuos [N] o datos de cada combustible y de cada modo de operación. El eje de las ordenas corresponde a la zona de inyección conformada.

Para la sustitución en energía al 10%, el algoritmo LAMDA en modo no supervisado establece 7 zonas de inyección distinguidas por colores como se observa en la Figura 4.10, cada zona agrupa los modos de operación donde se inyecta una cantidad similar de etanol, por ejemplo, M14, M17, y M21, conforman la zona de inyección 6 identificada con color rojo. De la misma manera, en color verde se agrupan los modos de operación M2, M12 y M20 en la zona de inyección 5. Considerando que hay 2 zonas (zona 4 y zona7) cuyo tiempo de inyección es bastante similar, se decide agruparlas en una sola, resultando así en total seis zonas de inyección para el combustible E10 (ver Tabla 2.4).

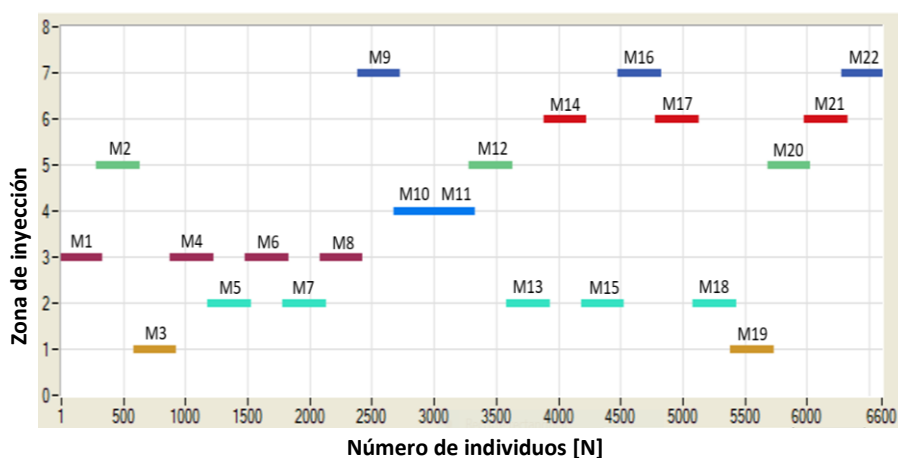


Figura 4.10 Zonas de inyección E10

Las zonas de inyección que resultan para el E20 son 3 y sus respectivos modos de operación asociados se muestran en la Figura 4.11. Como ejemplo, los modos de operación M1, M2, M3 y M9, conforman la zona de inyección 1 identificada con color amarillo puesto que dichos modos de operación tienen valores de tiempos de inyección similares que oscilan entre 3 ms y 3.7 ms (ver Tabla 2.5).

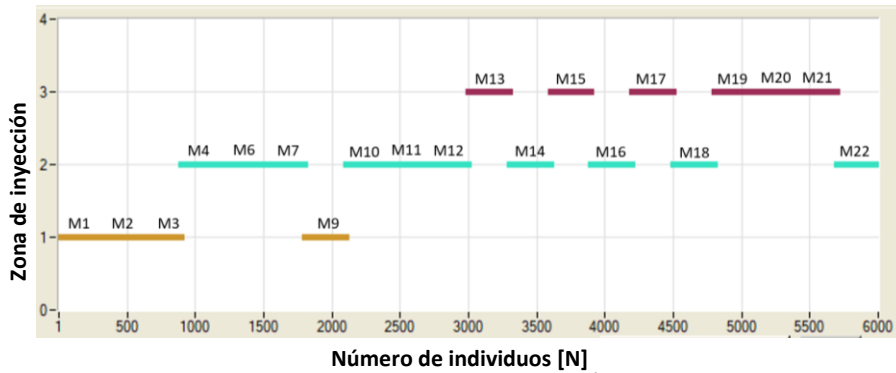


Figura 4.11 Zonas de inyección E20

En la sustitución en energía al 30%, se obtienen cinco zonas bien distribuidas de acuerdo con los tiempos de inyección medidos. Para este caso, los modos de operación M5, M11 y M22, conforman la zona de inyección 4 representada con color azul, estos modos de operación comparten valores de tiempos de inyección similares que oscilan entre 7 ms y 7.6 ms (ver Tabla 2.6).

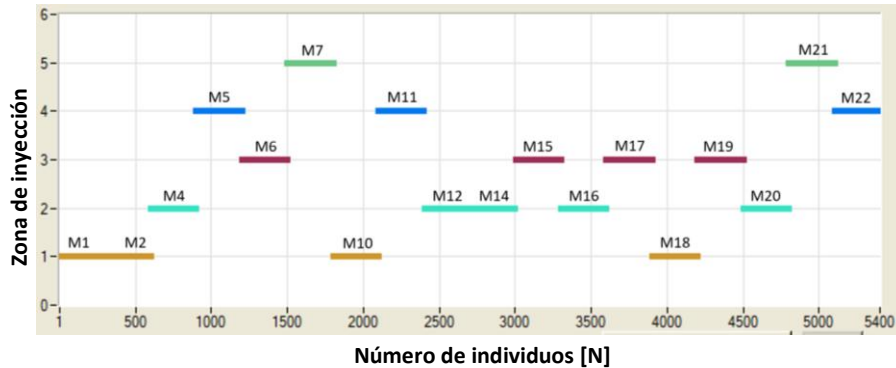


Figura 4.12 Zonas de inyección E30

4.1.7 Tiempos de inyección de etanol

Las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15 muestran la gráfica de los tiempos de inyección medidos, los tiempos de inyección estimados, y su respectivo porcentaje de error para cada combustible: E10, E20 y E30, respectivamente. Estos tiempos se estimaron aplicando el modelo lineal afín (MLA) presentado en la sección 2.3.4, a partir de los promedios de los descriptores que se usaron como variables de entrada al clasificador difuso (velocidad, temperatura de gases y posición del acelerador). Luego, la matriz obtenida (que no necesariamente es cuadrada) se resuelve usando la pseudo inversa de Moore [55], que consiste en un método de optimización por mínimos cuadrados para calcular la inversa de una matriz $[m \times n]$, con $m \neq n$ (para una matriz que no es cuadrada) o $m = n$ (para una matriz cuadrada), donde m y n son el número de filas y el número de columnas de la matriz respectivamente. La solución de esta matriz permite hallar los valores de las constantes características como se indicó en la sección 2.3.4.

Para el combustible E10 (ver Figura 4.13), el máximo error alcanzado fue de 3.141%, lo que significa que se estaría sustituyendo una cantidad de $(10\% \pm 0.314\%)$. En promedio el error fue de 0.473%, que equivale a sustituir una cantidad de $(10\% \pm 0.0473\%)$, lo anterior demuestra que, para este porcentaje de sustitución, el modelo usado para realizar la estimación de los tiempos de inyección es adecuado.

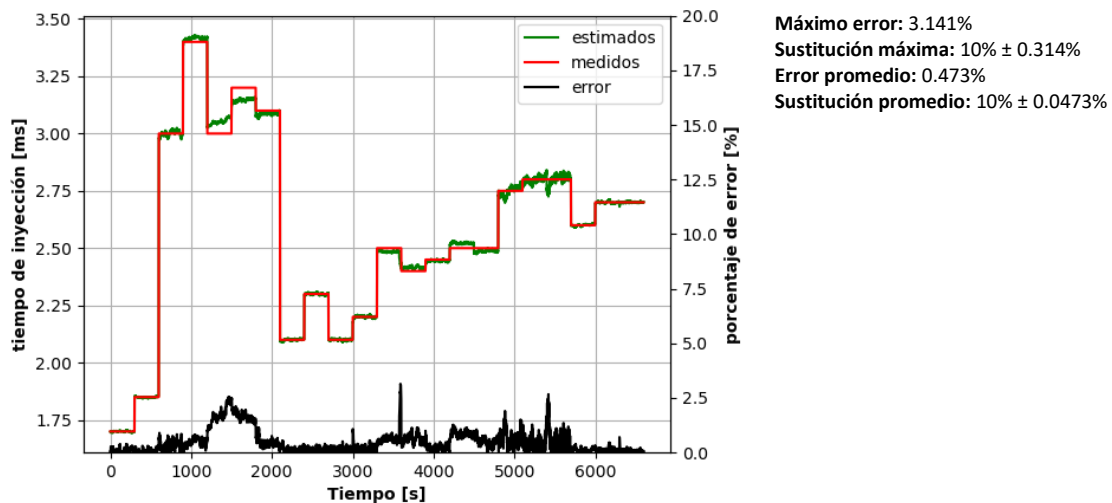


Figura 4.13 Tiempos de inyección estimados para E10 usando MLA

La Figura 4.14, muestra el resultado de los tiempos de inyección estimados para el combustible E20, donde el máximo error alcanzado fue de 18.156%, en este caso se estaría sustituyendo una cantidad de $(20\% \pm 3.62\%)$. En promedio el error fue del 3.477%, que implica sustituir una cantidad de $(20\% \pm 0.695\%)$ obteniéndose nuevamente para este porcentaje de sustitución, resultados adecuados con el modelo utilizado. Este combustible es el que mayor porcentaje de error de sustitución presenta en los resultados, esto se explica a partir de la forma cómo se calculan los tiempos de inyección estimados con el MLA (ver ecuación 2.9), ya que este modelo está basado en el promedio de los descriptores, dicho promedio es un estadístico de tendencia central que se ve afectado por los valores extremos de la muestra, por lo tanto, al presentarse valores atípicos en alguna de las variables descriptoras, dicho promedio se verá afectado. De esta forma, si durante la validación del algoritmo ingresa un dato cuyo valor está alejado de la media, al calcularse el tiempo de inyección estimado con el MLA, se obtiene un error significativo en los resultados. Esta misma justificación aplica para los combustibles E10 y E30 cuyos porcentajes de error máximo son inferiores al presentado para este combustible.

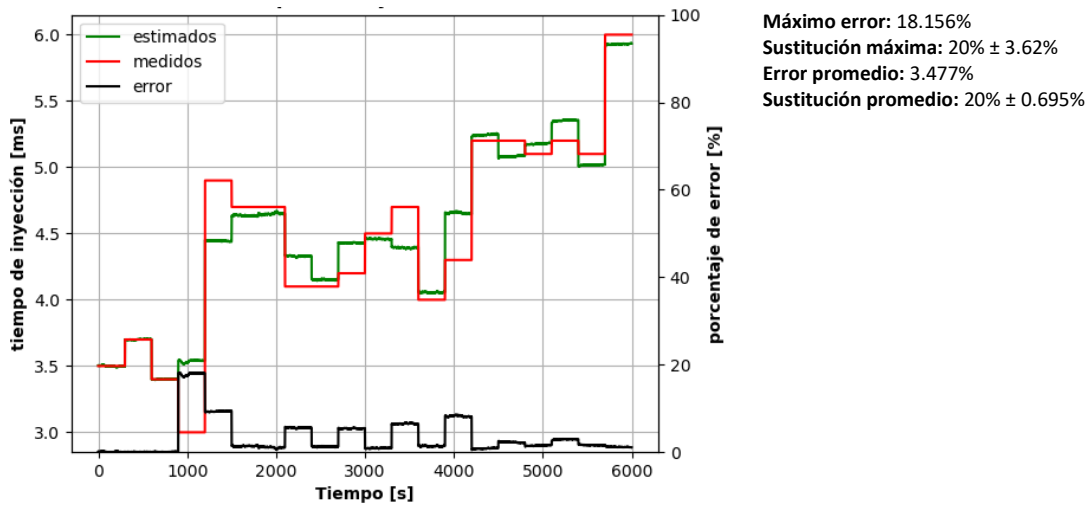


Figura 4.14 Tiempos de inyección estimados para E20 usando el MLA

Finalmente, para el combustible E30 (ver Figura 4.15), los resultados son muy similares en sus porcentajes de error respecto al E10, en este caso el máximo error fue de 3.521%, por lo que se estaría sustituyendo (30% ± 1.056%) y dado que el error promedio fue de 0.507%, se sustituiría (30% ± 0.152%).

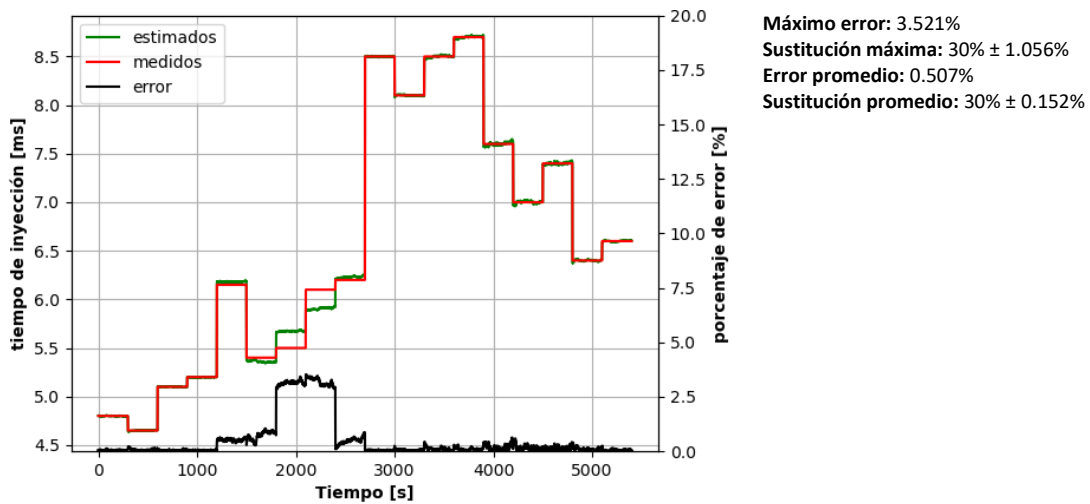


Figura 4.15 Tiempos de inyección estimados para E30 usando MLA

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA EN BANCO DE RODILLOS

En este capítulo se presentan los resultados de las emisiones contaminantes (NO_x y PN), la eficiencia energética, el consumo de combustible, entre otros parámetros de interés medidos en un vehículo que opera con un motor diésel con características similares al usado en las pruebas realizadas en banco de ensayos.

En este caso, se logró determinar la pertinencia o no de inyectar etanol de acuerdo con la cantidad de emisiones contaminantes que resultaran al usar cada uno de los combustibles medidos y de la eficiencia energética obtenida en cada caso. Lo anterior fue posible a partir de los resultados del algoritmo de clasificación difuso que permitía identificar los estados funcionales del vehículo operando bajo condiciones dinámicas y determinar así los tiempos de inyección adecuados a fin de minimizar las emisiones contaminantes y procurar la menor pérdida de eficiencia energética en comparación al diesel comercial.

La repetibilidad de las pruebas se verificó a partir de la reproducción del ciclo WLTC clase 1, ciclo que se siguió para asegurar igualdad de condiciones entre pruebas y poder hacer comparaciones entre las emisiones contaminantes y los consumos de combustible.

Finalmente, se explica el uso de un estimador de tiempos de inyección difuso (Takagi-Sugeno) para el caso de las pruebas en banco de rodillos, el cual pondera los tiempos de inyección estimados a partir de los grados de pertenencia del algoritmo de clasificación difuso y de los tiempos de inyección medidos en la etapa de entrenamiento.

5.1 Resultados de mediciones en vehículo en banco de rodillos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en banco de rodillos, para fumigación de etanol en el vehículo de prueba. Inicialmente se presentan los resultados correspondientes al seguimiento del ciclo de conducción, luego la comparación de consumos de combustible como variable que determinará la eficiencia energética del vehículo en las diferentes pruebas. Posteriormente se mostrará el efecto de usar sólo diesel comercial o diesel + etanol en las emisiones contaminantes, y finalmente se presentan los tiempos y porcentajes de inyección de etanol, como resultado del sistema de clasificación difuso.

5.1.1 Repetibilidad del Ciclo WLTC clase 1

La Figura 5.1, muestra el ciclo WLTC clase 1 de referencia y los resultados del seguimiento del ciclo de conducción en las diferentes pruebas, para las cuales se calculó el siguiente estadístico con el fin de dar cuenta de su repetibilidad. Se obtuvo la desviación estándar punto a punto ($Desv_est_i$) para cada una de las pruebas realizadas y luego se obtuvo su valor promedio ($\overline{Desv_est}$) como se indica en la ecuación 5.1.

$$\overline{Desv_est} = \frac{\sum_{i=1}^n Desv_est_i}{n} \quad (5.1)$$

Donde i es el dato de velocidad actual [km/h] para cada prueba y n el número de datos totales por cada prueba (1620). El resultado de aplicar la ecuación 5.1 fue de 0.9753 km/h, esto indica que la repetibilidad de las pruebas ofrece confianza estadística con un porcentaje máximo de efectividad en el seguimiento del ciclo del 98.49%. Además, al calcular el coeficiente de correlación de Pearson entre el ciclo de referencia y los demás, se halló un valor de aproximadamente 0.996, lo cual le imprime más peso a la afirmación de la correcta reproducibilidad del ciclo. Por lo tanto, a partir del alto porcentaje de efectividad, el alto coeficiente de correlación y el bajo valor del promedio de la desviación estándar del seguimiento del ciclo, es posible asegurar una repetibilidad confiable en las pruebas y, por lo tanto, hacer comparaciones entre emisiones contaminantes y consumos de combustible entre diferentes pruebas.

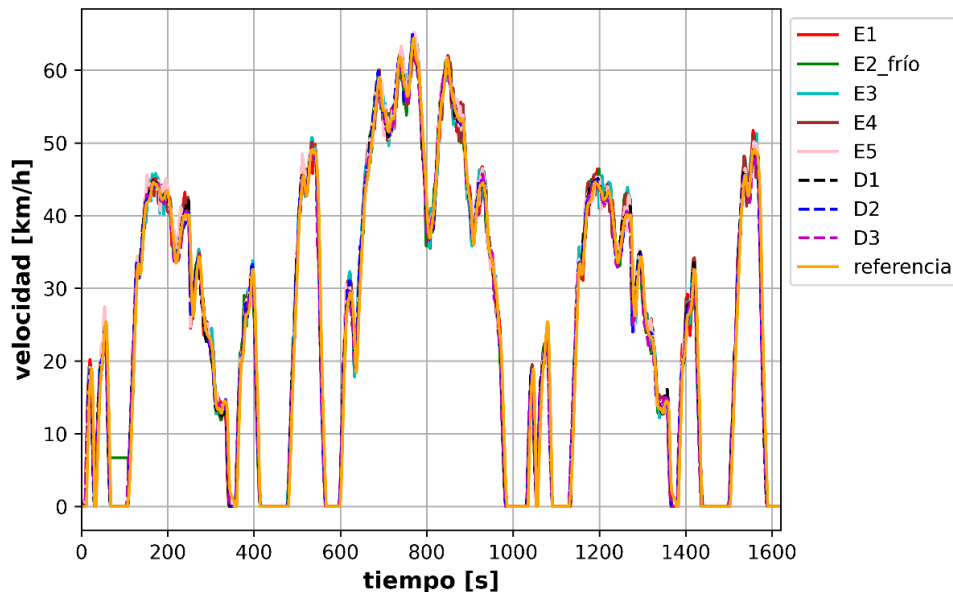


Figura 5.1 Seguimiento del ciclo de conducción WLTC clase 1

5.1.2 Consumo de combustible

En la Figura 5.2, se muestra el consumo acumulado de combustible para las pruebas en vehículo. Allí se observa un incremento al usar combustible dual (diesel + etanol) para todos los ensayos realizados. Lo anterior tiene sentido ya que, al medir a igualdad de potencia en la rueda del vehículo, y realizar una sustitución en energía de diesel por etanol, se requiere una mayor cantidad en volumen de alcohol (casi el doble) respecto al porcentaje de combustible diesel sustituido. Esto se debe al menor poder calorífico del etanol respecto al diesel, considerando que el de este último es de casi el doble (27 MJ/kg para el etanol y 43 MJ/kg para el diesel, aproximadamente). Por otro lado, es importante resaltar que la determinación del consumo de combustible se realizó a partir de las mediciones de consumo de aire y de la relación aire/combustible en el tubo de escape. La gráfica permite observar el consumo de combustible del vehículo para la prueba de arranque en frío (línea azul), el promedio de los consumos de diesel + etanol (línea roja) y el promedio de solo diesel (línea verde) para las diferentes pruebas y sus respectivos intervalos de confianza (bandas sombreadas), calculados a partir de la desviación estándar que se obtuvo en las mediciones de cada combustible, esto con el fin de validar la repetibilidad de las diferentes pruebas realizadas con diesel comercial y con diesel + etanol.

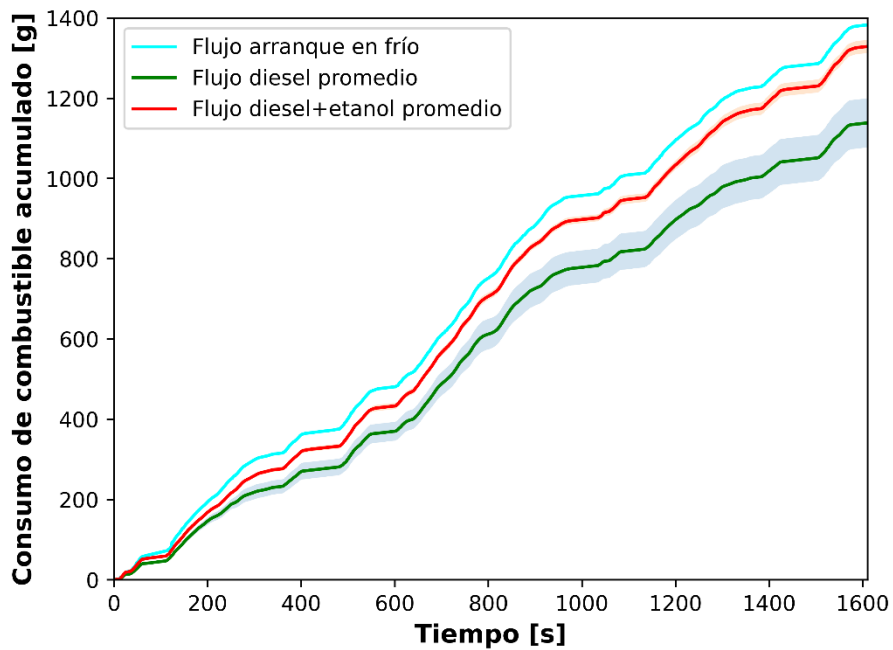


Figura 5.2 Consumo de combustible acumulado

5.1.3 Emisiones de NOx

La Figura 5.3, muestra las emisiones de NOx durante todo el ciclo de conducción, y las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6 muestran las mismas emisiones instantáneas de NOx, con sus respectivas emisiones acumuladas, para cada una de las fases del ciclo de conducción WLTC clase 1 (BAJO-MEDIO-BAJO), respectivamente. En general, se observa una reducción en las emisiones de NOx al realizar la fumigación controlada de etanol con el sistema electrónico de inyección desarrollado, respecto a cuando se inyecta sólo combustible diesel comercial. Esta reducción también es evidente al comparar las emisiones de diesel con la prueba de arranque en frío, siendo ésta última, la prueba que emite más NOx al hacer inyección de etanol. A partir de los resultados obtenidos para este contaminante, se puede concluir que la metodología implementada para controlar el sistema

electrónico de fumigación de etanol, basada en la ecuación 3.1, permite reducir las emisiones de NOx, uno de los dos principales contaminantes en los motores de encendido por compresión.

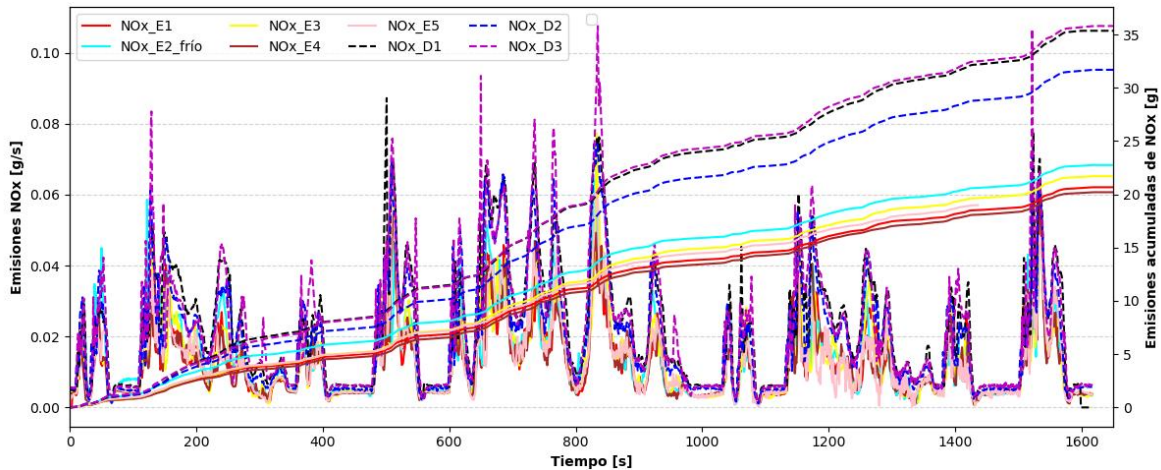


Figura 5.3 Emisiones de NOx

La primera fase baja del ciclo (Figura 5.4) permite observar cómo en la prueba de arranque en frío las emisiones de NOx son superiores a las demás pruebas donde se inyectó etanol, incluso llegando a superarse la magnitud de dicha emisión respecto a la del diesel, en algunos instantes de tiempo iniciales. Esto puede observarse también en la gráfica de emisiones acumuladas de NOx, donde al inicio de esta fase, el valor acumulado de NOx en la prueba de arranque en frío, es muy similar respecto a las mediciones de diesel, tendiendo a incrementarse por encima de las demás mediciones donde se sustituyó etanol, pero manteniéndose por debajo de los valores obtenidos al usar diesel comercial. La reducción de las emisiones contaminantes de NOx inyectando etanol respecto a las alcanzadas con diesel se explica a partir del alto calor latente de vaporización de este alcohol, el cual produce un efecto de enfriamiento en el cilindro haciendo que se produzca una menor cantidad de este contaminante, ya que uno de los precursores de la formación de los óxidos de nitrógeno es la alta temperatura de acuerdo a lo estudiado en [69]. Por otro lado, el incremento de las emisiones de NOx en la prueba de arranque en frío, respecto a las demás pruebas de inyección de etanol, puede justificarse porque el motor no ha alcanzado la temperatura de operación adecuada para lograr obtener su mejor desempeño, en este punto, la unidad de control electrónico (ECU) del sistema de inyección de combustible fósil, proporciona mayor cantidad de diesel comparado a cuando el motor está térmicamente estable. Adicionalmente, el catalizador instalado en el sistema de escape, no realiza su función correctamente a bajas temperaturas, lo que implica un incremento en las emisiones de este contaminante como se explica en [65].

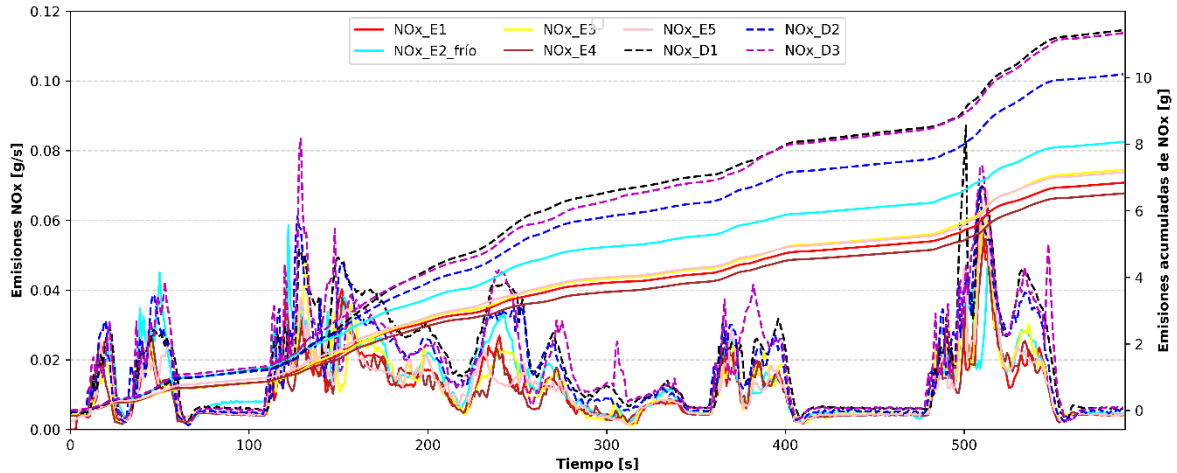


Figura 5.4 Emisiones de NOx para la primera fase baja del ciclo WLTC clase 1

Para la fase media del ciclo (Figura 5.5), las emisiones de NOx al inyectar etanol de forma autónoma, son más cercanas en magnitud entre sí, manteniéndose aún por debajo de las cantidades emitidas de este contaminante al inyectar sólo diesel. Durante la fase media del ciclo, el motor alcanza velocidades por encima de 60 km/h y, para la prueba de arranque en frío, se llega a una temperatura de operación cercana a la de las demás pruebas, este incremento en la temperatura hace que las emisiones de NOx se asemejen ya que este contaminante se produce al incrementarse la temperatura. Además, como se explicó anteriormente, para esta fase el sistema catalítico del escape ha alcanzado una temperatura de operación adecuada, lo que favorece la disminución de las emisiones de NOx.

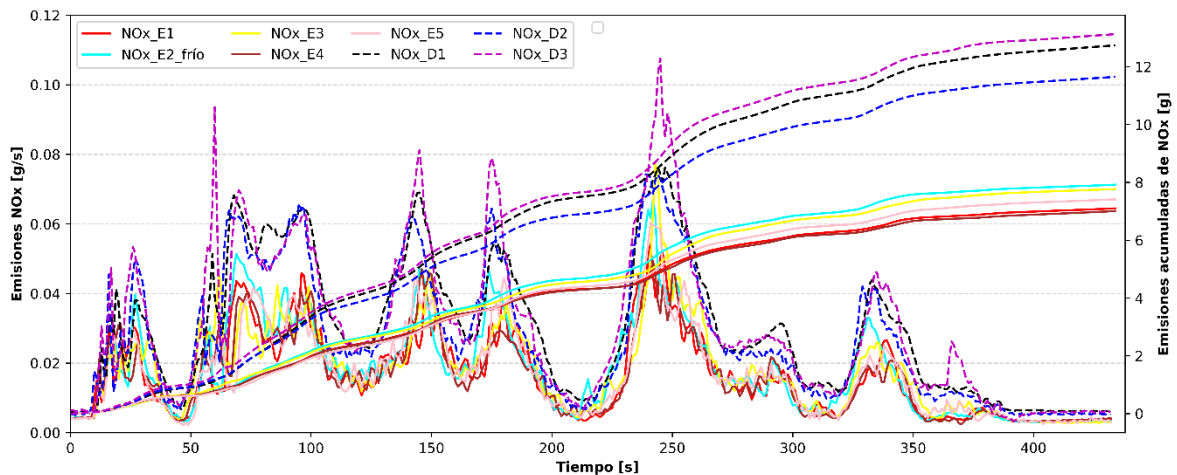


Figura 5.5 Emisiones de NOx para la fase media del ciclo WLTC clase 1

Finalmente, la Figura 5.6, muestra las emisiones de NOx para la parte final del ciclo de conducción, en esta fase, el valor de los óxidos de nitrógeno son muy cercanos para todas las pruebas donde se inyectó etanol, mientras que para las pruebas donde el vehículo opera sólo con diesel comercial, las emisiones de NOx siguen siendo mucho mayores. Se observa que la prueba de arranque en frío se solapa con los valores de las demás pruebas de inyección de etanol, ya que en este punto del ciclo de conducción el motor ha alcanzado una condición térmica estable.

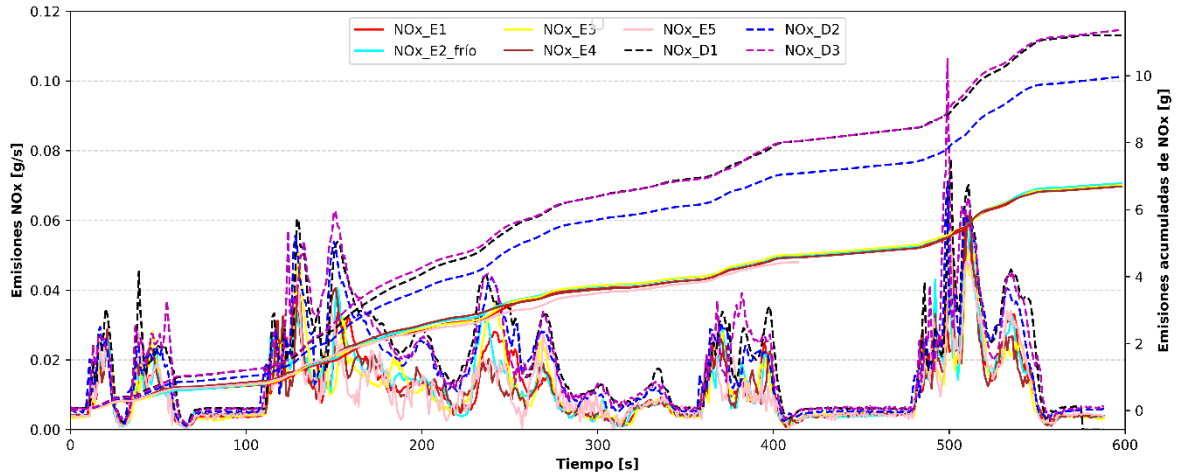


Figura 5.6 Emisiones de NOx para la segunda fase baja del ciclo WLTC clase 1

5.1.4 Emisiones de PN

Otro contaminante de interés es el número de partículas emitidas como producto del proceso de combustión. En las pruebas realizadas se observa el efecto de usar sólo combustible comercial (90% fósil) respecto al uso de combustible dual para sustitución parcial. Los resultados del número de partículas emitido en cada uno de los ensayos se pueden observar en la Figura 5.7. Allí se evidencia que la prueba de arranque en frío (E2) genera el mayor número de partículas respecto a las demás pruebas realizadas independiente del combustible utilizado. Además, para dos de las pruebas realizadas con combustible comercial (D2 y D3), se obtiene una menor emisión de partículas en número respecto a las pruebas donde se hace sustitución en energía de diesel por etanol. El análisis de estos resultados se realizará a partir de las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10, que muestran las emisiones de PN para cada fase del ciclo de conducción seguido.

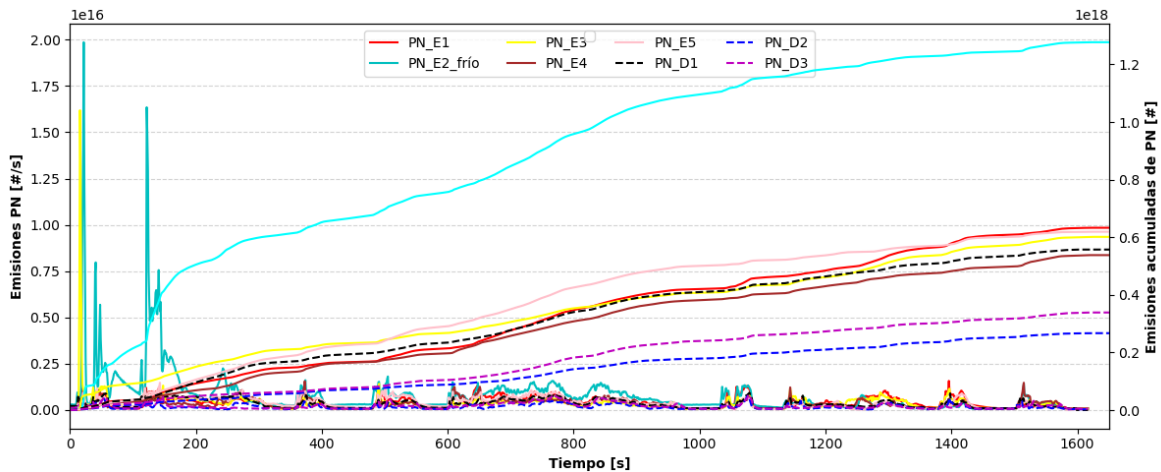


Figura 5.7 Emisiones de PN

La Figura 5.8, corresponde a la primera fase del ciclo de conducción, aquí se observa el efecto de la prueba de arranque en frío sobre el incremento en las emisiones de PN causadas por los primeros picos de aceleración positiva del ciclo de conducción, cuando el motor aún no ha alcanzado su temperatura de operación. Las demás pruebas de etanol presentan una magnitud superior de PN respecto a las mediciones de las pruebas D2 y D3 realizadas con diesel. Nótese que hay dos réplicas de etanol (E3 y E5) que registran emisiones de PN superiores respecto a la prueba realizada con

diesel (D1), y otras dos réplicas de etanol (E1 y E4) con emisiones de PN inferiores también respecto a D1.

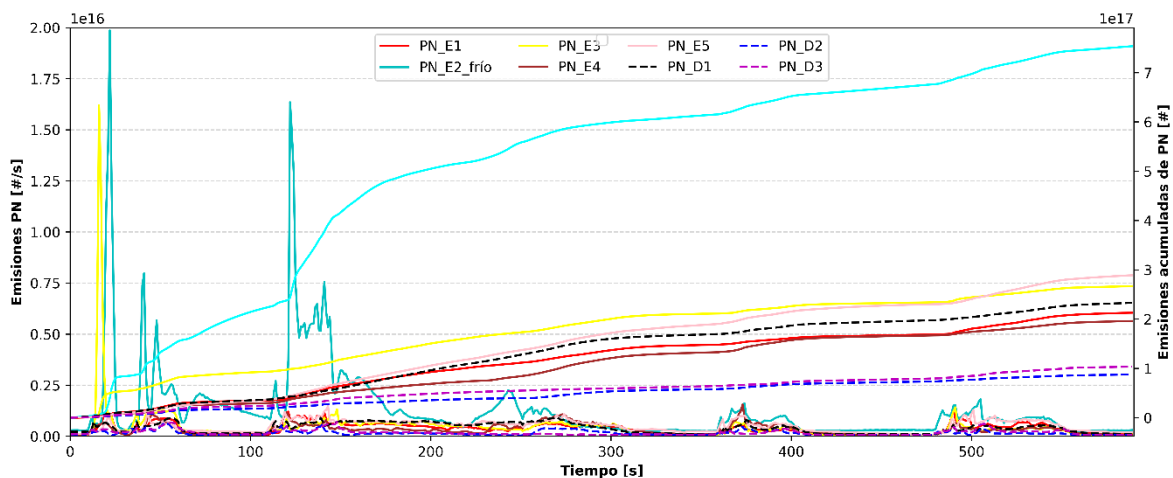


Figura 5.8 Emisiones de PN para la primera fase baja del ciclo WLTC clase 1

La Figura 5.9 muestra las emisiones de PN para la parte del ciclo que alcanza la mayor velocidad (MEDIO). La prueba de arranque en frío (E2) sigue conservando la mayor emisión de número de partículas. En esta fase el PN, para las demás pruebas, llega incluso a solaparse, haciendo que en el acumulado se presente una menor diferencia entre los combustibles medidos (por ejemplo, E3 y D3). Para esta fase del ciclo de conducción, hay tres pruebas de etanol (E1, E4 y E5) que registraron valores de PN superiores a los medidos en la prueba de diesel D1, con lo cual se va marcando una tendencia donde al inyectarse etanol, se favorece la emisión de número de partículas respecto a las emitidas con diésel.

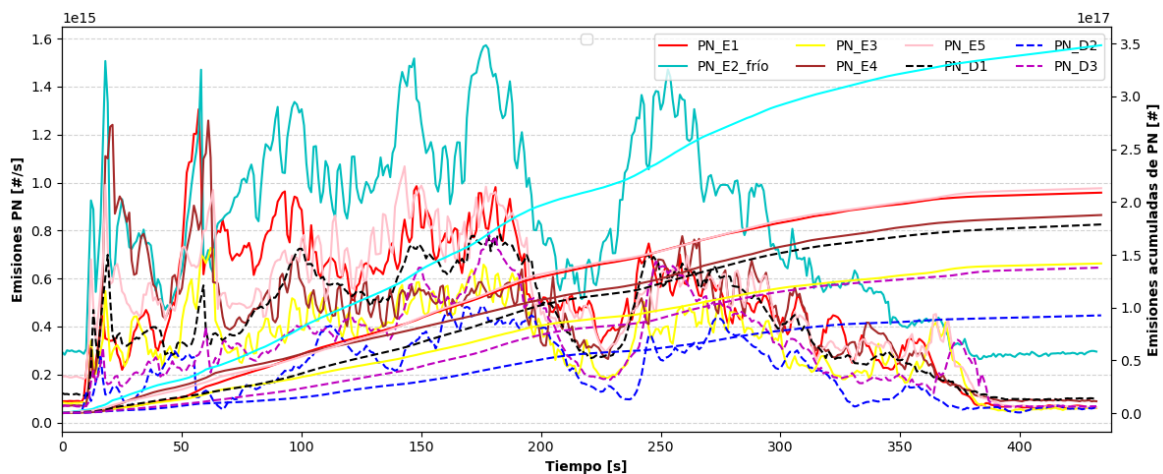


Figura 5.9 Emisiones de PN para la fase media del ciclo WLTC clase 1

Finalmente, en la Figura 5.10, se observa un incremento importante en las emisiones de las pruebas E1 y E3 respecto a la prueba de arranque en frío (E2) que hasta ahora siempre había presentado valores de PN superiores respecto a las demás pruebas, esto hace que en el acumulado de esta fase, E1 y E3 tengan la mayor cantidad de este contaminante y la de E2 se mezcle entre las demás pruebas. Para esta fase final del ciclo, el motor ha alcanzado una temperatura de operación adecuada, tal que, la prueba de arranque en frío se equipara a las demás pruebas de etanol y por lo

tanto el valor de sus emisiones no es tan diferente al del resto de las mediciones realizadas con el alcohol. Por otro lado, en términos generales, se sigue conservando la tendencia que se tenía desde la fase media del ciclo, donde las emisiones acumuladas de PN para el combustible diesel, son menores a las producidas con la inyección de etanol.

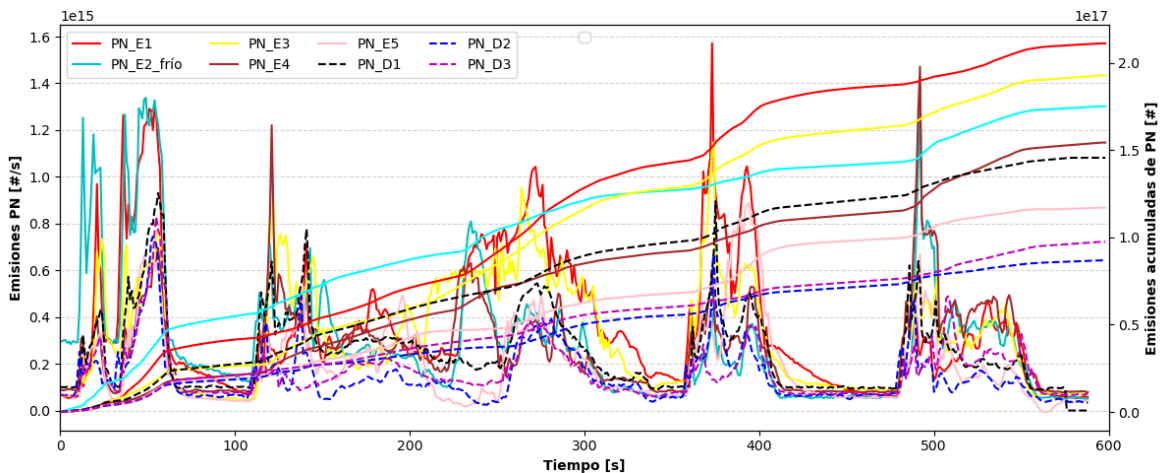


Figura 5.10 Emisiones de PN para la segunda fase baja del ciclo WLTC clase 1

Es importante aclarar que, al no medir material particulado en concentraciones de masa (PM), no es posible asegurar que se produzca una disminución o un incremento de este contaminante con la implementación de las estrategias de inyección de etanol en modo dual sobre el motor, ya que, las emisiones de PN medidas no tienen una relación directa con el PM expresado en masa de acuerdo con el estudio de la literatura [68]. Sin embargo, una hipótesis que resulta a partir de este trabajo es que, las emisiones másicas del material particulado podrían reducirse simultáneamente con las emisiones de NOx, como se indica en otras fuentes bibliográficas [15], [28] haciendo que el sistema electrónico desarrollado logre controlar la reducción de ambos contaminantes (NOx y PM).

5.1.5 Aplicación del índice de sustitución

Dado que para cada modo de operación se midieron 4 combustibles (DC, E10, E20 y E30), es importante que desde el punto de vista práctico y de la validación del dispositivo, se pueda establecer qué porcentaje de sustitución aplicar autónomamente para la activación de los inyectores de etanol. La implementación del índice de sustitución presentado a continuación permite, a partir del histórico de datos previo, establecer o no la conveniencia de realizar la inyección de etanol en el motor.

Debido a que el sistema de clasificación difuso LAMDA-FAR implementado sobre el microcomputador LattePanda detecta el modo de operación del motor, y conociendo a priori (datos de la etapa de entrenamiento) las emisiones contaminantes que se producen en cada uno de ellos, el sistema se basa en una regla matemática lógica que minimiza el efecto de la emisión contaminante y maximiza la eficiencia del motor, según se describe a continuación.

Para cada modo de operación i , se evalúa el valor de cada contaminante (PN y NOx) en cada porcentaje de sustitución (E10, E20 y E30). Del mismo modo se hace para la eficiencia del motor. Luego, el algoritmo decide de forma autónoma el porcentaje de sustitución apropiado, seleccionando el menor valor del índice calculado con la ecuación (3.1). Por ejemplo, al analizar el modo de operación 14 de las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3, el cual se amplía para una mejor visualización en la Figura 5.11, la menor emisión de PN y NOx la tiene E30, lo que hace a la sustitución E30 una buena

candidata para definir el porcentaje de sustitución de este modo. Adicionalmente, se observa en la parte baja de la Figura 5.11, que la eficiencia del motor es mayor con E10 que con los otros porcentajes, aunque está muy cercana a los valores de E20 y E30 por lo tanto, se decide que la mejor sustitución para el modo de operación 14 es E30.

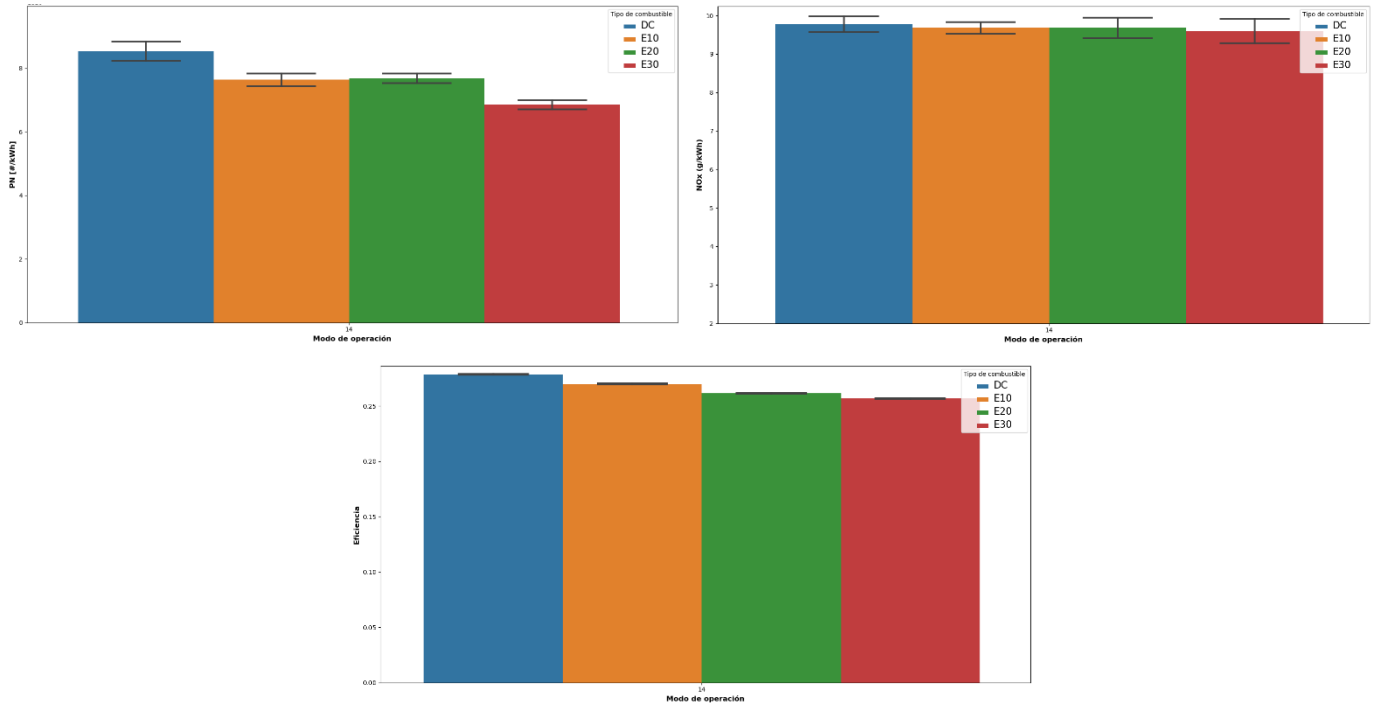


Figura 5.11 Emisiones y eficiencia para establecer el índice de emisión

En la Tabla 5.1, se presentan los índices de sustitución para cada modo de operación y para cada combustible de acuerdo con la evaluación de las ecuaciones 3.1 y 3.2. Se resaltan en la tabla los índices menores, de los cuales se desprende el valor del porcentaje final de sustitución. El sistema también tiene en cuenta que no se inyectará etanol en condiciones de ralentí, ni en modos de operación de baja carga ya que estos incrementan, entre otras, las emisiones de THC [6], [28], o donde se evidencie que las mejores condiciones de eficiencia del motor y las menores emisiones de contaminantes se logran sólo con combustible diesel (M7, M19 y M21).

Tabla 5.1 índices de sustitución para cada modo de operación y combustible

modo_op	DC	E10	E20	E30	%sustitucion
1	0,669673	0,589284	0,519862	0,4442	30%
2	0,521259	0,440137	0,506876	0,461433	10%
3	0,970653	0,902927	0,642677	NA	20%
4	0,366149	0,308783	0,305939	0,668232	20%
5	0,617928	0,611043	NA	0,413859	30%
6	0,769611	0,642701	0,540729	0,490477	30%
7	0,34807	0,413905	0,365027	0,370104	0%
8	1,026053	0,969982	NA	NA	10%
9	0,630392	0,536655	0,551318	NA	10%
10	0,779975	0,691483	0,519079	0,476741	30%
11	0,311404	0,272237	0,266644	0,291816	20%
12	0,247036	0,225902	0,297297	0,308939	10%
13	0,454581	0,478586	0,399968	NA	20%
14	0,473642	0,429879	0,40337	0,369008	30%
15	0,257458	0,277667	0,252623	0,193764	30%
16	0,378375	0,356169	0,324528	0,320081	30%
17	0,195647	0,179324	0,15632	0,07864	30%
18	0,293847	0,29252	0,291749	0,271046	30%
19	0,548673	0,556549	0,550773	0,597602	0%
20	0,276442	0,296714	0,302073	0,301874	0%
21	0,370155	0,431186	0,434941	0,437704	0%
22	0,338521	0,347312	0,378799	0,302581	30%

5.1.6 Tiempos de inyección de etanol en vehículo

Para este caso, debe tenerse en cuenta que, al seguir el ciclo de conducción, la velocidad del vehículo cambiará respecto al tiempo y con ello la posición del acelerador, la temperatura de los gases de escape y la velocidad del motor, logrando que, en algún momento, el sistema de clasificación reconozca el estado funcional del sistema y se puedan identificar los modos de operación que se midieron en estado estacionario y que sirvieron para entrenar el algoritmo. Con los modos de operación que no se reconocen (datos nuevos) el sistema estimará los tiempos de inyección y el porcentaje de sustitución más adecuado de acuerdo con la metodología planteada en el Capítulo 3, secciones 3.2 y 3.3.

En las Figuras 5.12 y 5.13, se observa los tiempos de apertura de los inyectores de etanol. En las gráficas se compara el tiempo inyectado (tiny) durante la operación del vehículo, con el tiempo de inyección esperado (tesp) de acuerdo con el histórico de datos con el que se entrenó el algoritmo de clasificación difusa. Se muestran los resultados para las pruebas E2 y E4. Las demás pruebas arrojan valores similares, esto es de esperarse ya que se recorre el mismo ciclo de conducción para todas las pruebas realizadas y, además, se logró un alto porcentaje de reproducibilidad del ciclo y un bajo porcentaje de error como se mostró en la sección 5.1.1.

De la Figura 5.12, se observa que, durante el seguimiento del ciclo, hubo modos de operación donde el sistema no realizó inyección de etanol, es decir, que el tiempo inyectado fue de 0 ms, esto debido a que fueron modos que coincidieron con la operación en ralentí del vehículo o donde era preferible

no hacer sustitución de etanol debido a que las emisiones se incrementaban y/o la eficiencia disminuía (M7, M19 y M21), esto de acuerdo al análisis previamente realizado a partir de la aplicación del índice de sustitución (Tabla 5.1).

Se observa también una franja donde los tiempos de inyección estuvieron en el rango de 2 ms a 3.5 ms (M2, M3, M8, M9 y M12), estos modos de operación coinciden con un grupo de los que más se repiten en el histograma de frecuencia de velocidad del motor presentado en el Anexo A.

Finalmente, la franja donde se midieron los tiempos que van entre 4.85 ms y 6.2 ms, está asociada a los modos de operación M1, M4, M13, M14, M16, M18 y M20, dichos modos coinciden con el grupo de los que más se repiten en el histograma de par presentado en el mismo Anexo A. Lo anterior indica que se está realizando un seguimiento correcto al ciclo y que además, el sistema de clasificación difuso desarrollado, está detectando los modos de operación de forma correcta y haciendo una inyección controlada adecuada a partir de los análisis previos sobre las emisiones contaminantes y la eficiencia energética, lo cual también se refleja en la coincidencia, de la gran mayoría de los casos, entre el valor del tiempo de inyección inyectado respecto al tiempo de inyección esperado. El anterior análisis es replicable para la otra figura de los tiempos de inyección de etanol (Figura 5.13).

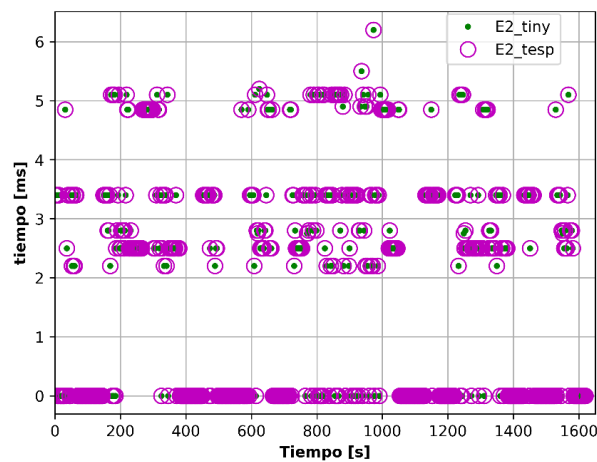


Figura 5.12 Tiempos de inyección de etanol para prueba E2

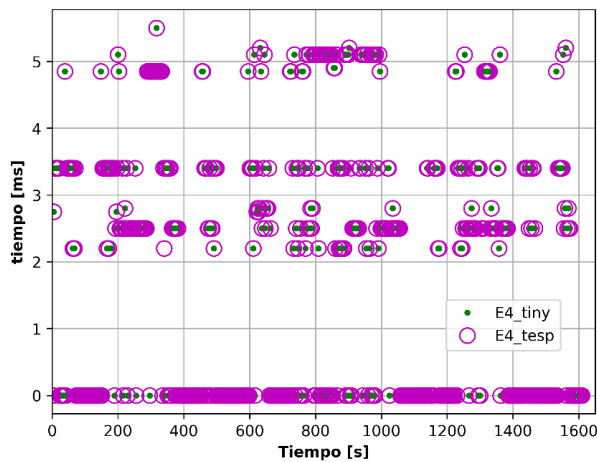


Figura 5.13 Tiempos de inyección de etanol para prueba E4

La Tabla 5.2, muestra el resumen de los tiempos de inyección medidos para cada modo de operación y para cada porcentaje de sustitución seleccionado de acuerdo con el índice de sustitución. Los tiempos de inyección estimados fueron obtenidos a partir de los tiempos relacionados en esta tabla, de la ponderación realizada con el modelo difuso Takagi-Sugeno y la matriz de grados de pertenencia del algoritmo LAMDA, siguiendo la metodología descrita en la sección 3.3.

Tabla 5.2 Tiempo de inyección medido para el porcentaje de sustitución con mejor desempeño

Modo_Op	t_iny_medido	%sustitucion
1	4,85	30
2	2,75	10
3	3,4	20
4	4,9	20
5	7,6	30
6	8,2	30
7	0	0
8	2,2	10
9	2,5	10
10	5,1	30
11	4,1	20
12	2,8	10
13	5,2	20
14	5,5	30
15	8,1	30
16	6,1	30
17	8,5	30
18	5,2	30
19	0	0
20	6,2	30
21	0	0
22	7,4	30

Finalmente, en todos los ensayos realizados en el vehículo en banco de rodillos, donde se validó el algoritmo de clasificación difuso, se identificaron adecuadamente los modos de operación del sistema, y se realizó el control autónomo para establecer los tiempos de inyección a partir del índice de sustitución propuesto y del modelo difuso Takagi-Sugeno. Respecto a las emisiones contaminantes, se encontró una disminución en las emisiones acumuladas de NOx de las pruebas con etanol respecto a las de sólo diesel, durante el seguimiento del ciclo de conducción WLTC clase 1 de aproximadamente 14.1 g, correspondiente a un porcentaje de 39.38%. También se encontró un incremento en las emisiones acumuladas de PN expresadas en número [#] de las pruebas de etanol respecto a las del diesel de aproximadamente de 0.294×10^{18} , que corresponde a un porcentaje de 46,51%. La mayor producción de este contaminante se presenta en la prueba de arranque en frío con un valor acumulado expresado en número [#] de 1.273×10^{18} , que corresponde a un incremento porcentual de 50.3% respecto a las demás pruebas realizadas con etanol.

Se presentó, además, un menor consumo acumulado de combustible en promedio cuando el vehículo operaba sólo con diesel comercial, respecto a la operación con combustible dual (diesel + etanol) en un valor aproximado de 190.37 g de combustible para el ciclo de interés correspondiente

a un porcentaje del 14.3%. Esto debido a que el volumen de etanol inyectado es mayor respecto al diesel, para efectos de producir igualdad de potencia en la rueda del vehículo, a razón de que el poder calorífico del etanol es menor que el del diesel en una proporción de casi el doble.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este capítulo final incluye las conclusiones de este trabajo y resalta el aporte realizado respecto a investigaciones previas. Además, se sugieren posibles trabajos futuros para dar continuidad al desarrollo de técnicas de inteligencia computacional aplicadas al sector de la automoción que incluyan sustitución controlada y autónoma de combustibles alternativos.

A partir de la metodología desarrollada sobre el motor en banco de ensayos expuesta en el Capítulo 2 y de los resultados mostrados en el Capítulo 4, se logró establecer que a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de diesel por etanol hidratado, también aumentan las emisiones de THC, este ocurre por factores como la combustión incompleta de los alcoholes, producto de la mezcla aire-alcohol que permanece en la entrada de la cámara de combustión, el largo retraso en el encendido y el bajo número de cetano del etanol respecto al diésel. Además, la disminución de la temperatura en el cilindro al usar etanol dificulta su evaporación y puede ocasionar también el incremento de este contaminante [6], [15].

Respecto a las emisiones de NO_x, se puede concluir que, a baja carga, las emisiones disminuyen en la medida que el porcentaje de sustitución aumenta respecto al diesel. Esto se debe al efecto de enfriamiento que produce el etanol por su alto calor latente de vaporización, y partiendo de que la formación de NO_x se produce principalmente a causa de las altas temperaturas en el cilindro [27]. Para modos de operación medidos a carga media, en condiciones estacionarias, no se observó una tendencia clara en el incremento o disminución de este contaminante respecto al combustible usado, ya que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre ellos. Finalmente, para los modos de operación medidos a carga alta, no se observó una tendencia clara de estas emisiones con el contenido de etanol. Además, debido a que las emisiones de NO_x se midieron después del catalizador, se evidencia que los modos de operación de baja carga (menor temperatura de operación del motor) tienen factores de emisión superiores a los modos de operación de alta carga.

Por otro lado, se concluye para las emisiones de PN que, independiente del grado de carga, tienden a disminuir al aumentar el porcentaje de sustitución de etanol respecto al diesel. Este resultado coincide con lo reportado en la literatura sobre reducción de material particulado (PM), ya que el oxígeno presente en el etanol mejora la combustión promoviendo la oxidación de más partículas de hollín. Además, ciertas propiedades del etanol, como su bajo contenido de carbono, bajo número de cetano y baja presencia de compuestos aromáticos, también aportan a la menor formación de partículas durante la combustión [26], [66]. Para los modos de operación medidos a baja velocidad, no se encuentra una diferencia estadísticamente significativa para la emisión de este contaminante al inyectarse etanol. Para modos de operación medidos a alta velocidad (superiores a 2100 rpm), se observa un incremento en las emisiones de PN cuando se incrementa el porcentaje de sustitución, independiente de su grado de carga, lo cual acentúa el efecto del bajo número de cetano del etanol, afectando la formación de la mezcla aire/combustible. Esto se explica considerando que a mayor velocidad del motor, la combustión se realiza más rápido, reduciendo el tiempo necesario para

quemar completamente el combustible, lo anterior, conlleva a una menor oxidación de las partículas produciendo un mayor número de partículas de hollín [67].

En cuanto a la eficiencia energética, se encontró que, esta disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución, respecto a cuando el motor opera usando sólo diesel comercial. Esto se debe a que, al medir a igualdad de potencia en el eje del motor, se requiere mayor cantidad en volumen de alcohol (aproximadamente el doble) respecto al porcentaje de combustible diesel sustituido. Esto se debe al menor poder calorífico del etanol respecto al diesel. Adicionalmente, la cantidad inyectada de etanol desplaza parte del aire que se admitiría sin el uso del alcohol, disminuyendo la disponibilidad de oxígeno para la combustión (aún con la presencia del oxígeno extra que proporciona este combustible) y una pérdida de energía en el proceso. Por lo anterior, desde el punto de vista de la cantidad del combustible usado respecto a la potencia generada, se obtiene una mejor eficiencia con el combustible fósil que con la inyección de etanol, aunque no se produzca entre ellos una diferencia que impacte significativamente el rendimiento del motor [67].

Se implementó un modelo lineal afín (MLA) para estimar los tiempos de inyección de etanol en el motor, los resultados mostraron errores bajos en comparación con los tiempos de inyección medidos, demostrando ser una herramienta confiable para llevar a cabo sustituciones de energía por etanol hidratado en motores diesel ubicados en banco de ensayos bajo condiciones estacionarias. En este caso, se observa una mejora considerable en la estimación de los tiempos de inyección de etanol en comparación con trabajos anteriores, ya que se obtienen porcentajes de error promedio inferiores al 3.5%.

Del Capítulo 3, donde se muestra el desarrollo de la metodología utilizada en el vehículo ubicado en banco de rodillos y los resultados de este sistema presentados en el Capítulo 5, se puede concluir que al realizar inyección de etanol hay una disminución, respecto al diesel, de 39.38% aproximadamente en las emisiones acumuladas de NOx durante el ciclo de conducción y un incremento en el número de partículas de hollín respecto a las emisiones medidas para el combustible diesel en un porcentaje de aproximadamente 46,51%. A partir de los resultados obtenidos en las emisiones de NOx, se puede concluir que la metodología implementada para controlar el sistema electrónico de fumigación de etanol, permite reducir los óxidos de nitrógeno, siendo este uno de los dos principales contaminantes en los motores de encendido por compresión.

Para el caso del PN, la mayor producción de este se presentó en la prueba de arranque en frío, independiente del combustible utilizado. Además, para dos de las tres pruebas realizadas con combustible comercial (D2 y D3), se obtuvo una menor emisión de partículas de hollín en número respecto a las pruebas donde se hace sustitución en energía de diesel por etanol.

Debido a que en este trabajo no se midió material particulado en concentraciones de masa (PM), no es posible asegurar que se produzca una disminución o un incremento de este contaminante con la inyección de etanol, ya que las emisiones de PN no tienen una relación directa con el PM, de acuerdo con el estudio de la literatura [68].

En cuanto a la eficiencia energética, se presentó un menor consumo acumulado de combustible cuando el vehículo operaba sólo con diésel comercial respecto a la operación con combustible dual (diésel + etanol) en un porcentaje de aproximadamente 14.3%. Esto debido a que la cantidad de combustible diésel sustituido es menor a la cantidad de etanol inyectado (en volumen) para producir la misma potencia en la rueda del vehículo. Esta situación se asemeja a las presentadas en las pruebas del motor en condiciones estacionarias.

Para el caso de las pruebas dinámicas en banco de rodillos, el clasificador difuso implementado fue capaz de identificar el modo de operación del motor, y de acuerdo con esta clasificación de estados funcionales, se estimó adecuadamente el tiempo de inyección de etanol según lo esperado aplicando la teoría del modelo difuso Takagi-Sugeno. Esto permitió realizar una sustitución controlada y autónoma de etanol en estado transitorio utilizando las emisiones contaminantes y la eficiencia como criterio de decisión a partir del índice de sustitución propuesto, para verificar la pertinencia o no de inyectar este combustible alternativo, con el fin de emitir la menor cantidad de contaminantes. Lo anterior no se había reportado en trabajos previos.

6.1 Aportes de la tesis por objetivo

En la Tabla 6.1 se destacan las contribuciones de esta tesis de acuerdo con el alcance de cada uno de los objetivos específicos propuestos.

6.2 Trabajos futuros

Como trabajo futuro se sugiere incluir la información de las emisiones contaminantes no reguladas en la decisión de inyectar o no etanol hidratado para realizar fumigación dual en un motor diésel, considerando su alto impacto a nivel ambiental y de salud.

Adecuar sistemas de inyección electrónicos similares usando inteligencia computacional para probar otros combustibles con el fin de aportar a la búsqueda de energías renovables que ayuden a reducir la huella de carbono.

Realizar predicción, usando inteligencia computacional, para determinar el porcentaje de sustitución que mejor resultado proporcione en cuanto a mantener la eficiencia energética y que asegure la menor cantidad de emisiones contaminantes en la combustión, al realizar sustitución parcial de combustible fósil por combustibles provenientes de fuentes renovables.

Se sugiere medir material particulado en concentraciones másicas, además de obtener distribuciones de tamaño de partículas para determinar si, al realizar inyección de etanol, se produce una disminución o incremento del PM, lo anterior para complementar las mediciones de PN realizadas en este trabajo. Así mismo, se debe realizar una caracterización química y biológica de las partículas emitidas, para determinar los efectos potenciales sobre la salud de éstas, cuando se inyecta etanol como combustible sustituto.

Tabla 6.1 Contribuciones de la investigación

Objetivo específico	Contribuciones
<p>1. Desarrollar un algoritmo de clasificación difusa para estimar los tiempos de inyección de etanol en un motor diesel de automoción en operación estacionaria, buscando reducir las emisiones de NOx y de PM, así como tener buen desempeño energético.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Inclusión de parámetros efectivos y emisiones contaminantes (NOx y PN) en la medición de 22 modos de operación estacionarios, para 4 combustibles sobre un motor en banco de pruebas. Hasta ahora en el grupo de investigación no se había realizado una campaña de medición experimental tan amplia sobre un motor Euro 4. - Inyección autónoma de etanol a partir del algoritmo clasificador y del modelo lineal afín que permitió estimar los tiempos de inyección de etanol en el motor diesel de automoción. - Desarrollo de un software de clasificación difuso que controla en lazo cerrado la inyección de etanol en el múltiple de admisión de un motor diesel de automoción. <p>Como producto de este desarrollo se tiene un registro de software y el registro de un prototipo industrial.</p>
<p>2. Desarrollar una metodología para mapear el vehículo de pruebas, con el fin de estimar los tiempos de inyección de etanol a partir de parámetros de operación y medición de PM.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se realizaron pruebas dinámicas en un vehículo en banco de rodillos, siguiendo un ciclo WLTC clase 1. Esto permitió validar el modelo de clasificación difuso, y verificar que la tecnología propuesta funciona sobre un vehículo bajo condiciones de conducción real. - En la literatura no se reportan pruebas dinámicas en banco de rodillos, o en ruta sobre vehículos diesel inyectando etanol de forma controlada a partir de algoritmos de inteligencia computacional.
<p>3. Desarrollar un algoritmo de inteligencia computacional para estimar los tiempos de inyección de alcohol en un vehículo en ruta, teniendo en cuenta las emisiones de PM y el desempeño energético.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Inyección autónoma de etanol a partir del algoritmo clasificador difuso y de los tiempos de inyección de etanol calculados a partir del modelo difuso Takagi-Sugeno, buscando reducir emisiones de NOx y PN y tratando de no afectar de forma considerable la eficiencia energética. - Se propuso un índice matemático que, a partir del modo de operación del motor, de la medición de las emisiones de NOx y de PN, y de la eficiencia del motor, determina el porcentaje adecuado de sustitución en energía de diesel por etanol hidratado, con el fin de minimizar las emisiones contaminantes y mantener el desempeño mecánico del motor. <p>El prototipo desarrollado hace parte de un producto tecnológico integral que se encuentra en proceso de solicitud de patente de invención.</p>

NOTA: Para no afectar la novedad de la solicitud de la patente de invención, en este trabajo se reservó el derecho a realizar publicaciones científicas en revistas indexadas. Actualmente se dispone de un artículo redactado y listo para someter en cuanto se defina el trámite de la patente.

ANEXO A

SELECCIÓN DE LOS MODOS DE OPERACIÓN POR DINÁMICA LONGITUDINAL PARA PRUEBAS EN MOTOR

Este anexo presenta la metodología usada para seleccionar los modos de operación en las diferentes pruebas realizadas sobre el motor en banco de ensayos. Esta metodología fue desarrollada previamente por el grupo de Investigación GIMEL en el marco de la realización de la tesis doctoral [10] para un motor diesel de inyección mecánica pre-euro Isuzu 4JA1 y un motor Nissan YD25 euro 3, siguiendo un ciclo de conducción FTP-75. Los modos de operación fueron determinados siguiendo un modelo matemático de dinámica longitudinal desarrollado por [57] para el vehículo *Fotón Tunland* que lleva el motor *Cummins ISF2.8I*. La Tabla A.1 muestra las principales características técnicas del vehículo y su motor.

Tabla A.1 Características técnicas del motor y del vehículo de pruebas

Datos de dinámica Longitudinal	
Motor Cummins ISF2.8 TLD (Light Duty)	
Potencia	107-160 hp (80-120kW)
Torque	206-265 lb-ft (280-360 Nm)
Peso	214 Kg
Emisiones	Euro 4
Ratings	120 kW@3600/360 Nm@1800 80 kW@2600/280 Nm@1200
Vehículo: Fotón Tunland	
Peso bruto	2975 kg
Relación diferencial	3,91:1
Relación de transmisión GETRAC JC538	1a: 4,016
	2a: 2,318
	3a: 1,401
	4a: 1,00
	5a: 0,778
	Reversa: 3,549
Llantas (Diámetro)	265/ 65 R17 (776 mm)
Distancia entre ejes	3105 mm
Dimensiones generales	(LxAxH) (5310x1880x1860) mm
Coefficiente Aerodinámico	0,42
Aceleración	12,5 seg de 0 a 100 Km/h
Coefficientes de fricción	$f_0=217, f_z=0, f_2=0.0576$

Los modos de operación usados fueron seleccionados siguiendo las secuencias de aceleración del vehículo en el ciclo WLTC. De acuerdo con [70], [71] sobre estas secuencias de aceleración se genera el 70% de las emisiones globales del vehículo, además, los datos fueron filtrados evitando tener en cuenta en el análisis valores que sobrepasaran 80 km/h, esto debido a que este valor representa la

máxima velocidad permitida en Colombia para condiciones de conducción urbanas.

La Figura A.1, muestra los resultados del seguimiento del ciclo de conducción bajo condiciones de simulación usando un modelo de automoción.

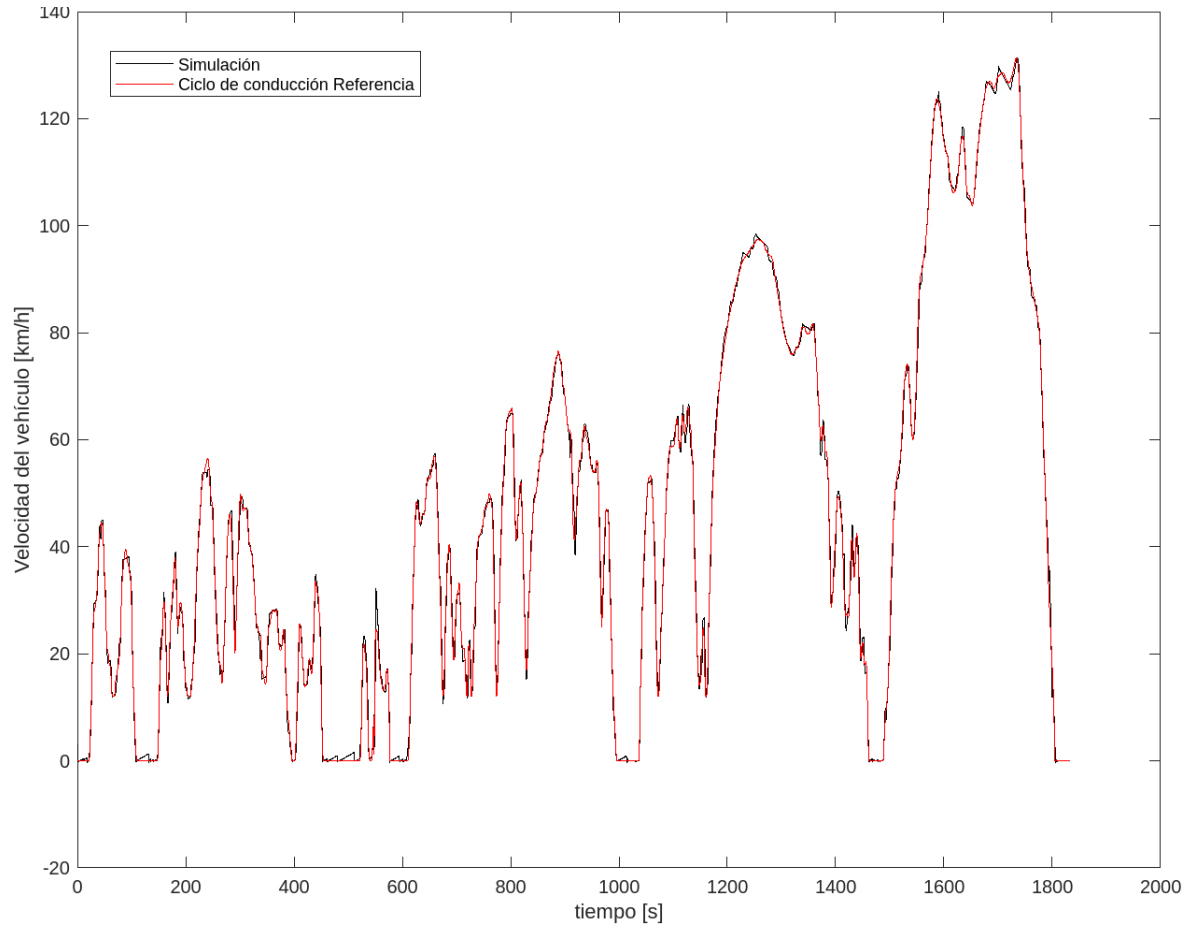


Figura A.1 Ciclo de conducción y el resultado obtenido para este ciclo usando un modelo de simulación de automoción

En la Figura A.2, se muestra la detección de las secuencias de aceleración positivas con valores de velocidad inferiores a 80 km/h sobre el ciclo de conducción.

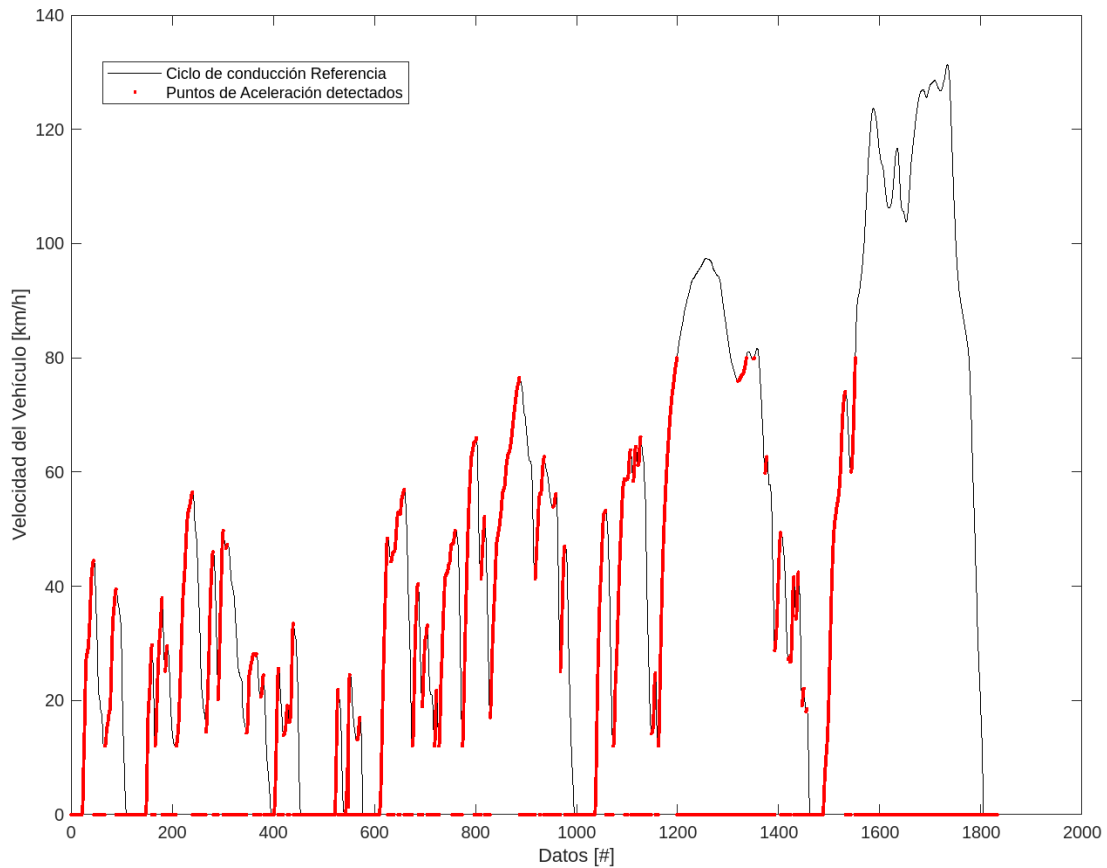


Figura A.2 Ciclo WLTC con secuencias de aceleración positivas detectadas para velocidades menores a 80 km/h

Las Figuras A.3, A.4 y A.5 muestran la posición de la caja de cambios, la velocidad del motor [rpm] y el grado de carga (par) [Nm] respectivamente, bajo las condiciones de filtrado previamente mencionadas (secuencias de aceleración positivas con valores de velocidad menores a 80 km/h). Para la obtención de esos parámetros, fue necesario tener en cuenta las ecuaciones A.1 hasta A.9 tomadas del capítulo 5 de la tesis doctoral de la referencia [57].

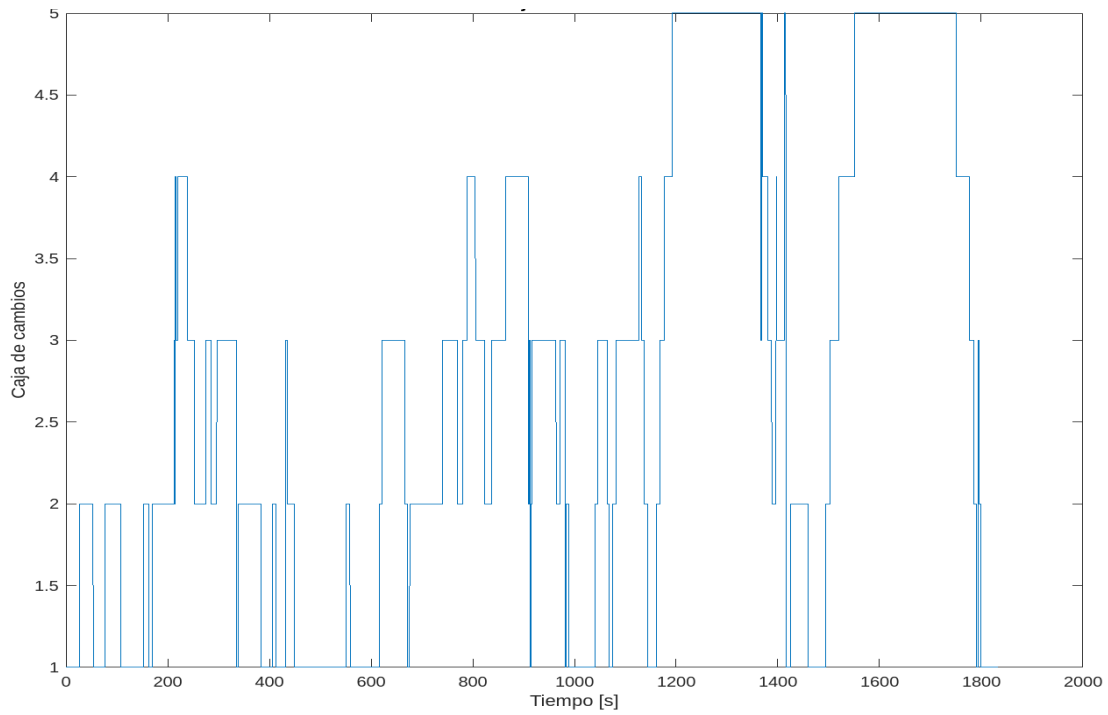


Figura A.3 Caja de cambios

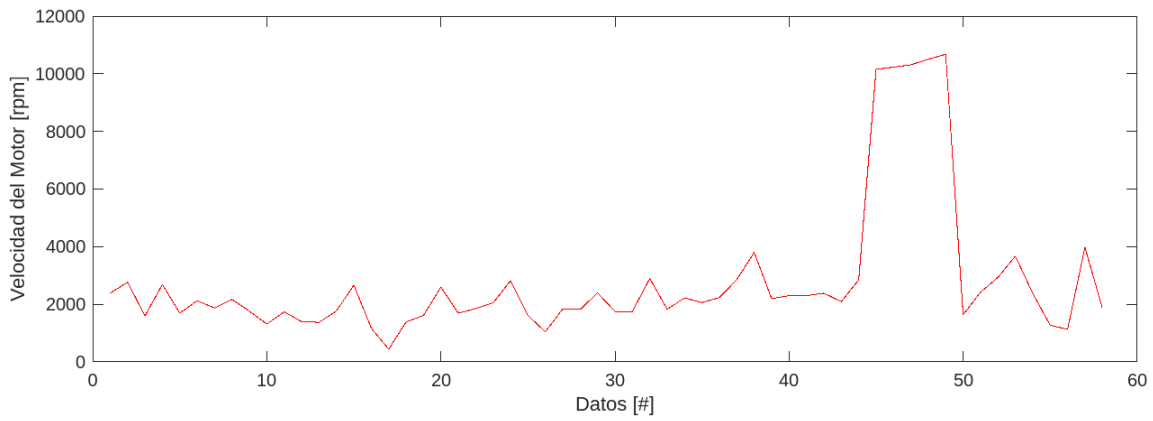


Figura A.4 Velocidad del motor en secuencias de aceleración positivas detectadas

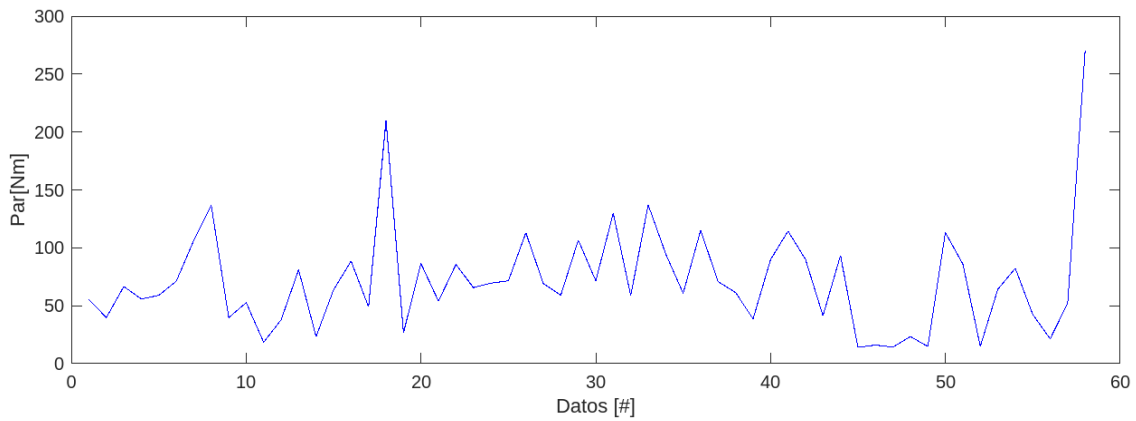


Figura A.5 Grado de carga en secuencias de aceleración positivas detectadas

$$F_R = \frac{M_e \gamma_i}{r_d} \eta_t \quad (\text{A.1})$$

Donde F_R es la fuerza de la resistencia total, M_e es la carga del motor [Nm], γ_i es la relación de la transmisión en la caja para el cambio i , η_t es la eficiencia en la transmisión and r_d es el radio dinámico de las ruedas. El parámetro γ_i fue calculado como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\gamma_i = \gamma_{gb} \gamma_{dif} \quad (\text{A.2})$$

Donde γ_{gb} es la relación de la transmisión y γ_{dif} es la relación del diferencial.

Si la fuerza sobre las ruedas del vehículo es más grande que las fuerzas que se oponen a su desplazamiento, la aceleración del vehículo ocurre:

$$\frac{M_e \gamma_i}{r_d} \eta_t = F_{fric} + F_{AE} + F_g + m \cdot a + J_{TOTw} \frac{\alpha_w}{r_d} \quad (\text{A.3})$$

Donde F_{fric} es la fuerza de fricción de rodadura sobre los neumáticos, F_{AE} es la fuerza aerodinámica F_g es el componente vertical de la fuerza de la gravedad si el vehículo avanza sobre una vía con pendiente, a es la aceleración lineal del vehículo, J_{TOTw} es el momento de inercia total de todas las partes que rotan reducidas a las ruedas y α_w es la aceleración angular de las ruedas. Por simplicidad, todos los términos lineales y angulares de las inercias son transformados en un término equivalente que depende de la aceleración lineal del vehículo, llamado Fuerza Equivalente, F_{eq} el cual se presenta en la ecuación A.4.

$$m \cdot a + J_{TOTw} \frac{\alpha_w}{r_d} = m_{eq} \cdot a = F_{eq} \quad (\text{A.4})$$

La masa equivalente (m_{eq}) es calculada como el producto de la masa del vehículo por un coeficiente de inercia rotacional (k_m) presentado en la ecuación A.5, el cual es un parámetro estimado por la relación entre γ_i and r_d llamado α (ecuación A.6), en función de la masa del vehículo/desplazamiento del motor [kg/l] (ver Figura A.6).

$$m_{eq} = m \cdot k_m \quad (\text{A.5})$$

$$\alpha = \frac{\gamma_i}{r_d} \quad (\text{A.6})$$

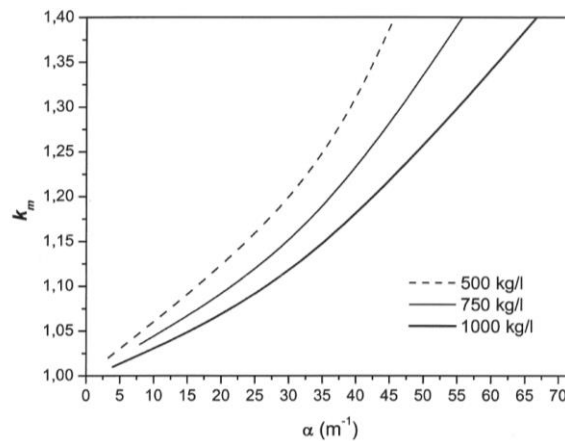


Figura A.6 Valores del coeficiente de inercia rotacional K_m respecto a α . Imagen tomada de [57]

Resolviendo la ecuación A.3 para la variable M_e :

$$M_e = (F_{fric} + F_{AE} + F_g + m \cdot k_m \cdot a) \frac{r_d}{\gamma_i \eta_t} \quad (A.7)$$

Despreciando la fuerza gravitacional F_g (considerando un terreno sin pendiente) y resolviendo la expresión resultante en función de los coeficientes de fricción f_0, f_1 y f_2 presentados en la Tabla A.1, puede ser encontrada la carga y la velocidad del motor (ecuaciones A.8 y A.9 respectivamente).

$$M_e = ((f_0 + f_1 v_m + f_2 v_m^2) + m \cdot k_m \cdot a) \frac{r_d}{\gamma_i \eta_t} \quad (A.8)$$

$$n = \frac{(\gamma_i \cdot \frac{v_m}{3.6}) \cdot 60}{2\pi \cdot r_d} \quad (A.9)$$

Donde n representa la velocidad del motor [rpm] y v_m es la velocidad media del vehículo [km/h] determinada para cada secuencia de aceleración detectada.

Para la selección final de los modos de operación, fueron considerados los puntos que se repiten más veces dentro de los límites de velocidad establecidos y pertenecientes a las secuencias de aceleración detectadas del vehículo. La Figura A.7 y la Figura A.8 muestran los histogramas de frecuencia para la velocidad y el grado de carga del motor.

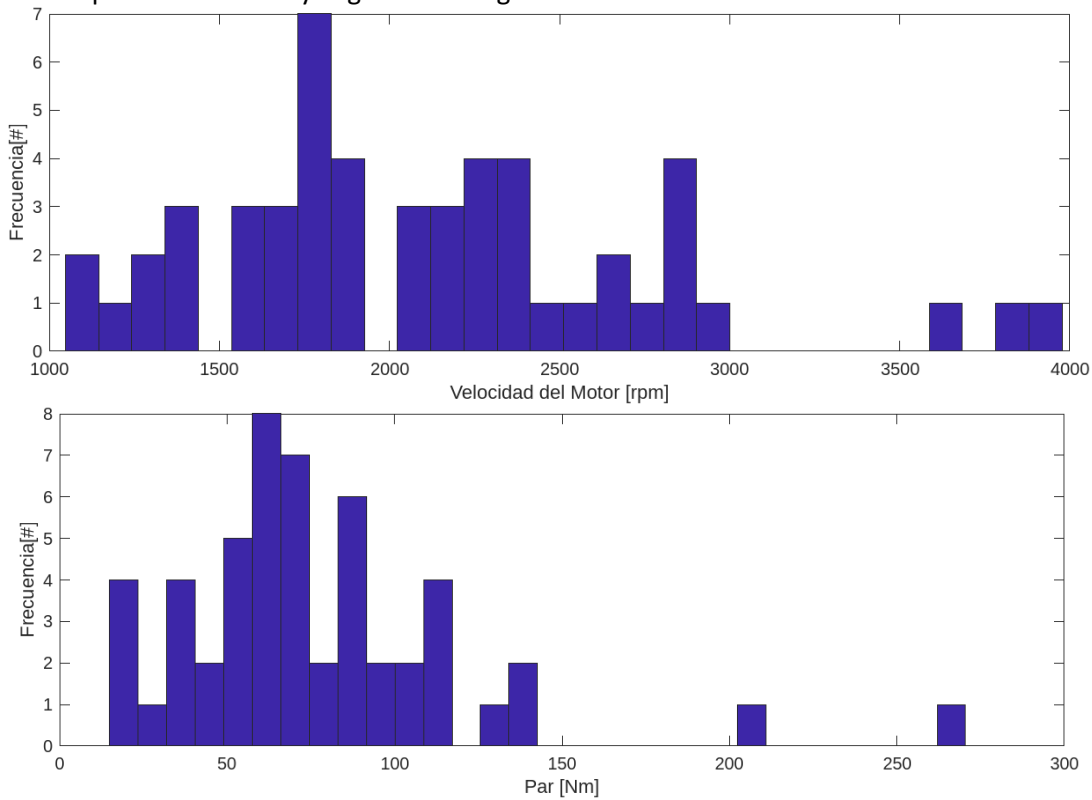


Figura A.7 Histogramas de frecuencia para la velocidad y el grado de carga del motor

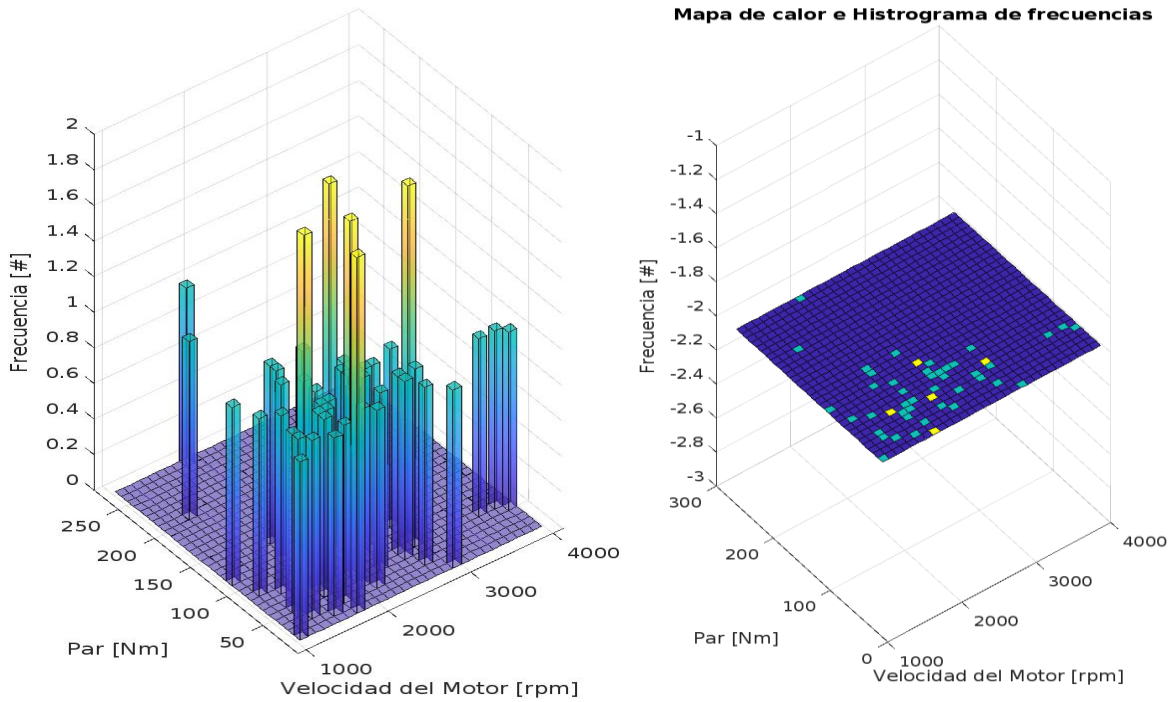


Figura A.8 Histogramas de frecuencia 3D para la velocidad y el grado de carga del motor y la proyección sobre su mapa de intensidad o calor

Finalmente, de los histogramas de frecuencia, fueron seleccionados los modos de operación más representativos del ciclo de conducción. La Figura A.9 muestra los modos de operación obtenidos después de haber seguido la anterior metodología.

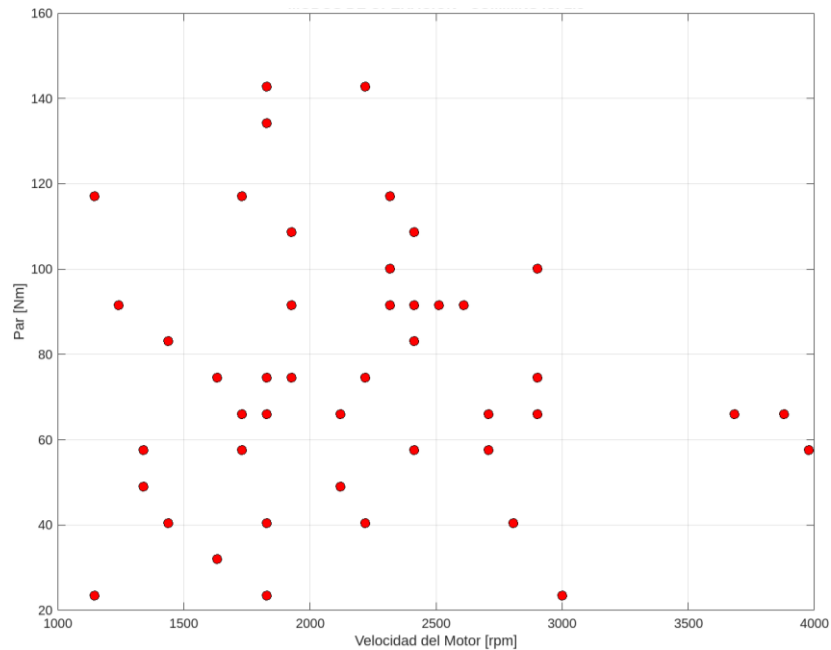


Figura A.9 Modos de operación del motor

La Figura A.10 muestra los modos de operación en el plano 3D conformado por las variables Velocidad vehículo-Velocidad motor-Par.

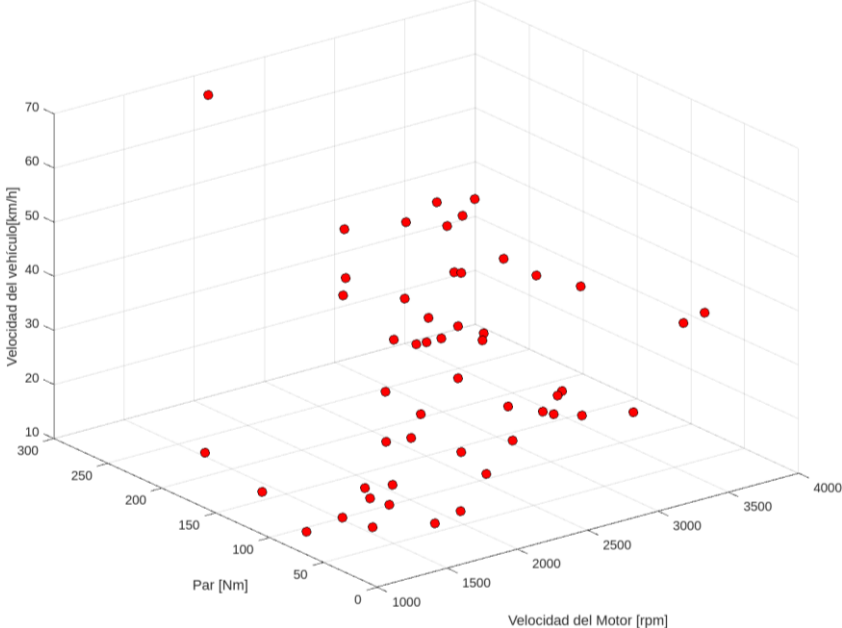


Figura A.10 Modos de operación en el plano 3D: Velocidad vehículo-Velocidad motor-Par

ANEXO B

SISTEMA ELECTRÓNICO DE INYECCIÓN DE ETANOL

Este anexo presenta la implementación en *hardware* del sistema de control electrónico multipunto para la fumigación de alcohol hidratado en el múltiple de admisión de motores diesel, mediante algoritmos de inteligencia computacional (clasificación difusa). El sistema hace parte importante de un kit de inyección de alcohol que sustituye parcialmente el consumo de diesel por un combustible alternativo (etanol hidratado). El sistema electrónico se probó tanto en un motor de automoción en banco de ensayos, como en un vehículo comercial siguiendo un ciclo de conducción.

Cada señal que interviene en el proceso de adquisición se acondiciona electrónicamente, se caracteriza y se lleva a los puertos de entrada (analógicos o digitales según sea el caso) del sistema microcontrolado embebido, para su posterior tratamiento, con el fin de determinar el modo de operación del motor.

El acondicionamiento de cada señal se ilustrará con mayor detalle en este anexo, resaltando la implementación de sistemas microcontrolados Arduino® usados para la adquisición de las variables descriptoras del sistema, así como para el control de los inyectores de etanol. Se usaron además circuitos seguidores de voltaje (*buffer*), convertidores de frecuencia a voltaje, comparadores y etapas de conmutación de potencia, entre otros circuitos.

Finalmente, todos los subsistemas electrónicos convergen en un solo módulo electrónico portátil que es la unidad de control electrónica del etanol (ECU por sus siglas en inglés), programado para realizar la sustitución parcial (hasta un 30% de combustible en base energética) de diesel por etanol hidratado (5% en volumen).

B.1 Caracterización de los sensores usados para medir las variables de entrada al sistema de clasificación difuso

En el esquema general de la Figura B.1 se observan las señales de entrada y de salida usadas en el desarrollo del sistema electrónico de inyección de etanol hidratado.

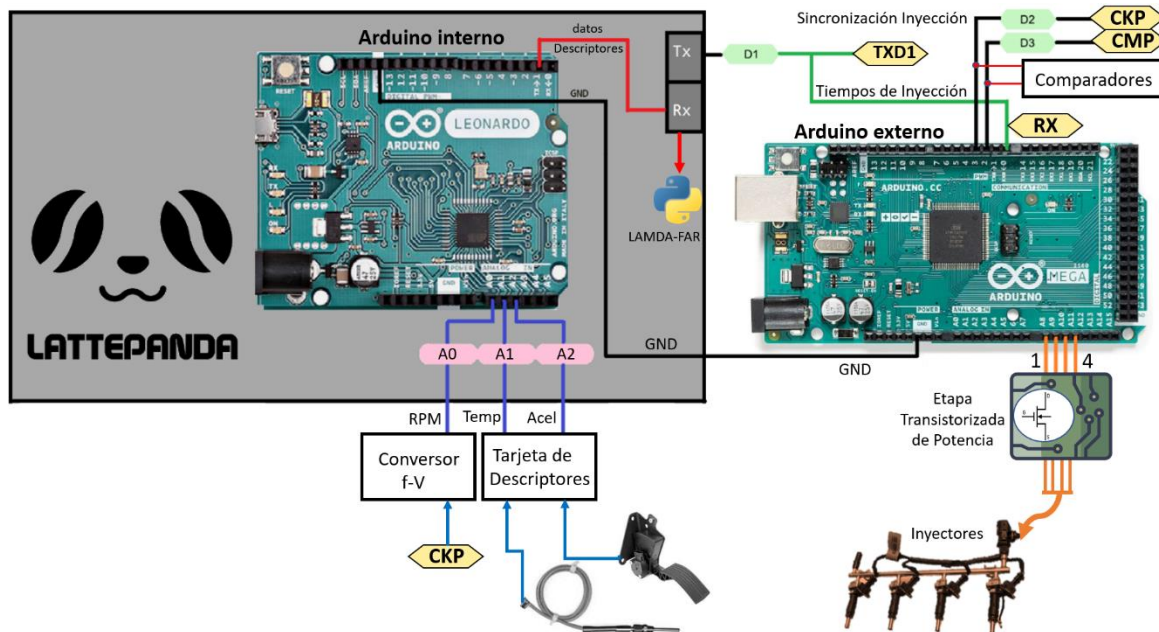


Figura B.1 Esquema de interconexión electrónica del sistema de control de inyección de etanol

Algunas de las señales utilizadas provienen directamente de la sensórica instalada del motor/vehículo, como es el caso de la velocidad medida en rpm, que se midió con la señal proveniente del sensor de posición de cigüeñal – CKP (*Crankshaft Position Sensor*, por sus siglas en inglés) el cual genera una señal de 60 pulsos/vuelta por cada giro del eje del motor, esta señal se hace pasar por un convertor de frecuencia a voltaje (f-v) para obtener una señal analógica proporcional a la velocidad de interés. Para medir la temperatura de los gases de escape se utilizó un termopar tipo K, ubicado en el múltiple de escape del motor, antes de la entrada a la turbina, este sensor fue acondicionado con un circuito integrado AD595 el cual entrega una señal analógica de voltaje de 10 mv por cada grado centígrado, este sensor fue ubicado en la tarjeta de descriptores mostrada en la Figura B.1. Finalmente, la señal de la posición del acelerador se obtuvo a partir de un potenciómetro lineal, esta señal se hizo pasar por un amplificador operacional en configuración de “seguidor de voltaje” (*buffer*) para que la señal original no se viera afectada. Tanto el sensor CKP como el sensor de posición del árbol de levas – CMP (*Camshaft Position sensor*, por sus siglas en inglés) fueron acondicionados con un circuito comparador para rectificar los niveles de voltaje de la señal. Estas dos últimas señales son las encargadas de efectuar la sincronización de la inyección de etanol con la inyección primaria diesel en el motor, procedimiento que se ejecuta en el microcontrolador externo Arduino MEGA 2560.

A continuación, se detalla el acondicionamiento y la caracterización realizada a cada una de las señales electrónicas de interés.

B.1.1 Señal de posición de cigüeñal y señal de posición del árbol de levas

Ambas señales son digitales, por lo tanto, solo es necesario usar un comparador para garantizar un voltaje entre 0 y 5 V, cuando ocurre un cambio de estado (Figura B.2)

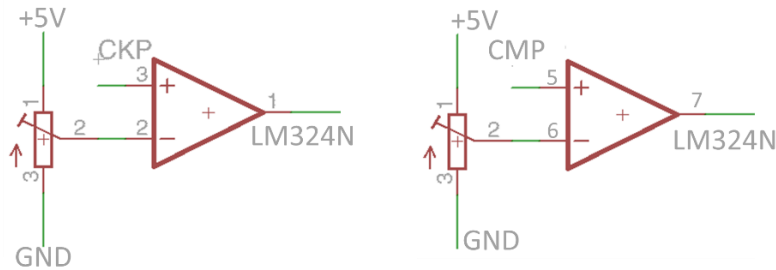


Figura B.2 Circuito Comparador

B.1.2 Posición del acelerador

Esta señal necesita acondicionamiento mediante un *buffer*, para garantizar alta impedancia a la entrada del microcontrolador (Figura B.3). La curva característica de la señal que indica la posición del acelerador se muestra en la Figura B.4.

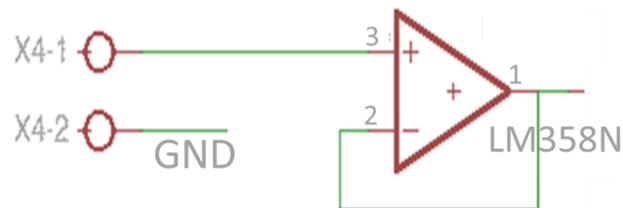


Figura B.3 Circuito Buffer

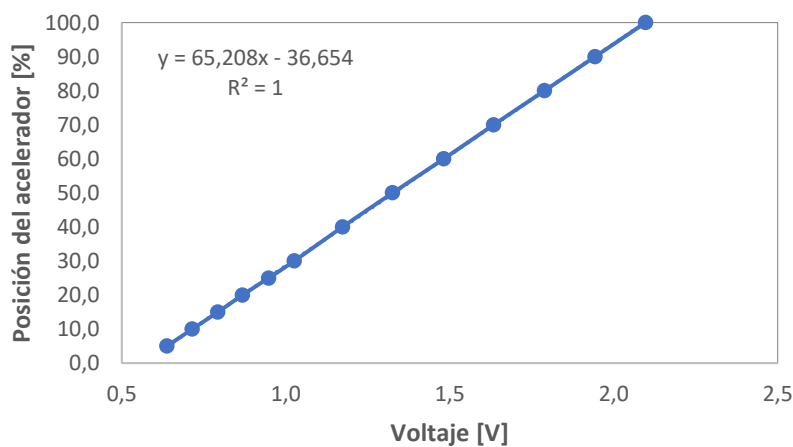


Figura B.4 Curva característica de la señal de posición del acelerador

B.1.3 Temperatura de gases de escape

La medición de la temperatura de los gases de escape se realizó con un termopar tipo K ubicado en el múltiple de escape del motor, justo a la entrada de la turbina, dicho termopar tiene un rango de

medición entre -200°C y 1100°C, y fue acondicionado mediante el circuito integrado AD595 (Figura B.5a), el cual entrega un voltaje lineal en la salida a razón de 10mV/°C. La Figura B.5b muestra cómo fue conectado el circuito integrado. La curva característica de esta variable se muestra en la Figura B.6.

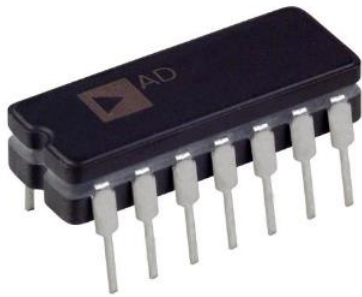


Figura B.5.a

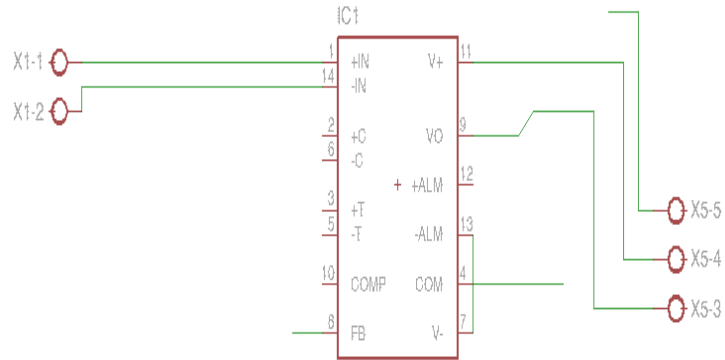


Figura B.5.b

Figura B.5 Sensor de temperatura

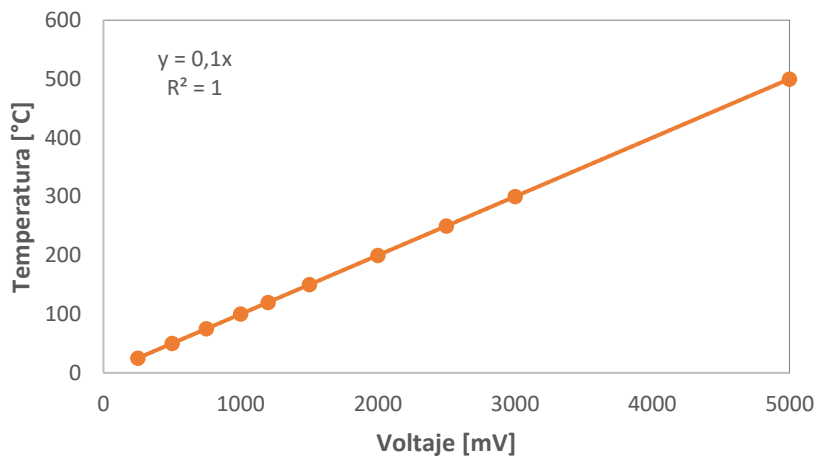


Figura B.6 Curva característica del sensor de temperatura de gases de escape

B.1.4 Velocidad del motor

La velocidad se midió en revoluciones por minuto (rpm), de forma analógica. Para este caso, se captura la señal del sensor CKP y se procesa con un convertor de frecuencia a voltaje comercial marca Jeanoko. La conversión es de 0-10 KHz a 0-10 V (ver Figura B.7). Luego de que la señal pasa por el convertor, el voltaje de salida entra a un *buffer* para garantizar alta impedancia.

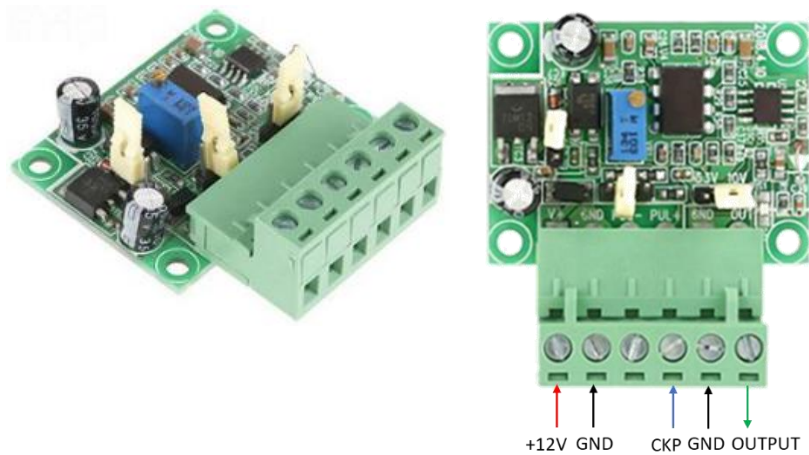


Figura B.7 Conversor de Frecuencia-Voltaje

La curva característica de la señal de velocidad del motor se muestra en la Figura B.8.

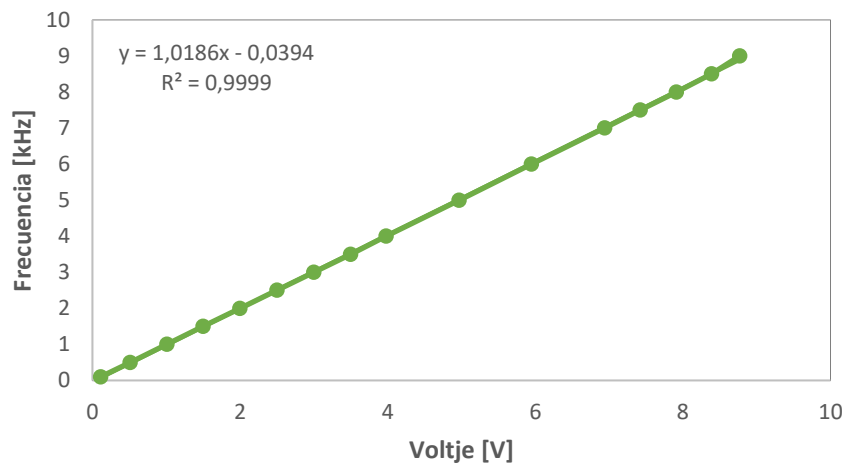


Figura B.8 Curva característica de la señal de velocidad del motor

La expresión matemática para indicar la velocidad del motor en términos de la frecuencia se presenta en la ecuación B.1.

$$rpm = \frac{f \cdot 60}{\# \text{ de pulsos/rev}} \quad (\text{B.1})$$

Donde f es la frecuencia medida en Hz, y el $\# \text{ de pulsos/rev}$ (número de pulsos por revolución) corresponde a los pulsos del sensor CKP (60 pulsos).

B.2 Diseño de la tarjeta electrónica en PCB (Printed Circuit Board)

Una vez se tienen todas las señales de interés acondicionadas y operando en los rangos deseados, se procede al diseño y fabricación de la tarjeta donde se interconectan los diferentes circuitos. Adicionalmente, en esta tarjeta se incluye la etapa de potencia de los inyectores. En la Figura B.9 se muestra el diseño de la tarjeta, el cual se realizó en el *software* EAGLE.

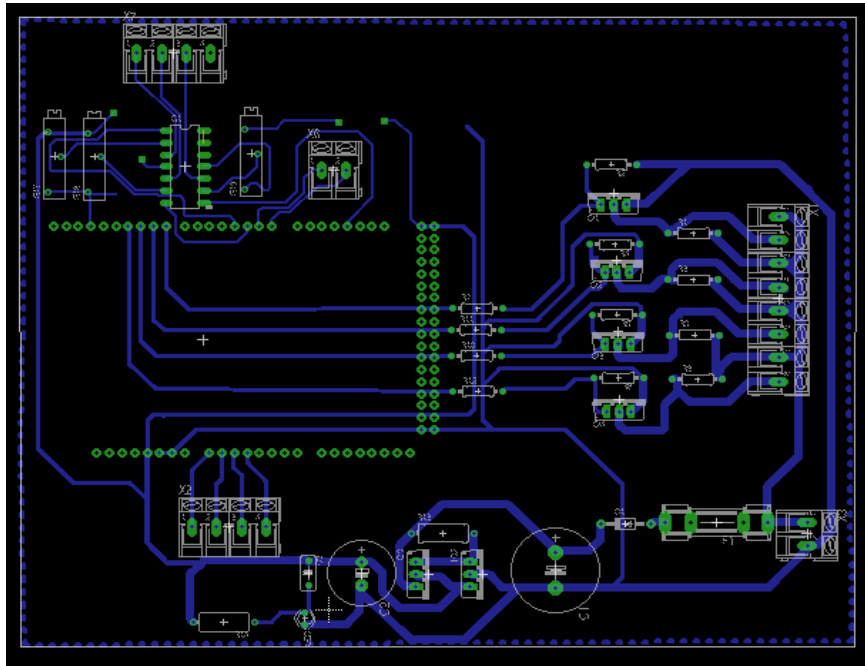


Figura B.9 Diseño de la tarjeta final en EAGLE

Por otro lado, se diseñó una tarjeta de acondicionamiento para integrar las señales usadas como descriptores, las cuales se conectan al microcomputador *Lattepanda*¹. La *Lattepanda* será el sistema encargado de resolver el algoritmo difuso en tiempo real (implementado en Python versión 3.8), por lo que también hay que evitar que le lleguen sobrecorrientes o sobrevoltajes. La Figura B.10 muestra la tarjeta con el acondicionamiento de las señales de los descriptores.

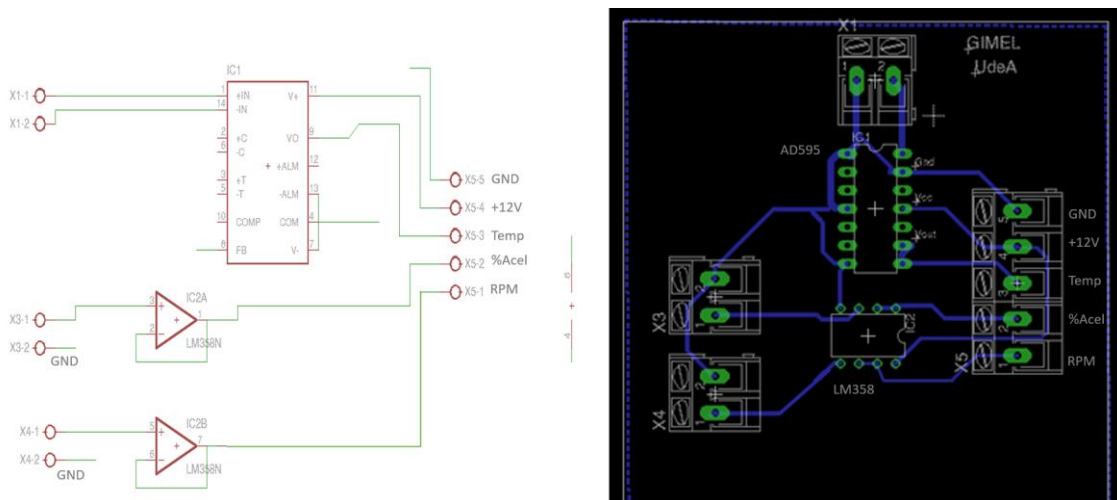


Figura B.10 Diseño de la tarjeta de acondicionamiento de los descriptores

¹ Lattepanda V1, RAM 2GB, almacenamiento 32GB, procesador Intel Atom® x5Z8-350, sistema operativo Windows 10.

B.3 Implementación de las tarjetas electrónicas

Después de realizar los diseños de las tarjetas electrónicas, se implementaron físicamente y se soldaron los respectivos componentes. En la Figura B.11, se muestra la tarjeta electrónica desarrollada, soldada y lista para funcionar. La tarjeta básicamente consta de una fuente regulada (12V a 5V), una etapa de potencia para activar cada uno de los inyectores de acuerdo con la señal de control (basada en transistores IRF 540), y una etapa de acondicionamiento de las señales de sincronización de la inyección (comparadores).

A partir de las pruebas realizadas con el sistema electrónico, se pudo comprobar que el método de recepción y transmisión serial implementado en el Arduino Leonardo interno de la lattepanda, era insuficiente para atender el llamado a las diferentes interrupciones de CMP, CKP, los conversores analógicos-digitales (ADC) y seriales simultáneamente. Por esta razón, se decidió emplear un Arduino Mega 2560 externo, y conectarlo a la lattepanda para controlar separadamente la sincronización con el motor y la activación y desactivación de los inyectores de etanol.

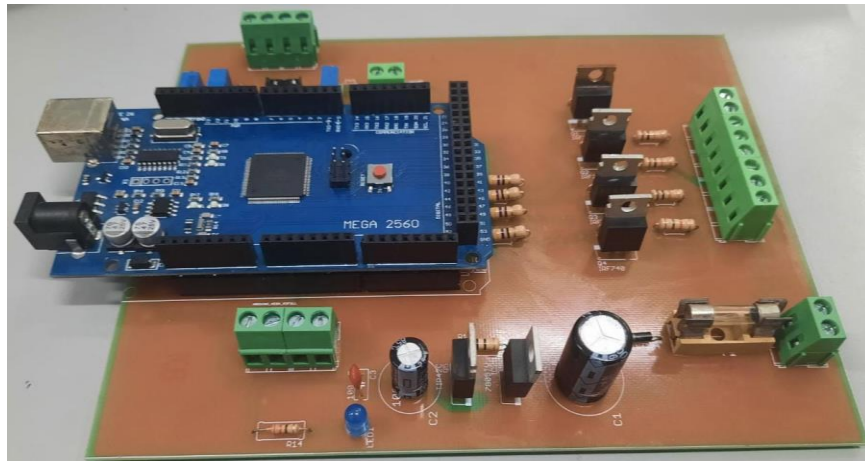


Figura B.11 Tarjeta electrónica implementada con Arduino MEGA 2560

En la Figura B.12, se ilustra la implementación de las tarjetas diseñadas para el acondicionamiento de los descriptores del sistema cuyo circuito esquemático se ilustra en la Figura B.10.

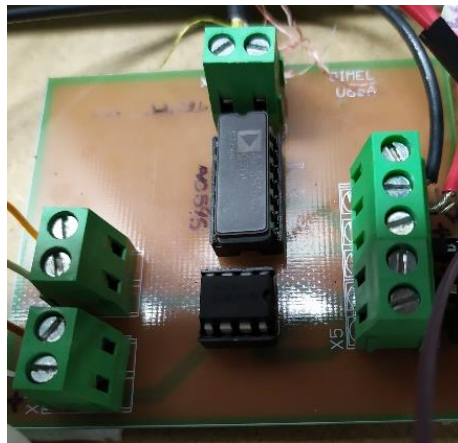


Figura B.12 Tarjeta electrónica implementada para los descriptores del sistema

B.4 Disposición final del sistema electrónico

Para la disposición final del sistema electrónico, se realizó el diseño e impresión 3D de una caja contenedora para el microcomputador LattePanda, la cual se ubicó junto a las tarjetas electrónicas dentro de una caja metálica, como se observa en la Figura B.14.

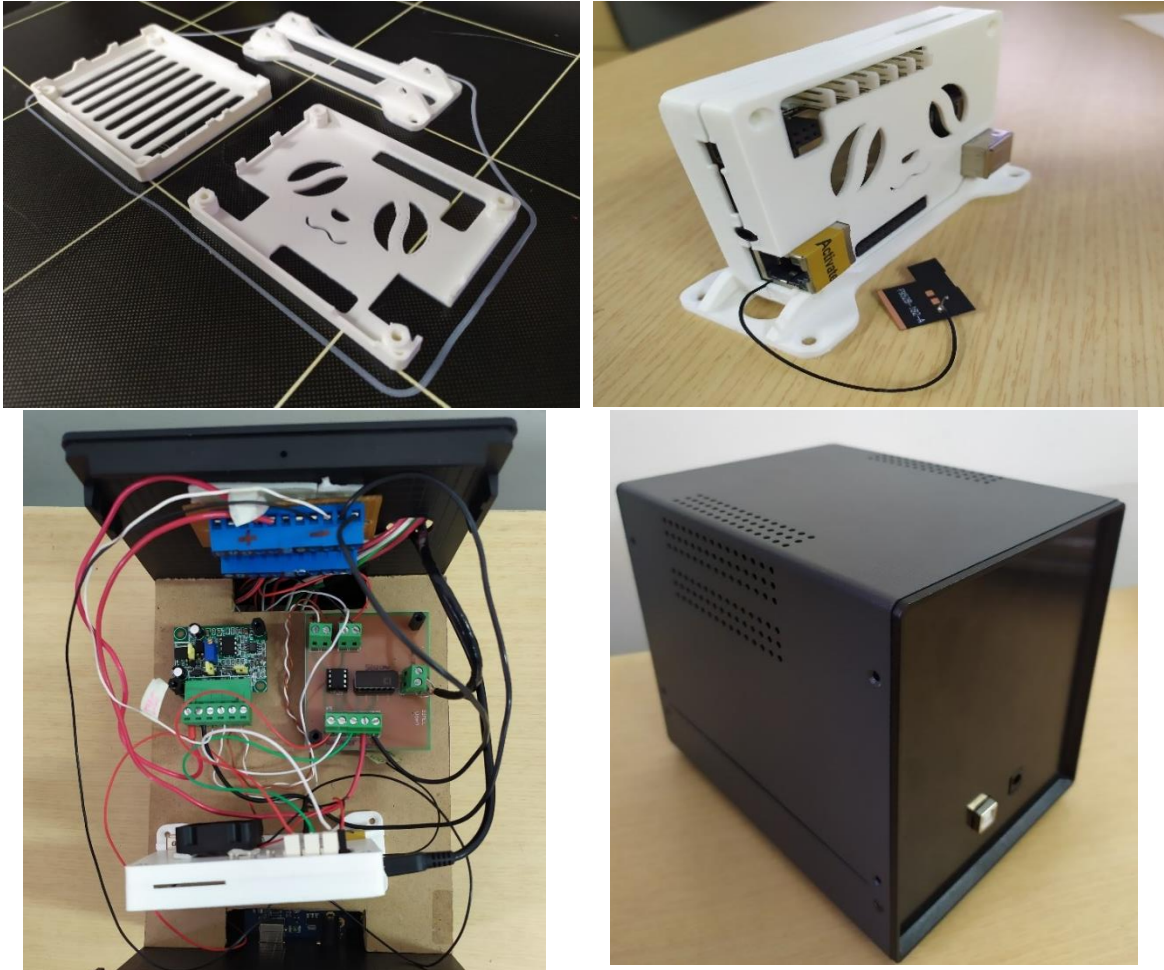


Figura B.14 Contenedor de la LattePanda y sistema de fumigación electrónico de etanol definitivo

En la figura B.15, se muestran las conexiones de todas las señales al sistema electrónico de fumigación de etanol definitivo.

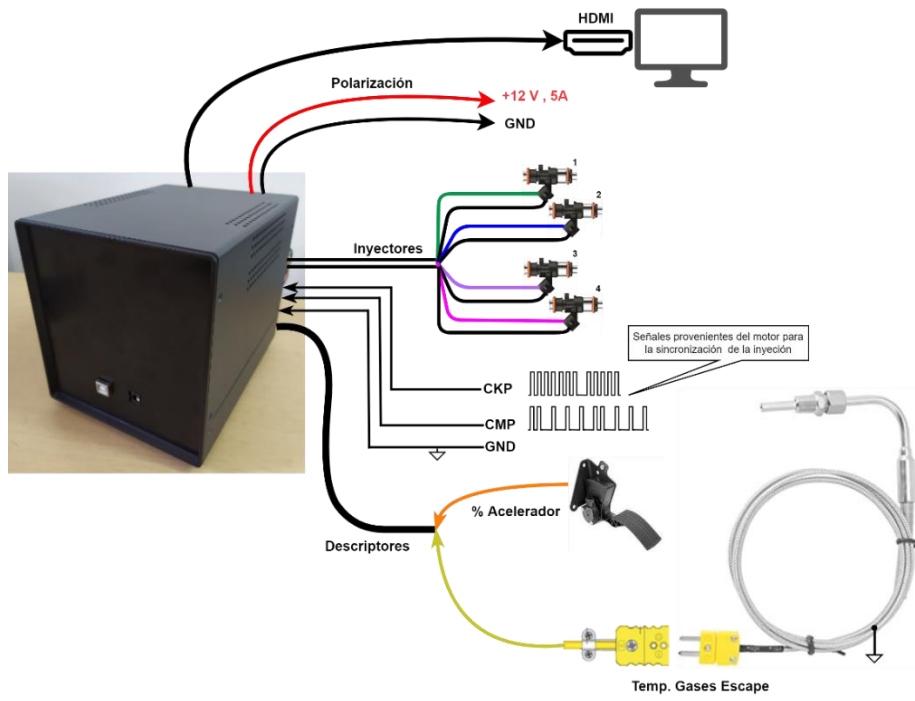


Figura B.15 Conexiones de la ECU del sistema electrónico de fumigación de etanol

Anexo C

EQUIPOS DE MEDICIÓN

En este anexo se muestran los equipos usados en este trabajo para la medición de emisiones de gases y partículas y los equipos que se utilizaron para la medición de consumos de combustible.

C.1 Equipos de medición para pruebas en motor

C.1.1 Consumo de combustible

Para medir el consumo de combustible se usó la balanza gravimétrica Shimadzu- TX3203L, a través de la técnica de aforo, que consiste en el cálculo del cambio de la masa durante un tiempo determinado. La balanza se muestra en la Figura C.1 y sus especificaciones técnicas en la Tabla C.1.

INFORMACIÓN GENERAL	
Marca	SHIMADZU
Modelo	TX3203L



Figura C.1 Balanza gravimétrica para medir consumo de diesel

Tabla C.1 Especificaciones técnicas de la balanza

CONCEPTO	VALORES	UNIDADES
Capacidad	3200	
Resolución	0.01	g
Linealidad	± 0.02	

C.1.2 Emisiones de NOx

La medición de emisiones de NOx se realizó con el analizador de gases CAPELEC CAP3010-4G, el cual mide mediante una celda electroquímica, con una frecuencia de muestreo de 10 Hz (Ver Figura C.2).

INFORMACIÓN GENERAL	
Marca	GESOLTEC-CAPELEC
Modelo	CAP 3010-4G
Serie	19006




Figura C.2 Analizador de gases para medir NOx

La Tabla C.2, muestra las especificaciones técnicas del equipo analizados de gases CAPELEC.

Tabla C.2 Especificaciones técnicas del analizador de gases

CONCEPTO	VALORES		UNIDADES
Resolución	CO	0,01	% en Volumen
	CO2	0,1	% en Volumen
	O2	0,01	% en Volumen
	NO	0,1	% en Volumen
Rango de Medición	NO	1	ppm % en Volumen
	CO	0 ... 10	% en Volumen
	CO2	0 ... 20	% en Volumen
	O2	0 ... 4	% en Volumen
	NO	4 ... 22	% en Volumen
	NO	0 ... 4000	ppm % en Volumen

C.1.3 Emisiones de partículas

Las emisiones de material particulado se midieron con el sensor difusivo Pegasor (PPS™), el cual permite medir las concentraciones de partículas de masa – PM (mg/m³) y número – PN (#/cm³) en tiempo real, con una frecuencia de 10 Hz. El sensor informa el área de superficie total, la masa y el número total de partículas. La Figura y la Tabla C.3, muestran la Figura del sensor y sus especificaciones técnicas, respectivamente.

INFORMACIÓN GENERAL		
Marca	PEGASOR	
Modelo	PPS-M	

Figura C.3 Sensor para medir material particulado

Tabla C.3 Especificaciones técnicas del sensor para medir PM

CONCEPTO	VALORES	UNIDADES	OBSERVACIÓN
Tamaño mínimo de partículas detectables	23	nm	Depende de la tensión de captura seleccionada
Tamaño máximo de partículas detectables	2.5	um	Depende de la distribución del tamaño de partículas medida
Temperatura de funcionamiento	-20 a 50	°C	--

C.1.4 Emisiones de hidrocarburos totales (THC)

El equipo Thermo-FID ES, es un analizador de hidrocarburos totales (THC) que usa la técnica de ionización de llama con hidrógeno, la Figura C.4 muestra el Thermo-FID y la tabla C.4 sus características técnicas.

INFORMACIÓN GENERAL	
Marca	SK-ELEKTRONIKA
Modelo	Thermo-FID ES




Figura C.4 Analizador de hidrocarburos totales (THC)

Tabla C.4 Especificaciones técnicas del THC

CONCEPTO	VALORES	UNIDADES	OBSERVACIÓN
Rango de medición	0.5 a 100000	mg	--
Linealidad	< 4	%	Por encima del rango de medición
Resolución	< 10	ppb	En el rango más pequeño

C.2 Equipos de medición para pruebas en vehículo

C.2.1 Emisiones de gases

Las emisiones contaminantes (NO, NO₂ y PN) se midieron con un equipo portátil de referencia ParSYNC del fabricante 3DATX con frecuencia de 1 Hz. La muestra de estos contaminantes fue tomada en el tubo de escape del vehículo. En la Figura C.5, se observa el equipo de medición y la interfaz de usuario donde se registra la gráfica de interés en tiempo real. La Tabla C.5 contiene la información técnica correspondiente a la medición de NO, NO₂ y PN.

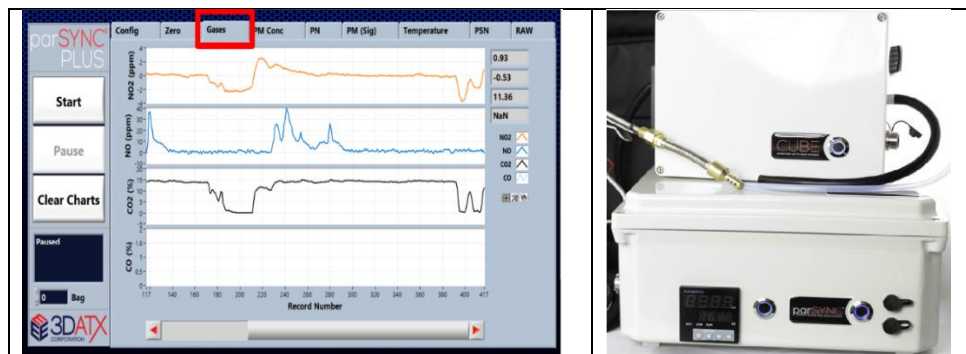


Figura C.5 Equipo de medición e interfaz gráfica parSYNC

Tabla C.5 Especificaciones técnicas del ParSYNC

CONCEPTO	VALORES	UNIDADES
Rango de tamaño de la partícula (PN/PM)	10 a 10000	nm
Rango de medición lineal (NO)	0 a 5000	ppm
Rango de medición lineal (NO ₂)	0 a 300	ppm
Tiempo de respuesta (NO)	< 5	s
Tiempo de respuesta (NO ₂)	< 25	s
Resolución (NO)	1 a 2	ppm
Resolución (NO ₂)	0.1	ppm

C.2.2 Relación Aire/Combustible

El equipo de referencia MEXA-730λ marca HORIBA (ver Figura C.6) está diseñado para medir la relación aire-combustible (A/F) en los gases de escape en tiempo real. Con la medición del flujo de aire, se obtiene el flujo de combustible en [g/s] como se muestra en la Ecuación C.1. La Tabla C.6, muestra las características técnicas de este equipo.

$$\frac{\text{Flujo aire } \left[\frac{g}{s}\right]}{\text{Relación aire-combustible}} = \text{Flujo de combustible } [g/s] \quad (C.1)$$



Figura C.6 Equipo de medición relación aire/combustible

Tabla C.6 Especificaciones técnicas del MEXA-730λ-HORIBA

CONCEPTO	VALORES		UNIDADES
Rango de Medición	Relación aire-combustible	9.5 a 200	A/F
	Proporción de exceso de aire	0.65 a 13.7	λ
	Oxígeno (O ₂)	0 a 99.99	% en Volumen

Para la instalación, el sensor se adecua en un tubo, el cual es acoplado al tubo escape sin necesidad de hacer ninguna modificación al vehículo. La alimentación del equipo se realiza con una fuente externa de 12 Vdc o se puede conectar directamente a la batería de los vehículos.

Para guardar los datos que entrega el MEXA-730λ, este equipo cuenta con una salida ANALOGA con una escala de 100:1 de 0 a 5Vdc, el cual se conecta a una tarjeta de adquisición de datos con su respectivo software, permitiendo guardar la información en un archivo de Excel con una frecuencia de 10Hz.

C.2.3 Consumo de etanol

Con el fin de registrar el consumo de etanol, se utilizó un flujómetro másico (coriolis) SITRANS FCT030 marca SIEMENS como el que aparece en la Figura C.7 (ver las especificaciones técnicas en la Tabla C.7), este equipo entregaba de forma directa el consumo de etanol en [g/s].



Figura C.7 Equipo de medición del consumo de etanol

Tabla C.7 Especificaciones del flujómetro másico SITRANS FCT030

CONCEPTO	VALORES	UNIDADES	OBSERVACIÓN
Carga mecánica	18 a 1000	Hz	aleatoria
Alimentación	24 a 90	V DC	--
Repetibilidad	± 0.05	%	--

C.2.4 Banco de rodillos

El banco de rodillos de referencia MD-RG-3000 HP CHASIS DYNAMOMETER, mostrado en la Figura C.8, fue el dinamómetro utilizado para realizar las pruebas dinámicas en un vehículo siguiendo el ciclo de conducción WLTC clase 1.



Figura C.8 Dinamómetro MD-RG-3000 HP – MUSTANG

Durante cada prueba, el algoritmo de clasificación inyectaba etanol realizando sustituciones de diésel (en base energética) del 0%, 10%, 20% ó 30% de acuerdo con el modo de operación en el cual estuviera operando el motor en cada tiempo de muestreo, el porcentaje a fumar lo establecía el algoritmo de forma autónoma de acuerdo con el histórico de datos y a la experimentación previa realizada en el banco de rodillos. En este caso, se verificaba la cantidad de emisiones contaminantes producidas por cada combustible usado (diésel comercial ó diésel + etanol) para decidir la pertinencia de sustituir determinado porcentaje de diésel por etanol o de sólo inyectar diésel comercial, buscando siempre que en la combustión se emitiera la menor cantidad de emisiones contaminantes y mantener en lo posible la eficiencia energética.

ANEXO D

PRUEBAS DE REPETIBILIDAD DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL FUMIGANDO ETANOL

Este anexo muestra los resultados de las pruebas de repetibilidad realizadas en la sala de ensayos donde estaba ubicado el motor diésel de automoción, dichas pruebas se realizaron durante 5 días y a diferentes horas (mañana y tarde), y se midieron tanto los parámetros mecánicos del motor como las emisiones contaminantes. El objetivo de estas mediciones era verificar que la medición de las variables de interés no se viese afectada por la hora de medición ni por las condiciones ambientales de la sala de ensayos.

D.1 Pruebas de repetibilidad estadística de las instalaciones experimentales fumigando etanol

Se realizaron pruebas de repetibilidad en el motor Cummins ISF 2.8L, para determinar la confianza estadística de las pruebas de fumigación de etanol. A continuación, se presentan los resultados gráficos del desempeño mecánico del motor (Figuras D.1 a D.9 para M1: 1630 rpm a 30 Nm, y Figuras D.10 a D.18 para M2: 2000 rpm a 50 Nm).

De las gráficas se observa que, para el modo de operación 2000 rpm a 50 Nm, se presenta una mayor variación de los parámetros mecánicos del motor respecto al modo de 1630 rpm a 30 Nm. En la gráfica de potencia, por ejemplo, se puede notar que el desempeño mecánico del motor se mantuvo estable para las diferentes mediciones y que los tiempos de inyección no se ven afectados para mantener dicho desempeño. De lo anterior se puede afirmar que la instalación experimental y las pruebas de inyección de Etanol en modo dual sobre el motor Diésel, son repetibles estadísticamente hablando, y que los tiempos de inyección de etanol, no se ven afectados por el modo de operación del motor ni afectan el desempeño mecánico del mismo.

Primer modo de operación (M1) 1630 rpm - 30 Nm

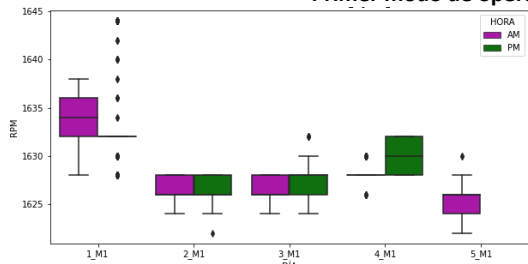


Figura D.1 Velocidad del motor [rpm]

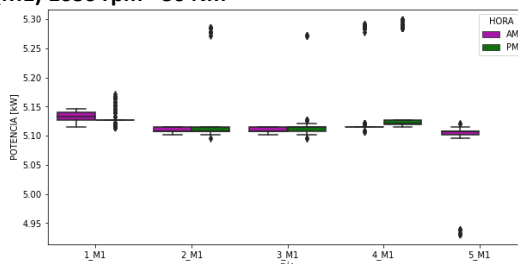


Figura D.2 Potencia [kW]

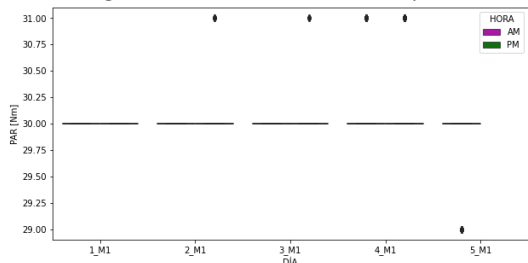


Figura D.3 Par [Nm]

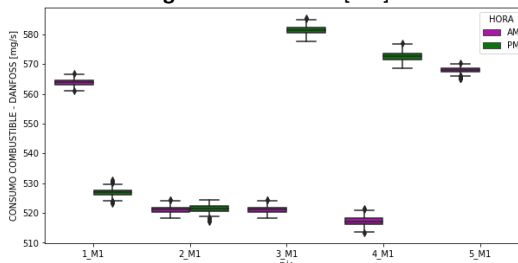


Figura D.4 Consumo de combustible [mg/s]

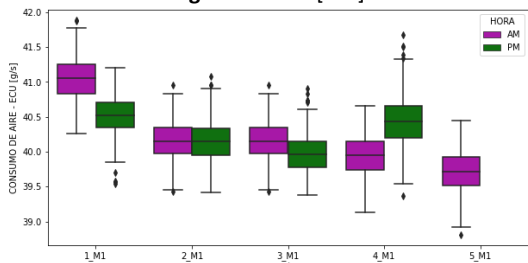


Figura D.5 Consumo de aire [g/s]

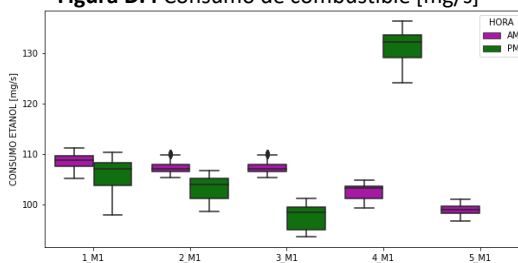


Figura D.6 Consumo de etanol [mg/s]

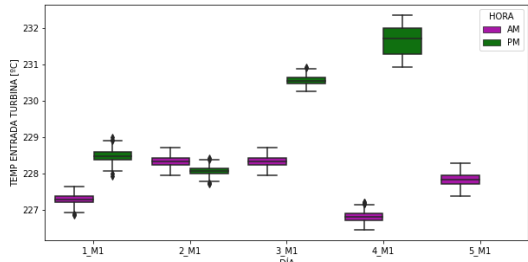


Figura D.7 Temperatura de gases de [°C]

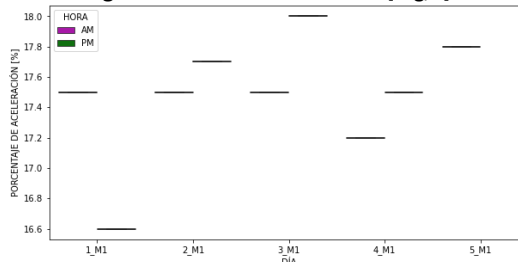


Figura D.8 Posición del acelerador [%]

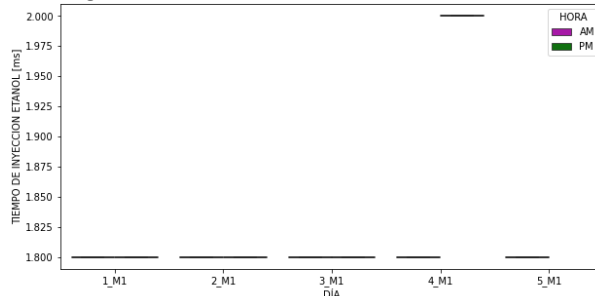


Figura D.9 Tiempo de inyección de etanol [ms]

Segundo modo de operación (M2) 2000 rpm - 50 Nm

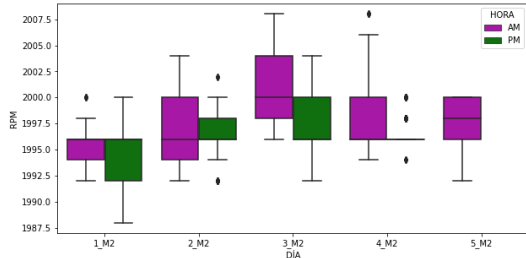


Figura D.10 Velocidad del motor [rpm]

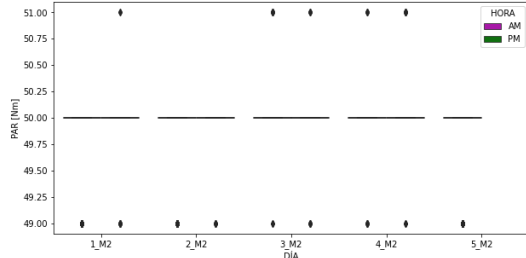


Figura D.11 Potencia [kW]

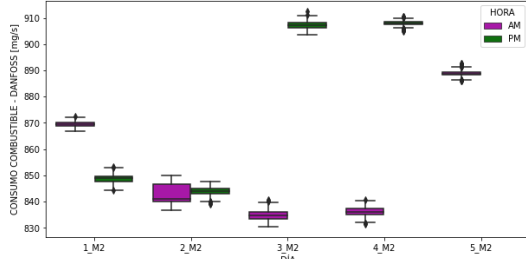
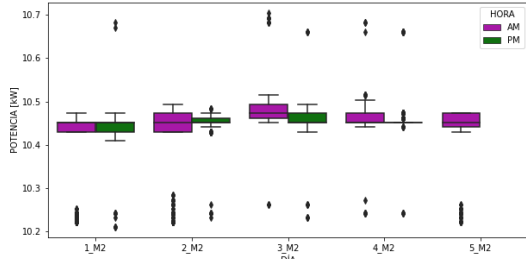


Figura D.13 Consumo de combustible [mg/s]

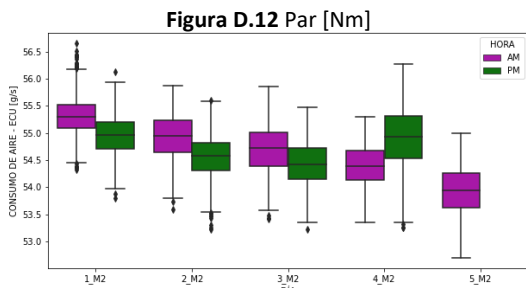


Figura D.12 Par [Nm]

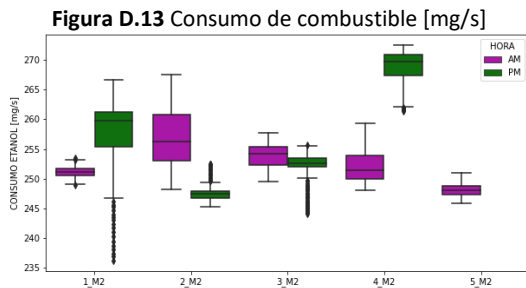


Figura D.15 Consumo de etanol [mg/s]

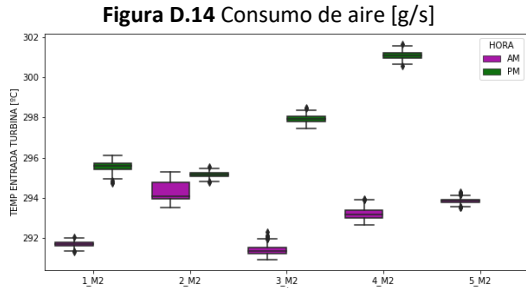


Figura D.14 Consumo de aire [g/s]

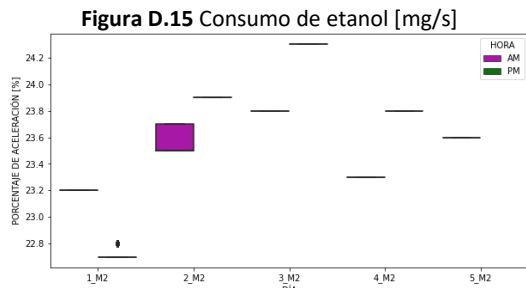


Figura D.17 Posición del acelerador [%]

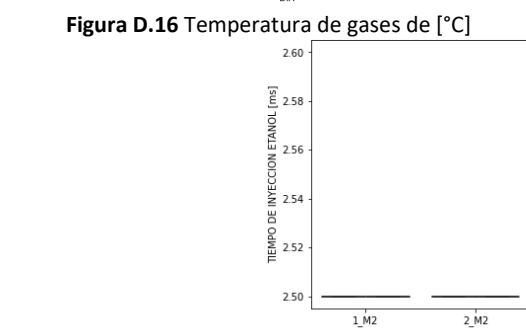


Figura D.16 Temperatura de gases de [°C]

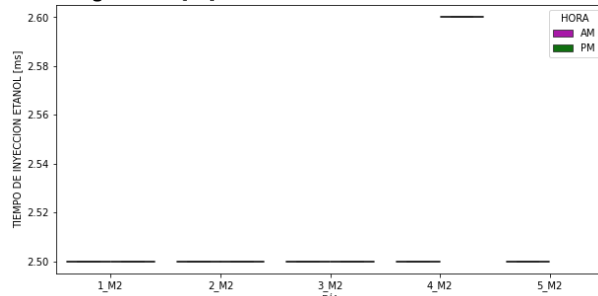


Figura D.18 Tiempo de inyección de etanol [ms]

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Millo, B. Kumar, T. Vlachos, C. Ciaravino, L. Postrioti, and G. Buitoni, "Effects of different biofuels blends on performance and emissions of an automotive diesel engine," vol. 159, pp. 614–627, 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2015.06.096
- [2] M. Lapuerta, O. Armas, and R. García-Contreras, "Stability of diesel–bioethanol blends for use in diesel engines," *Fuel*, vol. 86, no. 10–11, pp. 1351–1357, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2006.11.042.
- [3] F. A. Ruiz, C. V. Isaza, A. F. Agudelo, and J. R. Agudelo, "A new criterion to validate and improve the classification process of LAMDA algorithm applied to diesel engines," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 60, no. February, pp. 117–127, 2017, doi: 10.1016/j.engappai.2017.02.005.
- [4] J. S. Rosa, G. D. Telli, C. R. Altafini, P. R. Wander, and L. A. Oliveira Rocha, "Dual fuel ethanol port injection in a compression ignition diesel engine: Technical analysis, environmental behavior, and economic viability," *J. Clean. Prod.*, vol. 308, p. 127396, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127396.
- [5] J. Lee, S. Lee, and S. Lee, "Experimental investigation on the performance and emissions characteristics of ethanol/diesel dual-fuel combustion," *Fuel*, vol. 220, pp. 72–79, May 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.02.002.
- [6] A. F. López, M. Cadrazco, A. F. Agudelo, L. A. Corredor, J. A. Vélez, and J. R. Agudelo, "Impact of n-butanol and hydrous ethanol fumigation on the performance and pollutant emissions of an automotive diesel engine," *Fuel*, vol. 153, pp. 483–491, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2015.03.022.
- [7] J. S. Rosa, C. R. Altafini, P. R. Wander, G. D. Telli, and L. A. O. Rocha, "Wet ethanol fumigation on a compression ignition engine: effects of air intake throttled," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 11, p. 500, Nov. 2019, doi: 10.1007/s40430-019-2023-1.
- [8] V. B. Pedrozo, I. May, W. Guan, and H. Zhao, "High efficiency ethanol-diesel dual-fuel combustion: A comparison against conventional diesel combustion from low to full engine load," *Fuel*, vol. 230, pp. 440–451, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.05.034.
- [9] I. Abrar, T. Arora, and R. Khandelwal, "Bioalcohols as an alternative fuel for transportation: Cradle to grave analysis," *Fuel Process. Technol.*, vol. 242, p. 107646, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.fuproc.2022.107646.
- [10] F. A. Ruiz, A. F. Agudelo, and J. R. Agudelo, "Development of an electronic control system for the dual-fuel ethanol injection on an automotive diesel engine," PhD Thesis. Universidad de Antioquia, 2018.
- [11] F. A. Ruiz, M. Cadrazco, A. F. López, J. Valdepeñas, and J. R. Agudelo, "Impact of dual-fuel combustion with n-butanol or hydrous ethanol on the oxidation reactivity and nanostructure of diesel particulate matter," *Fuel*, vol. 161, pp. 18–25, 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2015.08.033.
- [12] G. D. Telli, C. R. Altafini, J. S. Rosa, and C. A. Costa, "Experimental investigation of a compression ignition engine operating on B7 direct injected and hydrous ethanol

- fumigation,” *Energy*, vol. 165, pp. 106–117, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.171.
- [13] P. C. Shukla, G. Belgiorno, G. Di Blasio, and A. K. Agarwal, Eds., *Alcohol as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines*. Singapore: Springer Singapore, 2021.
- [14] A. Imran, M. Varman, H. H. Masjuki, and M. A. Kalam, “Review on alcohol fumigation on diesel engine: A viable alternative dual fuel technology for satisfactory engine performance and reduction of environment concerning emission,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 26, pp. 739–751, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.05.070.
- [15] J. C. Ge, G. Wu, and N. J. Choi, “Comparative study of pilot–main injection timings and diesel/ethanol binary blends on combustion, emission and microstructure of particles emitted from diesel engines,” *Fuel*, vol. 313, p. 122658, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122658.
- [16] D. K. Jamuwa, D. Sharma, and S. L. Soni, “Experimental investigation of performance, exhaust emission and combustion parameters of stationary compression ignition engine using ethanol fumigation in dual fuel mode,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, pp. 221–231, May 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.055.
- [17] D. Kumar, U. Sonawane, K. Chandra, and A. K. Agarwal, “Experimental investigations of methanol fumigation via port fuel injection in preheated intake air in a single cylinder dual-fuel diesel engine,” *Fuel*, vol. 324, p. 124340, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124340.
- [18] Q. Wang, L. Wei, W. Pan, and C. Yao, “Investigation of operating range in a methanol fumigated diesel engine,” *Fuel*, vol. 140, pp. 164–170, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2014.09.067.
- [19] P. Wai, P. Karin, W. Phairote, N. Chollacoop, H. Kosaka, and W. Po-ngen, “Experimental investigation of the impact ethanol-biodiesel-diesel blended fuels on combustion, emission, and performance of compression ignition diesel engine,” *Mater. Today Proc.*, vol. 66, pp. 2830–2835, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.06.524.
- [20] L. Ning *et al.*, “A comparative study on the combustion and emissions of a non-road common rail diesel engine fueled with primary alcohol fuels (methanol, ethanol, and n-butanol)/diesel dual fuel,” *Fuel*, vol. 266, p. 117034, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117034.
- [21] M. A. Ghadikolaie, “Effect of alcohol blend and fumigation on regulated and unregulated emissions of IC engines—A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1440–1495, May 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.128.
- [22] M. Gowtham, C. G. Mohan, and R. Prakash, “Effect of n-butanol fumigation on the regulated and unregulated emission characteristics of a diesel engine,” *Fuel*, vol. 242, pp. 84–95, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.01.019.
- [23] Y. F. Jimenez-Ceron, R. Palacio, D. Lopez, J. C. Casas-Zapata, and J. R. A. Santamaria, “Assessment of carbonyl emissions from an automotive diesel engine fuelled with fumigated bioethanol,” in *2021 Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Pública (CASAP)*, Nov. 2021, pp. 1–4, doi: 10.1109/CASAP54985.2021.9703416.
- [24] S. Pandey, “A critical review: Application of methanol as a fuel for internal combustion engines and effects of blending methanol with diesel/biodiesel/ethanol on performance, emission, and combustion characteristics of engines,” *Heat Transf.*, vol. 51, no. 4, pp. 3334–

3352, Jun. 2022, doi: 10.1002/htj.22453.

- [25] M. A. Ghadikolaei, K.-F. Yung, C. S. Cheung, and P.-C. Lau, "Chemical properties and composition of PM emitted from a diesel engine fueled with ternary fuel (diesel-biodiesel-ethanol) in blended and fumigation modes," *Fuel*, vol. 251, pp. 368–382, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.04.007.
- [26] G. D. Telli, C. R. Altafini, C. A. Costa, J. S. Rosa, L. A. O. Rocha, and G. Lorenzini, "Experimental Study of a Dual-Fuel Generator Set Operating on Diesel Fuel Direct Injected and Hydrous Ethanol Fumigation at Different Loads," *Int. J. Des. Nat. Ecodynamics*, vol. 15, no. 6, pp. 777–784, Dec. 2020, doi: 10.18280/ijdne.150602.
- [27] Pandey, "Combustion and emissions behaviour assesment of a partially premixed charge compression ignition (PCCI) engine with diesel and fumigated ethanol," in *Energy*, 2019, pp. 590–596.
- [28] A. López, "Effect of the fumigation of hydrated bioetanol and n-butanol on the performance and emissions of a stationary diesel engine," Universidad de Antioquia- Universidad del Norte, 2014.
- [29] L. A. Morales, F. A. Ruiz, C. D. Moreno, and J. Aguilar, "Performance analysis of the LAMDA fuzzy algorithm improvements in different case studies," *Soft Comput.*, Dec. 2022, doi: 10.1007/s00500-022-07665-w.
- [30] I. Veza *et al.*, "Review of artificial neural networks for gasoline, diesel and homogeneous charge compression ignition engine," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 11, pp. 8363–8391, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.01.072.
- [31] K. Mahmodi, M. Mostafaei, and E. Mirzaee-Ghaleh, "Detecting the different blends of diesel and biodiesel fuels using electronic nose machine coupled ANN and RSM methods," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 51, p. 101914, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101914.
- [32] A. Parlak, Y. Islamoglu, H. Yasar, and A. Egrisogut, "Application of artificial neural network to predict specific fuel consumption and exhaust temperature for a Diesel engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 8–9, pp. 824–828, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.10.006.
- [33] R. Kenanoğlu, M. K. Baltacioğlu, M. H. Demir, and M. Erkinay Özdemir, "Performance & emission analysis of HHO enriched dual-fuelled diesel engine with artificial neural network prediction approaches," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 49, pp. 26357–26369, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.108.
- [34] G. Sujesh and S. Ramesh, "Modeling and control of diesel engines: A systematic review," *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 4, pp. 4033–4048, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.aej.2018.02.011.
- [35] A. S. Silitonga *et al.*, "Evaluation of the engine performance and exhaust emissions of biodiesel-bioethanol-diesel blends using kernel-based extreme learning machine," *Energy*, vol. 159, pp. 1075–1087, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.202.
- [36] J. Mohammadhassani, A. Dadvand, S. Khalilarya, and M. Solimanpur, "Prediction and reduction of diesel engine emissions using a combined ANN–ACO method," *Appl. Soft Comput.*, vol. 34, pp. 139–150, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.asoc.2015.04.059.
- [37] N. K. Singh, Y. Singh, A. Sharma, and E. A. Rahim, "Prediction of performance and emission

- parameters of Kusum biodiesel based diesel engine using neuro-fuzzy techniques combined with genetic algorithm,” *Fuel*, vol. 280, p. 118629, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118629.
- [38] Y. Yu, Y. Wang, J. Li, M. Fu, A. N. Shah, and C. He, “A Novel Deep Learning Approach to Predict the Instantaneous NO_x Emissions From Diesel Engine,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 11002–11013, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3050165.
- [39] S. Bhowmik, R. Panua, S. K. Ghosh, A. Paul, and D. Debroy, “Prediction of performance and exhaust emissions of diesel engine fuelled with adulterated diesel: An artificial neural network assisted fuzzy-based topology optimization,” *Energy Environ.*, vol. 29, no. 8, pp. 1413–1437, Dec. 2018, doi: 10.1177/0958305X18779576.
- [40] S. Dey, N. M. Reang, A. Majumder, M. Deb, and P. K. Das, “A hybrid ANN-Fuzzy approach for optimization of engine operating parameters of a CI engine fueled with diesel-palm biodiesel-ethanol blend,” *Energy*, vol. 202, p. 117813, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117813.
- [41] D. Kakati, S. Roy, and R. Banerjee, “Development of an artificial neural network based virtual sensing platform for the simultaneous prediction of emission-performance-stability parameters of a diesel engine operating in dual fuel mode with port injected methanol,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 184, pp. 488–509, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.01.087.
- [42] Shivakumar, P. Srinivasa Pai, and B. R. Shrinivasa Rao, “Artificial Neural Network based prediction of performance and emission characteristics of a variable compression ratio CI engine using WCO as a biodiesel at different injection timings,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 7, pp. 2344–2354, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.12.030.
- [43] J. Rezaei, M. Shahbakhti, B. Bahri, and A. A. Aziz, “Performance prediction of HCCI engines with oxygenated fuels using artificial neural networks,” *Appl. Energy*, vol. 138, pp. 460–473, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.088.
- [44] K. K. Billa, G. R. K. Sastry, and M. Deb, “Artificial Intelligence Based Artificial Neural Network Model to Predict Performance and Emission Paradigm of a Compression Ignition Direct Injection Engine Under Diesel-Biodiesel Strategies,” in *Energy Recovery Processes from Wastes*, Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 65–83, doi: 10.1007/978-981-32-9228-4_7.
- [45] A. N. Bhatt and N. Shrivastava, “Application of Artificial Neural Network for Internal Combustion Engines: A State of the Art Review,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 29, no. 2, pp. 897–919, Mar. 2022, doi: 10.1007/s11831-021-09596-5.
- [46] M. A. Koç and R. Şener, “Prediction of emission and performance characteristics of reactivity-controlled compression ignition engine with the intelligent software based on adaptive neural-fuzzy and neural-network,” *J. Clean. Prod.*, vol. 318, p. 128642, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128642.
- [47] Jiménez-Palacios, “Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing,” 1999.
- [48] H. S. Chong, Y. Park, S. Kwon, and Y. Hong, “Analysis of real driving gaseous emissions from

- light-duty diesel vehicles,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 65, pp. 485–499, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.09.015.
- [49] C. Wang, Z. Ye, Y. Yu, and W. Gong, “Estimation of bus emission models for different fuel types of buses under real conditions,” *Sci. Total Environ.*, vol. 640–641, pp. 965–972, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.289.
- [50] J. Seo, B. Yun, J. Park, J. Park, M. Shin, and S. Park, “Prediction of instantaneous real-world emissions from diesel light-duty vehicles based on an integrated artificial neural network and vehicle dynamics model,” *Sci. Total Environ.*, vol. 786, p. 147359, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147359.
- [51] T. Donato and R. Filomena, “Real time estimation of emissions in a diesel vehicle with neural networks,” *E3S Web Conf.*, vol. 197, p. 06020, Oct. 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202019706020.
- [52] D. M. Gomez Jaramillo and C. V. Isaza Narvaez, “Vehicle Online Monitoring System Based on Fuzzy Classifier,” *Veh. 2014, Third Int. Conf. Adv. Veh. Syst. Technol. Appl.*, no. c, pp. 33–38, 2014. ISBN: 978-1-61208-348-3
- [53] A. Barbado and Ó. Corcho, “Interpretable machine learning models for predicting and explaining vehicle fuel consumption anomalies,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 115, p. 105222, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.engappai.2022.105222.
- [54] J. Li, M. S. Herdem, J. Nathwani, and J. Z. Wen, “Methods and applications for Artificial Intelligence, Big Data, Internet of Things, and Blockchain in smart energy management,” *Energy AI*, vol. 11, p. 100208, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.egyai.2022.100208.
- [55] R. Penrose, “A generalized inverse for matrices,” *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.*, vol. 51, no. 3, pp. 406–413, Jul. 1955, doi: 10.1017/S0305004100030401.
- [56] T. Takagi and M. Sugeno, “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control,” *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116–132, Jan. 1985, doi: 10.1109/TSMC.1985.6313399.
- [57] R. Ballesteros, “Experimental analysis of the particles emissions by a diesel engine with conventional and alternative fuels,” Universidad de Castilla-La Mancha, 2002.
- [58] J. Aguilar-Martín, M. Balssa, and López De Mantaras, “Thesis Recursive Estimation of a partition. examples of learning and self-learning in R^n and l_n . (In french)Thèse Estimation Recursive d’une partition. exemples d’apprentissage et auto-apprentissage dans R^n et l_n ,” 1981.
- [59] A. Zare *et al.*, “Particulate number emissions during cold-start with diesel and biofuels: A special focus on particle size distribution,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 51, p. 101953, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.101953.
- [60] Z. Ren and X. Ji, “On prediction of air pollutants with Takagi-Sugeno models based on a hierarchical clustering identification method,” *Atmos. Pollut. Res.*, p. 101731, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.apr.2023.101731.
- [61] “Mustang Dynamometer Performance Chassis Dynamometers.” <https://www.mustangdyne.com/wp-content/uploads/2022/11/MustangDynamometer->

mini-catalog_v4.pdf.

- [62] “Ficha técnica motor Cummins 3.0 TON.” <https://www.foton.com.co/comprar-vehiculo-foton-colombia-foton-fhr-cummins-30-ton.html>.
- [63] “Emission Test Cycles.” <https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>.
- [64] A. B. de N. T. (ABNT), *NBR6601 DE 05/2021 - Veículos rodoviários automotores leves - Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento*. 2021.
- [65] S. Ascaso, “Catalizadores libres de metales nobles para la eliminación simultánea de hollín y NOx en motores diesel.,” Universidad de Zaragoza, 2015.
- [66] M. A. Fayad, A. Tsolakis, F. J. Martos, M. Bogarra, I. Lefort, and K. D. Dearn, “Investigation the effect of fuel injection strategies on combustion and morphology characteristics of PM in modern diesel engine operated with oxygenate fuel blending,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 35, p. 101476, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.tsep.2022.101476.
- [67] P. Wai *et al.*, “Experimental investigation of the influence of ethanol and biodiesel on common rail direct injection diesel Engine’s combustion and emission characteristics,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 39, p. 102430, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.102430.
- [68] Y. Fujitani *et al.*, “Particle number emission factors from diesel trucks at a traffic intersection: Long-term trend and relation to particle mass-based emission regulation,” *Atmos. Environ. X*, vol. 5, p. 100055, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.aeaoa.2019.100055.
- [69] A. Damyanov and P. Hofmann, “Operation of a diesel engine with intake manifold alcohol injection,” *Automot. Engine Technol.*, vol. 4, no. 1–2, pp. 17–28, Jun. 2019, doi: 10.1007/s41104-019-00040-2.
- [70] O. Armas, A. Gómez, and C. Mata, “Methodology for measurement of diesel particle size distributions from a city bus working in real traffic conditions,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 10, p. 105404, Oct. 2011, doi: 10.1088/0957-0233/22/10/105404.
- [71] O. Armas, M. Lapuerta, and C. Mata, “Methodology for the analysis of pollutant emissions from a city bus,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 4, p. 045302, Apr. 2012, doi: 10.1088/0957-0233/23/4/045302.