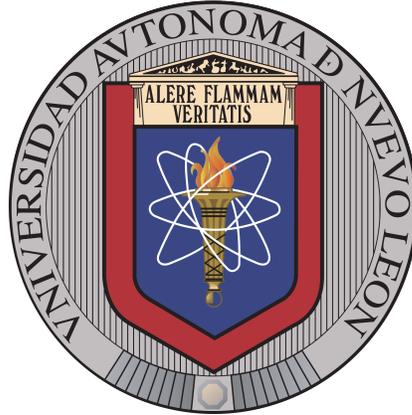


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



“CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA
EMISIÓN DEL NÚMERO DE NANOPARTÍCULAS
DURANTE EL PROCESO DE COMBUSTIÓN MEP
CON GASOLINAS MEXICANAS, ALCOHOLES PUROS
Y MEZCLAS OXIGENADAS”

POR

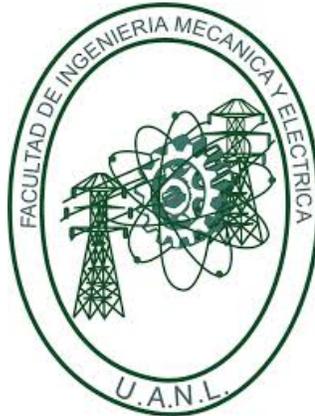
FRANCISCO JAVIER SALAS MONTAÑO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN
EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

17 DE JUNIO DE 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



“CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA
EMISIÓN DEL NÚMERO DE NANOPARTÍCULAS
DURANTE EL PROCESO DE COMBUSTIÓN MEP
CON GASOLINAS MEXICANAS, ALCOHOLES PUROS
Y MEZCLAS OXIGENADAS”

POR

FRANCISCO JAVIER SALAS MONTAÑO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN
EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

17 DE JUNIO DE 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Caracterización experimental de la emisión del número de nanopartículas durante el proceso de combustión MEP con gasolinas mexicanas, alcoholes puros y mezclas oxigenadas", realizada por el estudiante Francisco Javier Salas Montaña, con número de matrícula 1564916, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Simón Martínez Martínez
Director

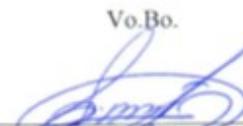
M.C. Luis Fernando Rua Mojica
Co-Director

Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León
Revisor

M.C. Miguel García Yera
Revisor

Dr. Pedro López Cruz
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 507507

Acta Núm. 4181

Ciudad Universitaria, a 06 de junio de 2023.

A Dios.

A mis padres.

A mis hermanos.

A mi familia.

A México.

A la humanidad.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XVI
Resumen	XVIII
1. Introducción	1
1.1. Motivación del estudio	2
1.2. Justificación del estudio	5
1.3. Antecedentes	7
1.3.1. Daño a la salud por la emisión de nanopartículas	7
1.3.2. Legislación en materia de emisiones de Nanopartículas	11
1.3.3. Emisión de nanopartículas por MCI	14
1.4. Hipótesis	22
1.5. Objetivos	22
1.5.1. General	22
1.5.2. Objetivos específicos	22
2. Marco teórico	24

2.1. Motores de combustión interna	24
2.1.1. Ciclos de trabajo de los MCI: 4 tiempos	25
2.1.2. Motores de Encendido Provocado	26
2.1.3. Motores de Encendido por Compresión	28
2.1.4. Relación de compresión en los motores	28
2.1.5. Fenómeno de autoginición en MEP	29
2.2. Combustibles	30
2.2.1. Gasolina	30
2.2.2. Combustibles base alcohol	32
2.2.3. Número de Octano	33
2.3. Emisiones contaminantes en los MCI	35
2.3.1. Nanopartículas	36
2.4. Motor CFR	40
3. Metodología experimental	41
3.1. Instalación experimental	42
3.1.1. Motor CFR F1/F2	42
3.1.2. Analizador de gases MAHA MET 3.6	46
3.1.3. Analizador de nanopartículas TSI 3795	48
3.2. Matriz experimental	50
3.2.1. Motor CFR	50

3.2.2. Combustibles	51
3.2.3. Matriz de ensayos y condiciones de operación experimental . .	54
3.2.4. Tratamiento de datos	56
3.2.5. Tratamiento de datos para presión en cámara	58
4. Resultados experimentales	60
4.1. Gráficas de cajas y bigotes para valores de la concentración del número de NP para cada elemento de la matriz	61
4.2. Resultados del tratamiento estadístico de la concentración del número de nanopartículas	69
4.3. Resultados de las curvas de presión en cámara obtenidas experimentalmente para cada tipo de combustible y sus relaciones de compresión conforme la ASTM D2700	75
4.3.1. Resultados índice de autoignición	80
4.4. Resultados del análisis de gases	85
4.4.1. Resultados de lambda y oxígeno	86
4.4.2. Resultados de la concentración de masa de las partículas . . .	88
4.4.3. Resultados de CO y CO ₂	89
4.4.4. Resultados de los NO _x	91
4.4.5. Resultados de hidrocarburos	92
5. Conclusiones y trabajos futuros	93

5.1. Conclusiones del análisis de los resultados en la concentración del número de nanopartículas.	94
5.2. Conclusiones del análisis de los resultados de la presión en cámara de combustión.	96
5.3. Conclusiones del análisis del índice de autoignición	97
5.4. Conclusiones generales de las emisiones de gases	99
5.5. Conclusiones del análisis general entre emisiones y parámetros	102
5.6. Trabajos futuros	103
A. Valores de la concentración del número de nanopartículas	104
B. Tablas de valores de presión en cámara de combustión	110
C. Tablas de valores del índice de autoignición	114
D. Tablas de valores de gases	118

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Huella de carbono por km recorrido por pasajero, 2019	4
1.2. Vías de ingreso de UPF y NP al cuerpo humano. Autor desconocido.	9
2.1. Fases de la combustión en motor de 4 tiempos	25
2.2. Inyección al puerto [76].	27
2.3. Inyección directa [76].	28
2.4. Estructuras químicas de las principales emisiones por MCI.	35
2.5. Distribución del material particulado producto de la combustión de un MCI, resultado de los efectos nucleación y acumulación [82].	37
2.6. Estructura general de una NP	37
3.1. Diagrama de bloques del banco de pruebas experimental.	42
3.2. Analizador de gases MAHA MET 6.3	47
3.3. Analizador de nanopartículas TSI 3795	48
3.4. Comparación de gráficas a) NP y b) O ₂ , bajo combustión y arrastre.	55
4.1. Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de gasolina magna al 100 % con (T_{adm}) de 38 y 68°C.	61

4.2. Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de gasolina premium al 100 % con (T_{adm}) 38 y 68°C.	62
4.3. Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de butanol al 100 % con (T_{adm}) de 38 y 68°C.	63
4.4. Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de metanol al 100 % con (T_{adm}) de 38 y 68°C.	64
4.5. Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de mezcla gasolina magna al 85 % y butanol al 15 % con (T_{adm}) de 38 y 68°C.	65
4.6. Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de la mezcla gasolina magna al 85 % y metanol al 15 % con (T_{adm}) de 38 y 68°C.	66
4.7. Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de mezcla gasolina magna al 50 % y butanol al 50 % con (T_{adm}) de 38 y 68°C.	67
4.8. Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de la mezcla gasolina magna al 50 % y metanol al 50 % con (T_{adm}) de 38 y 68°C.	68
4.9. Comportamiento de la media armónica de la concentración de NP - Combustibles puros.	69
4.10. Comportamiento de la media armónica de la concentración de NP - Mezclas con 85 % de gasolina regular y 15 % de alcohol.	71
4.11. Comportamiento de la media armónica de la concentración de NP - Mezclas con 50 % de gasolina regular y 50 % de alcohol.	73

4.12. Presión en cámara de combustión con gasolina magna pura a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.	76
4.13. Presión en cámara de combustión con gasolina premium pura a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.	76
4.14. Presión en cámara de combustión con butanol puro a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.	77
4.15. Presión en cámara de combustión con metanol puro a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.	77
4.16. Presión en cámara de combustión con gasolina magna al 85 % y butanol al 15 % a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.	78
4.17. Presión en cámara de combustión con gasolina magna al 85 % y metanol al 15 % a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.	78
4.18. Presión en cámara de combustión con gasolina magna al 50 % y butanol al 50 % a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.	79
4.19. Presión en cámara de combustión con gasolina magna al 50 % y metanol al 50 % a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.	79
4.20. Gráficas de línea y marcador: valores máximos para índice de autoignición con (T_{adm}) de 38°C. A) Gasolinas y alcoholes puros. B) Gasolinas y mezclas con 15 % contenido de alcohol. C) Gasolinas y mezclas con 50 % contenido de alcohol.	81

4.21. Gráficas de línea y marcador: Valores máximos para índice de autoignición con (T_{adm}) de 68°C. A) Gasolinas y alcoholes puros. B) Gasolinas y mezclas con 15 % contenido de alcohol. C) Gasolinas y mezclas con 50 % contenido de alcohol.	82
4.22. Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para índice de autoignición con (T_{adm}) de 38°C. A) Gasolinas y alcoholes puros. B) Gasolinas y mezclas con 15 % contenido de alcohol. C) Gasolinas y mezclas con 50 % contenido de alcohol.	84
4.23. Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para índice de autoignición con (T_{adm}) de 68°C. A) Gasolinas y alcoholes puros. B) Gasolinas y mezclas con 15 % contenido de alcohol. C) Gasolinas y mezclas con 50 % contenido de alcohol.	85
4.24. Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para emisiones de Oxígeno.	87
4.25. Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para emisiones de Lambda.	87
4.26. Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para emisiones de la concentración de masa de partículas.	88
4.27. Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para CO.	89
4.28. Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para CO ₂	90
4.29. Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para NO _x	91
4.30. Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para HC sin quemar.	92

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Legislaciones Europeas con límites de PN	14
2.1. Composición de las gasolinas mexicanas	31
3.1. Especificaciones técnicas del motor CFR	43
3.2. Especificaciones técnicas del analizador de gases MAHA MET 6.3	46
3.3. Especificaciones técnicas del analizador de nanopartículas TSI 3795.	49
3.4. Condiciones de operación del Motor CFR.	50
3.5. Matriz experimental de los combustibles.	51
3.6. Propiedades de combustibles puros y alcoholes.	52
3.7. Propiedades de mezclas gasolina-alcohol.	53
A.1. Valores de media armónica para combustibles puros.	104
A.2. Valores de media armónica para mezclas gasolina-alcohol.	105
A.3. Valores estadísticos de la concentración del número de NP para GM100.105	
A.4. Valores estadísticos de la concentración del número de NP para GP100.106	
A.5. Valores estadísticos de la concentración del número de NP para M100. 106	

A.6. Valores estadísticos de la concentración del número de NP para B100.	107
A.7. Valores estadísticos de la concentración del número de NP para G85M15.	107
A.8. Valores estadísticos de la concentración del número de NP para G85B15.	108
A.9. Valores estadísticos de la concentración del número de NP para G50M50.	108
A.10. Valores estadísticos de la concentración del número de NP para G50B50.	109
B.1. Media de presión en cámara de combustión para combustibles puros.	110
B.2. Media de presión en cámara de combustión para mezclas.	111
B.3. Máximos de presión en cámara de combustión para combustibles puros.	112
B.4. Máximos de presión en cámara de combustión para mezclas.	113
C.1. Media del índice de autoignición para combustibles puros.	114
C.2. Medias del índice de autoignición para mezclas.	115
C.3. Máximos del índice de autoignición para combustibles puros.	116
C.4. Máximos del índice de autoignición para mezclas.	117
D.1. Valores medios de oxígeno de combustibles puros.	118
D.2. Valores medios de oxígeno de mezclas.	119
D.3. Valores medios de lambda de combustibles puros.	120
D.4. Valores medios de lambda de mezclas.	120
D.5. Valores medios de la masa de partículas de combustibles puros.	121
D.6. Valores medios de la masa de partículas de mezclas.	121

D.7. Valores medios de hidrocarburos de combustibles puros.	122
D.8. Valores medios de hidrocarburos de mezclas.	122
D.9. Valores medios de monóxido de carbono de combustibles puros.	123
D.10. Valores medios de monóxido de carbono de mezclas.	123
D.11. Valores medios de dióxido de carbono de combustibles puros.	124
D.12. Valores medios de dióxido de carbono de mezclas.	124
D.13. Valores medios de NO _x de combustibles puros.	125
D.14. Valores medios de NO _x de mezclas.	125

AGRADECIMIENTOS

Gómez Morín escribió en su libro “1915”:

“Mientras los hombres consuman lo mejor de su vida y energía en librarse de los más bajos dolores -de la miseria y opresión-, será imposible que logren alcanzar propósitos superiores e ideales mas altos.”

Agradezco a mis padres, por ocuparse de sanar en mi familia la miseria y opresión que se vive en la sociedad, dándome así, la oportunidad de crecer intelectualmente en ámbito científico, acompañado de un crecimiento espiritual y un favorable camino el cual seguir lleno de valores, inculcados por ellos mismos a través acción y ejemplo, con la premisa de mejorar el entorno social en el cual me desarrollo. Al igual que mis hermanos, son y serán mi fuente de inspiración.

A mi familia entera, hermanos, abuelos, tíos y primos, por apoyarme y resguardarme cuando lo necesité, además de la confianza y cariño que han puesto en mi persona.

Al Dr. Simón Martínez Martínez, director de esta tesis y principal promotor del Grupo de Energías Térmica y Renovable, por facilitar el proceso de investigación y experimentación a través del laboratorio Físico-Química de la Combustión.

Al M.C.I. Luis Rúa, co-director de la tesis, por colaborar en la investigación y experimentación, además de sus lecciones en ingeniería que aportaron para realizarla.

A los compañeros, I.F. María José Carbajal y el Ing. Antonio Sierra, así como

al Dr. Daniel de la Rosa, por aportar un sin fin de anécdotas, además del apoyo brindado durante mi estancia en el laboratorio Físico-Química de la Combustión.

Al Grupo de Energías Térmica y Renovable, por aceptarme para formar parte del equipo de investigación e incluirme en los proyectos. Sin duda una experiencia satisfactoria para mi crecimiento personal.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) del Gobierno de México, por financiación de mis estudios maestría (CVU: 1040685), y por apoyar esta investigación a través del Laboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad en Biocombustibles (LaNDACBio).

Este trabajo se realizó en los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) del Grupo de Investigación en Energías Térmica y Renovable (GETR) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la casa de estudios Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

RESUMEN

I.P. Francisco Javier Salas Montaña.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: “CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EMISIÓN DEL NÚMERO DE NANOPARTÍCULAS DURANTE EL PROCESO DE COMBUSTIÓN MEP CON GASOLINAS MEXICANAS, ALCOHOLES PUROS Y MEZCLAS OXIGENADAS”.

Número de páginas: 136.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo principal de esta investigación es analizar la concentración del número de nanopartículas presentes en los gases de escape producto del proceso de combustión de combustibles puros y mezclas oxigenadas en un motor CFR, y determinar el impacto de las condiciones de operación y la proporción de alcohol en la mezcla.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Por medio del estudio realizado se relacionó el aumento de la concentración del número de nanopartículas, el octanaje y la temperatura de aire de admisión en gasolinas magna y premium. El butanol emite concentraciones menores en comparación con gasolina magna y el metanol. Ambos alcoholes demuestran mayor dependencia a propiedades físico-químicas y temperatura de aire de admisión que al octanaje. Además de distinguir una disminución en el número de nanopartículas cuando hay 50 % de alcohol en mezcla con gasolina magna.

Firma del director: _____
Dr. Simón Martínez Martínez

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En el capítulo 1 se aborda la esencia de la tesis como primer apartado, donde se expone la motivación y justificación del estudio, partiendo del panorama actual a nivel mundial. Posterior a esto, se detallan los antecedentes de la investigación, finalizando con la hipótesis, objetivo general y objetivos particulares planteados para orientar la investigación.

1.1 MOVITACIÓN DEL ESTUDIO.

El crecimiento de la población mundial en 2020 fue del 1% respecto al 2019, con una cantidad mayor a los 7.8 mil millones de habitantes distribuidos alrededor del mundo. En comparación con el año 1950, donde la población se contabilizó en 2.5 mil millones de personas aproximadamente, 37 años después, en 1987, la población fue duplicada a 5 mil millones de habitantes según datos del Banco Mundial y la Organización de las Naciones Unidas [1, 2], estos datos generan una media de la población en aumento de 2.5 mil millones cada 37 años.

El fenómeno de crecimiento demográfico trae consigo la necesidad del aumento energético para suministrar los servicios primordiales, por esta razón la demanda mundial de energía en 2021 recuperó un 4% en crecimiento referente a la pérdida 2020. Dentro de las principales demandas energéticas a nivel mundial se encuentra la energía eléctrica incrementando 1,000 terawatt-horas (TWh) en 2021, China actúa como el principal consumidor con un 10% en crecimiento del consumo a comparación del 2019. Por otro lado, los combustibles utilizados en el sector del transporte han impactado con un alza en la demanda de 5.2 millones de barriles diarios en 2021, posterior a una caída de 8.7 mbd en el 2020 debido a los estragos de la pandemia por Covid 19 [3]. Para satisfacer la demanda energética se cuenta con distintas fuentes de generación siendo los combustibles fósiles los principales en la lista: el carbón, combustibles líquidos y el gas natural, participando también la energía nuclear con un porcentaje pequeño, con referencias registradas durante la última década del siglo XX y la primer década del siglo XXI, mientras que los datos en el año 2015 muestran una producción de energía con fuentes renovables como: biomasa, hidroeléctricas, solares y eólicas, sin embargo, estas últimas no representan competencia frente a las energías fósiles [4]. En pro del cambio en la cultura de generación energética y para el 2040 las agencias IEA, OPEC e IRENA proyectan un mayor auge de fuentes renovables respecto al año 2015 [4].

El uso de combustibles fósiles para generación de energía y transporte contribuye al deterioro ambiental, debido a esto en la Cumbre de París se hizo un llamado a la descarbonización de la energía a nivel mundial [5]. El acuerdo de París data una serie de compromisos para reforzar la respuesta mundial en contra de la amenaza del cambio climático, estipulando el principal objetivo en este rubro: mantener el aumento de la temperatura muy por debajo de los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, teniendo como máxima prioridad limitarlo a 1.5 °C, disminuyendo la emisión de gases efecto invernadero (GEI) [4, 5].

Algunos países de la Unión Europea han tomado acción que reafirma el compromiso con estos acuerdos, como ejemplo España cuenta con un Inventario Nacional de los GEI y dentro de él se toma en cuenta los siguientes gases: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6) [6]. A través de estos indicadores anuales se plantean metas de reducción de emisiones de GEI para el años siguientes.

El transporte es un servicio primordial dentro de las grandes ciudades y entre ellas, en el Reino Unido fue responsable del 24 % de los GEI que se emitieron en 2020, siendo el principal emisor respecto a los demás sectores (energía, negocios, residencial, agricultura, manejo de basura, procesos industriales, públicos y uso de suelo)[7]. México, por su parte, emitió un equivalente del 25 % del total de GEI a través de este sector, con una contabilidad de 171 MtCO₂e [8].

Día con día hay un crecimiento en su uso, ya sea para trabajo, como servicio o para ocio y esparcimiento, siendo los motores de combustión interna la principal manera de poner en marcha automóviles, camiones, motocicletas, trenes, embarcaciones, aeronaves, entre otras. El Departamento de Negocios, Energía y Estrategia Industrial del Reino Unido estima la huella de emisiones de dióxido de carbono en distintos medios de transporte, dados a conocer a través de Our World Data. En la Figura 1.1 se muestra la huella de CO_2 emitidos por medios de transporte, medidos en g de CO_2 por kilometro recorrido por pasajero [9].

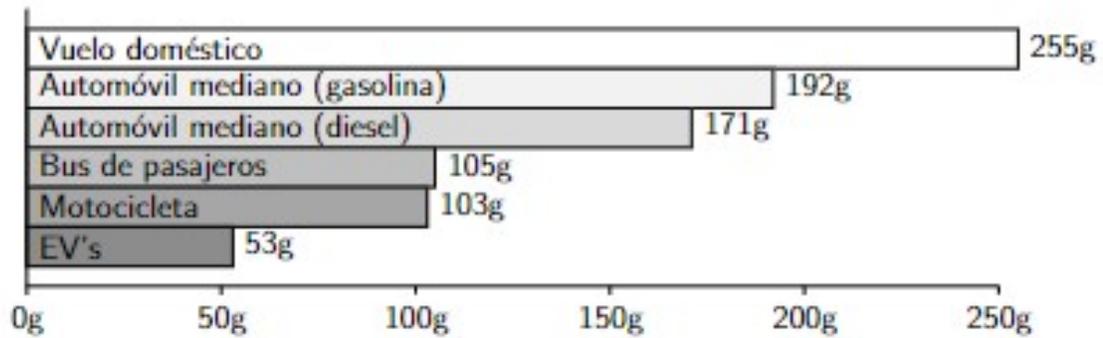


FIGURA 1.1: Huella de carbono por km recorrido por pasajero, 2019

Dentro de los gases de escape que emiten los MCI y forman parte de la problemática ambiental y de salud a los seres vivos, además de los GEI antes mencionados se encuentran: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos sin quemar (HC), óxidos nitrosos (NO_x), material particulado (MP), óxidos de sulfuro (SO_x), compuestos orgánicos volátiles (VOC). Estas emisiones forman parte del producto de la combustión y afectan principalmente las zonas urbanas y carreteras [10], compartiendo la responsabilidad de la calidad del aire junto con los sectores antes mencionados.

La calidad del aire es expresada en términos de concentración de contaminantes y es monitoreada en la entidad de Monterrey por la Secretaría del Medio Ambiente, en Europa por la Coordinated Information on the Environment in the European Community (CORINAIR) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en USA [11, 12, 13].

El uso prolongado y amenazante por parte de los combustibles fósiles hacia al medio ambiente y a la salud de los seres vivos, el aumento en el precio y las prospecciones de agotamiento a corto plazo, a contribuido al desarrollo e implementación de nuevas tecnologías energéticas capaces de satisfacer cierto porcentaje de la demanda de energía que consumen los motores de combustión interna [3, 5, 14]. Sin embargo, hasta ahora esos porcentajes siguen siendo mínimos, además de contar con una electrificación base carbono en la mayoría del mundo, los vehículos híbridos y eléctricos solo trasladan el impacto de sus emisiones de tubo de escape a otro lugar [15]. En

2017 la energía demandada por transportes con base en combustibles fósiles tuvo un promedio diario de 105 TWh, si se compara con la generación anual de energía solar y eólica (total de 1,292 TWh en la suma de ambas), siendo así que en solo 13 días la energía demandada por transporte con motores de combustión interna rebasa el total de la producción de energía solar y eólica anual [15]. Debido a este desequilibrio entre la generación eléctrica por fuentes renovables y generación por combustibles fósiles aún no es factible el uso de automóviles eléctricos.

La emisión de material particulado a sido objeto de estudio en los últimos años al estar ligada con enfermedades que empeoran la calidad de vida en los seres humanos, desde alergías hasta tumores precursores de cáncer, alzheimer y enfermedades en el embarazo [10], y afectando la visibilidad en las urbes. Por estas razones es de gran importancia conocer los valores y alcances del impacto de estas emisiones por los MCI para mejorar el aprovechamiento de los combustibles en relación de potencia entregada y la disminución de las emisiones generadas.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Los MCI son utilizados día a día en su principal aplicación como medio de transporte, el cual facilita la movilidad entre los seres humanos y logra mayores desplazamientos en una menor cantidad de tiempo, minimizando el desgaste físico y modificando la ingesta calórica en el cuerpo del ser humano. Esto se ve reflejado en la relación entre el incremento de obesidad y promedio del índice de masa corporal con el uso de automóviles y a la disminución de actividad física, lo cual es observado con mayor consistencia en países donde existen subsidios a combustibles, disminuyendo los costos de estos [16]. Las dos principales variantes que se utilizan son: el motor de encendido provocado (MEP) alimentado por gasolina y el motor de encendido por compresión (MEC) alimentado por diésel, bajo el mismo principio en ambos, generar energía mecánica por medio de la transformación de energía térmica [17].

La Unión Europea, incluyendo Reino Unido, llamó a la descarbonización de la movilidad para el año 2035 [18, 19]. A pesar de esto, la cantidad de automóviles registrados en el año 2020 con motores de tipos: eléctrico con baterías (BEV), híbrido eléctrico con plug-in (PHEV) e híbrido eléctrico (HEV) fue de 4.8 %, 4.3 % y 4.1 % respectivamente, frente a los automóviles con MCI: 45 % base gasolina y 39.3 % base diésel, de un total de 11.7 millones de unidades [19]. En México, el parque vehicular de tipo BEV y HEV cuenta con 25 mil unidades registradas al año 2020, en comparación con 34 millones de vehículos con MCI [20].

A principios de los años 80 la alerta por la cantidad de emisiones contaminantes producto de los gases de escape trajo consigo una ola de estudios a los MCI y combustibles en pro de mejorar la eficiencia térmica y energética. A partir de esta premisa se generaron políticas y regulaciones en torno a ellos, con la finalidad de corregir la calidad de aire que en mezcla con los gases de escape afectan las principales zonas urbanas de las metrópolis y las carreteras que las comunican. En México las normas referentes a la emisión de gases por MCI y las regulaciones a los combustibles han quedado rezagadas en comparación con otros países y regiones, como Europa y Estados Unidos [21, 22, 23].

El determinar los tipos y cantidades de emisiones que generan las gasolinas mexicanas es de amplio interés, desde ámbitos de salud y contaminación, hasta económicos y de distribución, por esta razón este trabajo de investigación se toma la particularidad en el estudio de la concentración de emisiones de número de nanopartículas emitidas por un motor de investigación tipo CFR F1/F2 de encendido provocado, en combustión de la gasolina magna, cuyo uso es amplio entre los automotores mexicanos, comparado con gasolina premium, butanol, metanol y mezclas binarias de gasolina oxigenada a distintas proporciones.

A partir de estudios orientados a esta directriz puede reformularse las gasolinas para crear una relación con óptima entrega de energía y disminución de emisiones contaminantes. Las investigaciones pueden tener como variantes la temperatura del

aire de admisión (T_{adm}) y las relaciones de compresión de la cámara de combustión, con fin de determinar los efectos de los parámetros de operación del motor. El resultado de estas investigaciones podrá enriquecer las normativas actuales en México referentes a calidad de los combustibles y cantidad de emisiones por MCI permitidas. Al dividirse por tipo de motor y vehículo facilitarán la toma de mediciones en prácticas reales, además de regular los rangos para cada segmento. La finalidad de mejorar las normativas será reflejada en la mejora de calidad del aire y la calidad de vida de los seres vivos, disminuyendo la exposición a material particulado y enfermedades que traen consigo, además de ahorrar el gasto público destinado a las enfermedades originadas por la exposición a contaminantes producto de MCI.

1.3 ANTECEDENTES

En búsqueda de una mejor calidad de aire y la salud pública, se firmó el compromiso para la reducción de emisiones contaminantes producto de los gases de escape de los vehículos ligeros y pesados, durante la Cumbre de Líderes de América del Norte en la que participaron los presidentes de México y USA así como el primer ministro de Canadá, en el año 2016 y con metas para el 2018. Estos objetivos habrían de ser alcanzados tras un ajuste a las NOM-016, NOM-042 y la NOM-044 [24].

1.3.1 DAÑO A LA SALUD POR LA EMISIÓN DE NANOPARTÍCULAS

La asociación de enfermedades ligadas al sistema respiratorio con la contaminación del aire por partículas finas con diámetros aerodinámicos $\leq 2.5\mu m$ es mayor en comparación con los daños originados por partículas con diámetros aerodinámicos $\leq 10\mu m$ debido a que pueden viajar mas lejos en el sistema respiratorio y depositarse en los alvéolos pulmonares de humanos y animales [25, 26]. A través de un estudio realizado por Dockery et al. 1993, en distintas ciudades de USA (Portage, Wisconsin;

Topeka, Kansas; Watertown, Massachusetts; St. Louis, Missouri; Harriman, Tennessee; y Steubenville, Ohio), se determinó que la mortalidad es fuertemente asociada a partículas finas y sulfatadas en un grado mayor que a la concentración de material particulado total, al dióxido de sulfuro y dióxido de nitrógeno. Estas ciudades fueron elegidas por los rangos de contaminación del aire por material particulado y representan un riesgo relativo contra la salud, relacionando el cáncer de pulmón directamente al material particulado producto de la combustión de medios de transporte y el producto secundario que forma la mezcla de emisiones entre ellos [27].

Un estudio realizado por el Panel Independiente de Revisión en Materia Particulada hace mención de las poblaciones con enfermedades preexistentes (diabetes, obesidad, enfermedades pulmonares y cardiovasculares) expuestas a material particulado tienden a empeorar su calidad de vida, al igual que las poblaciones en circunstancias desfavorables. Ambas poblaciones representan un porcentaje amplio en USA. El riesgo aumenta aún más si estas poblaciones se encuentran cerca de fuentes de emisión de material particulado. Este panel propone mejorar los estándares anuales de concentración, reducirlos a una relación entre 8 y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A la vez, hace mención sobre el estándar de $PM_{2.5}$ no es el adecuado para llevar a cabo los estudios de protección a la salud pública [28].

La Agencia de Protección Ambiental en USA tras la evaluación de políticas referentes a los estándares de calidad del aire y materia particulada publicada en enero del 2020, concluyó que las exposiciones de períodos largos a $PM_{2.5}$ están ligados directamente a causas específicas de mortalidad, al cáncer de pulmón, morbilidades respiratorias y cardiovasculares, así como a efectos negativos en el sistema nervioso. También relaciona la exposición con: disfunción endotelial, alteración de la función cardíaca, depresión del segmento ST, trombosis, anomalías de la conducción y aumento de la presión arterial [29]. Las muertes estimadas para el año 2015 relacionadas con exposiciones de largo período a $PM_{2.5}$ tuvo un rango entre 13,500 a 52,100, dependiendo el ajuste hecho en las mediciones de la calidad del aire [29].

La Organización Mundial de la Salud hace un exhorto a nuevos valores de concentración de $PM_{2.5}$ en el aire a partir del 2021, disminuyendo los del 2005. Los nuevos estándares serían: promedio anual disminución de 10 a $5 \mu g/m^3$ y disminución 25 a $15 \mu g/m^3$ para medias de 24hr [30].

Calderón-Garcidueñas y Ayala, 2022 [31], hace referencia a medidas más específicas que las antes mencionadas, con valores de diámetros aerodinámicos de $\leq 100nm$ para Partículas Ultra Finas (UPF) y $\leq 50nm$ para NanoPartículas (NP) ambas capaces de cruzar barreras biológicas de humanos y animales, resultando en problemas de Alzheimer e importantes cambios cognitivos anormales presentes en niños con 11 meses de edad.

Las vías respiratorias, gastrointestinales y dérmicas son los principales portales de acceso de las UPF y NP al cuerpo, como se observa en la Figura 1.2, alcanzando tejidos y órganos, depositándose en el cerebro o viajando mediante la circulación de la sangre dañando las barreras biológicas. El ingreso de UPF y NP en el cuerpo produce una gran variedad en rangos de toxicidad, dependiendo de la composición el tamaño de las mismas [32, 33].



FIGURA 1.2: Vías de ingreso de UPF y NP al cuerpo humano. Autor desconocido.

21.8 millones de personas habitan la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMM), expuestos a una calidad del aire con concentraciones por arriba de los $12 \mu g/m^3$ y diámetros aerodinámicos de PM entre 10 y 400 nm, registrados durante

las últimas 2 décadas, con picos altos durante la hora del tráfico por la mañana [34]. La exposición a esta mala calidad del aire de la ZVM tiene una relación directa con el deterioro cognitivo temprano en niños pequeños, específicamente de las funciones del lóbulo parietal y temporal y la presencia de hiperintensidades de la sustancia blanca en la resonancia magnética del cerebro [35]. Además, el proceso neurodegenerativo muestra principios de Alzheimer en niños, jóvenes y jóvenes adultos [36].

Pacitto et al. 2021[37], determinó que en países con ingresos medios y bajos las exposiciones a contaminación escalan a un grado mayor, con mala calidad de aire libre debido al transporte e industria sin regulación, en función a las condiciones socioeconómicas y el clima específico de la región. Por lo tanto las morbilidades ligadas a esto también son mayores en comparación con países de PIB alto.

Un estudio realizado con datos al 2010, por Lelieveld et al. 2015 [38], analiza las muertes asociadas a las partículas a escala global, destacando el Oeste del Pacífico, el Este del Mediterráneo y el Suereste de Asia, como las principales regiones con mayor incidencia en muertes ligadas a este fenómeno, siendo China el principal país. Dicho estudio considera una población mundial de 6.8 mil millones de personas al 2010, de los cuales 5 de cada 10,000 mueren al año por causas relacionadas a la contaminación del aire, distingüiendo las principales causas: 2 por enfermedades cardiovasculares, 1.6 por enfermedad isquemia miocárdica, 0.8 por enfermedades crónicas de obstrucción a pulmones, 0.35 enfermedades agudas de vías respiratorias bajas y 0.25 por cáncer de pulmón. Allí se hace mención sobre las distintas toxicidades por partículas dependiendo la fuente de emisión y las especies que conforman el combustible y en conclusión destacan una toxicidad 5 veces mayor por partículas de tipo carbonáceo que por tipo inorgánico (material incrustado, nitratos y sulfatos).

La concentración del número de partículas (PNC) y la fracción exhalada de óxidos nítricos (FE_{NO}) están directamente relacionadas, caso contrario con referencia a la masa de materia particulada. La (FE_{NO}) es un indicador de vías respiratorias inflamadas. Esto lo demuestra Strack et al. 2012 [39], a través del estudio de la expo-

sición de jóvenes voluntarios con buena salud en ambientes con presencia de material particulado a distintas cantidades, durante 2 horas, en 5 locaciones diferentes.

Sonwani et al. 2021 [40], concluyó que la exposición a nanopartículas es responsable de la sobreproducción de Especies de Oxígeno Reactivo (ROS) en el cuerpo humano, estimulando el estrés oxidativo, lo que provoca la creación de citotoxinas, resultando en genotoxicidad y tumorigénesis. Estas reacciones biológicas causadas por las NP ocasionan daños severos en el ADN monocatenario y bicatenario originando mutaciones en el material genético.

Hesterbert et al. 2010 [41], puntualiza que los esfuerzos por determinar daños a la salud por exposición a NP han sido benéficos para conocer niveles en tipos de NP particulares. Por esta razón, reducir la emisión e inhalación de estas para cuidar la salud de la población reflejaría una disminución de mortalidad y morbilidad, así como ahorros en tratamientos contra las principales enfermedades asociadas a ellas.

1.3.2 LEGISLACIÓN EN MATERIA DE EMISIONES DE NANOPARTÍCULAS

El crecimiento de la población junto al acelerado progreso de tecnología requieren de legislaciones competentes, con trasfondos científicos que logren la igualdad y equidad [42]. En México, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos es la máxima carta de poder ante los ciudadanos mexicanos y extranjeros que estén dentro de los límites del suelo y aguas mexicanas [43]; además de esta, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) tienen como objetivo establecer las especificaciones en procesos que puedan ser riesgosas ante la salud humana y hacer cumplir tecnologías y aplicaciones a dichos servicios, escritas y publicadas ante el Diario Oficial de la Federación (DOF) por las secretarías competentes en el tema. [44].

A través del artículo 117 de la Ley General de Salud en México, se designa

a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) sobre el marco correspondiente al saneamiento ambiental y emisiones contaminantes [45]. La SEMARNAT a expedido NOMs con límites máximos permisibles de emisiones contaminantes por fuentes móviles y características del equipo, y el procedimiento de medición para la verificación de los límites de emisión de contaminantes [46], entre las que destacan: la NOM-041-SEMARNAT-2015, NOM-042-SEMARNAT-2003 y la NOM-044-SEMARNAT-2006, con límites de contaminantes por automotores a gasolina y diésel respectivamente.

Para la legislación sobre la calidad de los petrolíferos comercializados en México, la NOM-016-CRE-2016 considera propiedades físico químicas dependiendo el tipo de combustible, la región y temporada donde se comercializará [47], esta norma fue designada a la Comisión Reguladora de Energía en el año 2016.

Así como en México, a nivel mundial existen regulaciones, normas y estándares para limitar y medir la cantidad de emisiones contaminantes. En las distintas regiones del mundo llevan por nombre: Euro 6 para la Unión Europea, Tier 3 para los Estados Unidos y para California LEV III, en Japón la ley de NO_x , Brasil cumple a través de PROCONVE L7, China designa sus estándares como CN6a e India como BS VI, en Korea del Sur K-LEV III, en otras regiones del mundo como: Argentina, Australia, Canadá, Chile, Islandia, Indonesia, México, Nueva Zelanda, Filipinas, Rusia, Arabia Saudita, Sudáfrica, Suiza, Tailandia, Turkia y Ucrania, utilizan combinaciones de las antes mencionadas [23, 48]. Las regiones con PIB alto han reducido el nivel de emisiones permisibles en comparación con décadas anteriores, con base a las normativas generadas, siendo las Euro, LIEV y TIER, las que encabezan la exigencia por disminuirlas.

Las exigencias por parte de las agencias y comisiones reguladoras han modificado el proceso de desarrollo y manufactura de los automotores [48, 49, 50], influenciando positivamente en la calidad del aire, vida humana y desarrollo de actividades sociales, aunque hay países que se resisten a no adoptar estas regulaciones debido al

impacto económico que podría generar ante el parque vehicular en circulación y los procesos de manufactura de nuevos automotores [51]. Para tener un mejor control de estas emisiones y cumplir con los límites de la Euro 6, algunos vehículos Diesel portan sistemas de medidas de emisiones (PEMS) y los vehículos de gobierno portan sistemas inteligentes de medidas de emisiones (SEMS) [48, 49, 50].

Los nuevos estándares en la Unión Europea (UE) para combustibles de referencia permiten máximos de 10 mg/kg de sulfuro en gasolinas adicionadas con etanol al 5 y 10 %, mientras que para el diésel permite mezclas con biodiésel al 5 y 7 %. En USA, las gasolinas puras permiten promedios 15 mg/kg con máximos de 80 mg/kg, en cambio las gasolinas con mezcla de 10 % de etanol solo 8 mg/kg en promedio y máximo 11 mg/kg, con referencia al diésel el promedio es de 7 y el máximo de 15ppm [21, 22, 23]. México tras la NOM-016-CRE-2016 permite relaciones de azufre entre 30 mg/kg promedio y máximos de 80 mg/kg en gasolinas, mientras que el diésel tiene máximos de 30 mg/kg en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) y Zona Fronteriza Norte (ZFN) y 500 mg/kg en el resto del país [47].

La cobertura que abarcan en emisiones contaminantes es dirigida principalmente a gases como los NO_x y el CO_2 , abarcando también hidrocarburos sin quemar (HC) y en algunos casos el material particulado (PM) cuantificado en masa. Los estándares para limitar la concentración del número de partículas $>23\text{nm}$ son muy pocos, siendo solo las normas EURO, las CN6a y las BS VI, las que requieren cumplir con estas restricciones [23]. El parámetro mas cercano a la medicion de emisiones por partículas es el PM, sin embargo, los métodos de prueba de esta limitante tienden a fallar en condiciones de bajos niveles debido a cuestiones de sensibilidad en los opacímetros. Al medir masa y no tamaño o cantidad, esta restricción queda corta para las emisiones reales de nanopartículas, las cuales son más dañinas para la salud [52]. En la Tabla 1.1 se puede observar las normativas europeas que regulan la emisión del número de partículas (PN).

TABLA 1.1: Legislaciones Europeas con límites de PN

Categoría de vehículo	Tipo de MCI	Estándar	Introducción	Límite de PN
Automóviles	Diesel ligero	Euro 5b	2011	$6x10^{11}$ PN/km
		Euro 6a	2014	$6x10^{11}$ PN/km
	GDI	Euro 6b	2011	$6x10^{12}$ PN/km
		Euro 6c	2017	$6x10^{11}$ PN/km
Camiones	Diesel pesado	EURO VI (WHTC)	2013	$8x10^{11}$ PN/km
		EURO VI (WHSC)	2013	$6x10^{11}$ PN/km

Como complemento de las normativas el sistema de Diagnóstico a Bordo (OBD) fue desarrollado para monitorear el funcionamiento de sensores que acompañan al motor, la combustión que se genera tras la relación aire combustible, las temperaturas y presiones de fluidos de trabajo. El desarrollo de este sistema a demostrado ser de utilidad para el usuario del automotor detectando fallas que se reflejan a través de la consola tras encender una luz amarilla que indica la revisión del motor y los sensores [21, 22, 23, 48]. Para verificar el correcto funcionamiento de los sistemas, Burtscher, Lutz y Mayer 2019 [53], proponen Nuevas Inspecciones Técnicas por Períodos (PTI).

1.3.3 EMISIÓN DE NANOPARTÍCULAS POR MCI

Lo comentado en la sección 1.3.1 con referencia a los efectos perjudiciales de las nanopartículas en la salud, distintos organismos de investigación han trabajado en pro de estimar las cantidades de NP emitidas por distintas fuentes móviles y así implementar mejoras en las legislaciones que las regulan, como se discutió en la sección 1.3.2. En la presente sección, se describen algunos resultados de investigaciones hechas para evaluar las tasas de emisión de NP por automotores con combustibles puros y mezclas.

Los procesos de combustión juegan un rol importante en la economía y a la

vez son el principal contaminante a nivel mundial [54]. Las emisiones de NP por un motor alimentado con diésel fueron reportadas por Burtscher, Künzel y Hüglin 1998 [55], con promedios de 60nm a temperatura ambiente. Además, obtuvieron como resultado que si la fracción de carbón primario aumenta en tamaño, entonces la fracción de volátiles disminuye considerablemente. Mientras que Ristovski et al. 1998, reportó las NP emitidas por un motor de encendido provocado base gasolina ronda entre 20 y 40nm [56], con volátiles que se vaporizan arriba de los 300°C.

En un estudio por parte de IFP Energy Nouvelles [57], donde un automóvil Euro 5 con acceso a la computadora del automóvil (ECU), con base gasolina y 1.6l de cilindrada e inyección directa, fue utilizado para experimentar los tipos de ciclos de manejo NEDC, WLTC, Artemis, Motorway y Urban para comparar las emisiones de NP generadas, siendo el ciclo Urban el que más emitió, rompiendo los límites de la Euro 6a, mientras que los otros 4 ciclos solo rompieron los valores de la Euro 6b en cuanto a número de NP por km recorrido. El análisis químico de esta prueba arrojó que el contenido de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH) es similar en cuanto a la Fracción Orgánica Soluble (SOF). La apertura de la ECU permitió observar que parámetros de inyección (tiempo y presión) son determinantes para la concentración del número de NP. Las condiciones del motor con operación en frío muestran un mayor número de emisión de NP en comparación a la operación en temperaturas elevadas.

El Departamento de Ingeniería Mecánica, de la Universidad de Minnessota, concluyó tras una síntesis de estudios que los motores de encendido por compresión (MEC) tienden a una emisión de masa de partículas entre 10 y 100 veces mayor a los MEP y su composición consiste en un aglomerado de carbono sólido y cenizas, compuestos sulfúricos y compuestos orgánicos volátiles. Además, las cantidades de estos dependen del tipo de combustible y cantidad de azufre, el tipo de aceite lubricante, la carga del vehículo y condiciones de operación. Los SOF aparecen en mayores cantidades cuando el motor circula a bajas cargas y temperaturas bajas [58].

Por medio de un estudio experimental realizado por Arsie, Di Iorio y Vaccaro 2011, se concluyó que la formación de NP esta asociada a la relación aire combustible (AFR). Esto fue determinado a través de experimentos midiendo concentraciones y masa de NP en un motor con inyección al puerto (PFI) y mezclas entre 13.1 y 15.8 de AFR. Siendo las mezclas pobres las que menor emisión generan debido a una mayor cantidad de oxígeno presente, mientras que las estequiométricas y ricas tienen valores muy similares, excepto en altas revoluciones por minuto (RPM), donde las mezclas ricas aumentan su emisión al haber una menor quema del combustible [59].

Dos motores de investigación, un MEP y un MEC, con el mismo volumen de desplazamiento (0.5L) fueron puestos en marcha por Lee et al. 2009, con la finalidad de comparar las emisiones de cada uno. En el estudio se utilizó gasolina (G100) y mezcla de gasolina con etanol al 10 % (E10) para el MEP. Para el MEC utilizaron diésel de ultra bajo sulfuro (USLD) y biodiésel al 100 % (BD100). El resultado de la comparación en NP arrojó una cantidad 100 veces mayor para el MEC sobre del MEP, ya sea con G100 y E10 o USLD y BD100. Además, los resultados particulares para el MEP demuestran una concentración mayor y mayores tamaños para los motores con inyección directa (DI) que para los PFI (inyección al puerto). Adicionalmente, si el modo PFI se combina con un E85 las emisiones de NP bajan aun más. Para el MEC, los resultados particulares demuestran una disminución si el USLD es reemplazado por el BD100 [60].

Yang et al. en 2019 [61], por medio de un experimento realizado en 5 automóviles MEP GDI equipados con catalizador de 3 vías, bajo cumplimiento de las TIER 3 y su equivalente LEV III, fue analizó el comportamiento de las emisiones de partículas utilizando 8 combustibles con distintos porcentajes de gasolina, etanol y aromáticos en la mezcla, utilizando el ciclo LA 92. A través de los resultados de estas pruebas, se concluyó que las mezclas con cantidades del 30 % de aromáticos respecto a las de 20 %, emiten nanopartículas con promedios de 36 % más. Esto se debe a los altos puntos de ebullición y su composición química de enlaces dobles. A su vez las mezclas con cantidades del 30 % de etanol arrojaron resultados similares,

con mayores cantidades de emisiones para masa de partículas y número de partículas a comparación con las mezclas con 20 %, 15 % y 0 % de etanol presente. Esto se debe a su alto valor de entalpía de vaporización, lo que genera la necesidad de una mayor cantidad de energía para vaporizar la mezcla. Además estas condiciones crean una película en las paredes de la cámara de combustión, donde las gotas de la mezcla favorecen a elevar el número de carbón y hollín.

En China, las políticas en contra de las emisiones son de mayor importancia en ciudades grandes como Beijing debido al alto índice de contaminación y el impacto de los automotores. Mediante un motor turbocargado de inyección directa con certificación de la regulación China Phase 4, Yinhui et al. 2019 [62], evaluó el impacto de las gasolinas chinas en la emisión de partículas. 6 gasolinas fueron investigadas con una referencia de 93 en el número de octano de investigación (RON). Las cuales fueron segmentadas como 1 gasolina pura y 5 mezclas con el 80 % de volumen de gasolina. Como resultado se observó el aumento de número de partículas al aumentar la carga del motor. Por otro lado, las mezclas con porcentajes altos de aromáticos contenidos impactan significativamente el aumento de emisión de partículas, las mezclas con etanol al 10 % aumentan la emisión de partículas en el motor mientras se encuentra en cargas livianas, al contrario que las mezclas con olefinas que incrementan su producción al incrementar el grado de carga.

Con la premisa de investigar los efectos de la relación aire combustible (AFR), el tiempo en avance de ignición, y el sistema de recirculación de gases (EGR), el Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Salerno puso en marcha el proyecto, dirigido por Arsie, Di Loro y Vaccaro 2013 [63]. Mediante un banco de prueba con un MEP 4 cilindros e inyección al puerto equipado con un catalizador de 3 vías (TWC) y sistema de EGR, alimentado por gasolina comercial y 94 octanos en RON. Las mediciones fueron realizadas a velocidades de motor bajas (1,500 RPM), medias (2,000 RPM) y altas (3,000 RPM). Los resultados arrojaron que para las 3 velocidades la distribución de los tamaños de partículas fueron centradas en 30nm y un pico máximo en tamaño de 40nm. Por otro lado, en los resultados de

velocidades bajas y medias variando el λ , entre 0.9, 1 y 1.1, se observa una similitud en la distribución y concentración de partículas entre los λ con mezcla rica y estequiométrica, mientras que la mezcla pobre disminuye en ambos aspectos, lo cual es relacionado directamente a una mayor cantidad de oxígeno en la mezcla para oxidar los hidrocarburos. Los cambios en tiempo de ignición para 1,500 RPM fueron de 10, 16.7 y 21.5 grados antes del punto muerto superior (BTDC), y para 2,000 RPM de 7, 22.6 y 31.5 BTDC, con valores referencia de 16.7 y 22.6 respectivamente, mientras el ángulo de ignición es retrasado, para la velocidad baja el número de partículas disminuye significativamente, y en revoluciones medias se observó un pequeño incremento. El análisis del EGR solo se llevó a cabo con el 20 % de apertura a velocidades de 1,400 RPM y se determinó que la reintroducción de gases de escape al cilindro aumentan la cantidad de partículas emitidas por la pérdida de oxígeno y menor temperatura de flama.

Ristovski et al. 1998 [56], lideró en la Universidad de Tecnología en Queensland el análisis de nanopartículas tras un experimento que incluía 5 automóviles Falcon, 5 Commodore, 2 taxis Falcon y 1 antiguo Falcon de trabajo. En el estudio se utilizó gasolina comercial para los 10 primeros autos equipados con catalizador, gas licuado de petróleo (LPG) en ambos taxis, y gasolina con plomo para el Falcon antiguo. Con respecto a la concentración del número de nanopartículas se concluyó que la gasolina comercial emite menor cantidad que el LPG y hasta 200 veces menos que la gasolina con plomo, además, el conteo del diámetro medio para las gasolinas fue similar, con picos de 50nm, en cambio, el LPG obtuvo picos de 79nm.

El uso de automóviles con inyección al puerto en multipunto (MPI) tiene costos de producción bajos y una ingeniería mas sencilla, por esta razón será una tecnología con presencia durante varios años mas en el mercado de ciertos países. Por ello, en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Biel-Bienne, Czerwinski et al. 2019 [64], examinó las emisiones de partículas en 4 automóviles distintos y se adaptaron 2 filtros de partículas para motores de gasolina (GPF), uno posicionado aguas abajo del catalizador de tres vías (descubierto) y otro en manera de catalizador de 4 vías (cu-

bierto). Utilizando gasolina comercial con RON 95, se descubrieron concentraciones de partículas en cantidades similares con los vehículos diésel sin filtro de partículas (DPF). Ambos GPF redujeron el número de partículas emitidas con concentraciones en menor grado que el límite permitido por la Euro 6b. Los resultados de emisiones para el GPF recubierto reducían considerablemente cuando se añadía un catalizador de 3 vías justo antes, en cambio, el GPF sin recubrimiento demostró no añadir peso ni contrapresión tras andar 4,100 km. Otra investigación similar hecha por los autores en 2017 [65], determinó que el rango de número de partículas emitidas en automóviles con inyección directa (DI) disminuye hasta un 99 % con el uso de GPF en buen estado, sin embargo, las nanopartículas con diámetros aerodinámicos mas chicos no son atrapadas por el filtro, por lo tanto, la eficiencia del filtro debe mejorarse, mejorando la salud de los habitantes de una zonas altamente contaminadas.

CP Leach et al. 2018 [66], realizó la comparación de gasolina con 3 mezclas de combustibles oxigenados para conocer la relevancia del porcentaje de alcohol relacionada a la emisión de partículas. Se experimentó con una gasolina base con 5 % de etanol, una gasolina con mezcla del 20 % de etanol (E20), otra adicionada con 85 % de etanol presente en la mezcla (E85), así como una mezcla entre gasolina, etanol y metanol (GEM). Los resultados que obtuvieron para la E20 fueron de mayor emisión en referencia a la gasolina base en cualquier velocidad de motor y carga, debido al alto valor de calor latente que tiene el etanol lo que hace un efecto de enfriamiento en la cámara de combustión y tarda mas en evaporar la mezcla. La mezcla E85 demostró una menor cantidad de partículas emitidas en todas las pruebas, el factor principal son sus cadenas doble enlace que reducen la tendencia a formar hollín tras la combustión. La mezcla GEM mostró comportamientos muy distintos a la mezcla E85, siendo el mayor emisor de todos los combustibles estudiados, y al tener el mismo valor de AFR que el E85, el autor hace mención sobre las consideraciones a tomar en cuenta en caso que sea un combustible de reemplazo para E85.

Köhler 2013 [67], en la búsqueda de tecnologías que disminuyan la emisión de NP, llevó a cabo la examinación de 3 distintos vehículos en un dinamómetro de

prueba (un Ford, un Hyundai y un Renault). Tras una serie de condiciones y bajo los ciclos Nuevo Ciclo de Manejo Europeo (NECD), Ciclo de Prueba de Vehículos Ligeros Armonizados a Nivel Mundial (WLTC) y el Procedimiento Suplementario de Prueba Federal US06 (SFTP) determinó que cumplían con los límites de la Euro 6b para emisiones de nanopartículas con cantidades menores a 6×10^{12} . Sin embargo estos resultados no cumplían con la Euro 6c, sobrepasando el límite de 6×10^{11} . Posterior a esto, se llevaron a cabo pruebas solamente en el ciclo SFTP US06 con el fin de observar la cantidad de emisiones de los mismos autos con un GPF acoplado en la tubería de escape. La implementación del filtro causó un efecto positivo para la disminución de NP. Con promedios de 2.1×10^{10} , 7.34×10^{10} y 2.47×10^9 para Ford, Hyundai y Renault respectivamente, destacando resultados de menor emisión a los límites de la Euro 6c. Concluyó que el uso de GPF en motores de gasolina es la solución mas rápida y viable, al menos temporalmente.

El uso de biocombustibles en Europa y USA a sido ampliamente utilizado en las últimas décadas, desarrollando tecnologías en motores tipo Flex Fuel para un volumen mayor de bioetanol en la mezcla, lo que permite alcanzar hasta un 85% en gasolinas (E85). Por medio de un experimento Yang et al. 2018 [68], utilizó mezclas con diferentes porcentajes de etanol, dos E10 con distintos niveles de hidrocarburos aromáticos, un E30 y un E78. Los resultados obtenidos fueron bajas concentraciones de número de partículas, CO y NO_x al aumentar el porcentaje de etanol en la mezcla, mientras que el CO_2 y el CH_4 reflejaron una mayor concentración en E78. La comparación entre ambas mezclas E10 demostró mayor concentración en emisiones de nanopartículas para la mezcla con mayor porcentaje de hidrocarburos aromáticos.

Mohsin Raza et al. 2018 [69], concluyó que los principios de preparación de la mezcla de aire y combustible dentro de la cámara de combustión antes del fenómeno de combustión es un factor que determina la formación de nanopartículas, de tal forma que las mezclas homogéneas tienden a emitir una menor cantidad de NP. En los motores con DI se crea una película de combustible en la pared de la cámara de combustión que incrementa la formación y emisión de NP en comparación con

los motores PFI, especialmente cuando los combustibles que se utilizan tienen altos valores de entalpía de vaporización. Para aménorar este efecto se crean estrategias de inyección e ignición. La relación aire combustible afecta directamente la formación y emisión de NP, siendo las mezclas estequiométricas y ricas las que producen una mayor cantidad, mientras que los motores con aspiración turboalimentada muestran una disminución en la emisión de NP. Los combustibles con anillos de aromáticos tienden al aumento en la formación de NP, por lo tanto, una mayor cantidad de aromáticos presentes en el combustible serán indicadores para una mayor cantidad de NP emitidas, mientras que los combustibles con alto porcentaje de alcohol en la mezcla tienden a disminuirlas.

Los combustibles alternos como el bio-etanol, bio-diésel (BD) y gas natural (CNG) reducen considerablemente la emisión del número de NP debido a las características principales del contenido oxígeno y baja concentración de combustible base carbono. Disminuyendo hasta un 37% cuando se utiliza E85 en lugar de gasolina, y un 22% al mezclar BD con diésel en partes iguales, según Myung et al. 2019 [70]. Además observó la disminución de emisiones por NP en concentración de masa y concentración en número cuando los vehículos diésel utilizan DPF. Los resultados fueron obtenidos a través de un estudio realizado en vehículos alimentados por gasolina, E85, ULDS, BD50, CNG y gas licuado de petróleo (LPG) bajo el ciclo Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (NEDC) y se observó que en operación de carga estable los niveles de emisión se mantienen, y ocurría lo contrario cuando el motor operaba en distintos regímenes de carga donde los índices de emisión varían respecto a la carga.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible demostrar que existe una relación proporcional entre la concentración del número de nanopartículas emitidas durante el proceso de combustión y el aumento en la relación de compresión de un motor de encendido provocado, que dicha relación es independiente del tipo de combustible, pero que si existe un efecto de disminución de la concentración al incrementar la proporción volumétrica de alcoholes en la mezcla. Adicionalmente la formación de nanopartículas se ve afectada por los parámetros de operación del motor.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 GENERAL

Analizar experimentalmente la concentración del número de nanopartículas presentes en los gases de escape producto del proceso de combustión de combustibles puros y mezclas oxigenadas en un motor CFR de relación de compresión variable, para determinar el impacto de las condiciones de operación y la proporción de alcohol en la mezcla.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.- Comprender el concepto de nanopartículas en las emisiones de un MEP para establecer sus características de formación, a través de revisión de literatura especializada.

2.- Ampliar las capacidades técnicas del motor CFR F1/F2, a través de la implementación de un analizador de nanopartículas TSI 3795, para cuantificar la

formación de nanopartículas en el proceso de combustión de un MEP.

3.- Desarrollar una matriz de ensayos experimental para caracterizar la formación de nanopartículas en el proceso de combustión MEP en mezclas de gasolina, etanol, metanol y butanol.

4.- Realizar pruebas experimentales en el motor CFR F1/F2 para obtener resultados de la formación de nanopartículas a través del analizador de nanopartículas TSI 3795, utilizando combustibles puros gasolina, metanol, butanol, y mezclas binarias de gasolina-alcohol.

5.- Analizar los resultados de formación de nanopartículas obtenidos en el proceso de combustión MEP utilizando mezclas de combustibles oxigenados para caracterizar el efecto de la mezcla en la concentración de nanopartículas emitidas.

6.- Generar recomendaciones para la implementación de NOM que permitan regular la cantidad de nanopartículas emitidas en los automotores dentro de la República Mexicana.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Los motores de combustión interna (MCI) han sido diseñados para transformar energía térmica en energía mecánica. La energía térmica se encuentra contenida en un fluido compresible (fluido de trabajo) [17, 71]. El proceso de transformación de la energía térmica se lleva a cabo mediante el fenómeno de la combustión, a partir del fluido de trabajo y una sustancia con la capacidad de encenderlo. El principio “reacción química de combustión”, es el resultado de la oxidación de un combustible, generando calor en el proceso (reacción exotérmica), emisiones gaseosas y radicales libres como subproducto, acompañado por destellos de luz. Los principales elementos de una combustión son: combustible o carburante (materia que se oxida) y aire o comburente (materia oxidante), que al mezclarse generan la reacción bajo condiciones de temperatura (T) y presión (P), siendo necesario el fluido de trabajo y los elementos mecánicos para aprovechar la energía liberada. La finalidad principal de una combustión en un motor es utilizar el calor generado para calentar sustancia o materia y transformar en energía mecánica. Los principales motores que se utilizan para la automoción son los motores de encendido provocado (MEP) y los motores de encendido por compresión (MEC) [71, 72, 73, 74, 75].

2.1.1 CICLOS DE TRABAJO DE LOS MCI: 4 TIEMPOS

El proceso de renovación de carga (escape y admisión) define los tiempos de un MCI [17, 71, 72], ya sea en 2 o 4 tiempos.

El motor de 4 tiempos completa un ciclo de trabajo cada 2 vueltas al cigüeñal o 4 carreras al émbolo. La Figura 2.1 ilustra los 4 tiempos y se describen a continuación [17, 71, 72]:

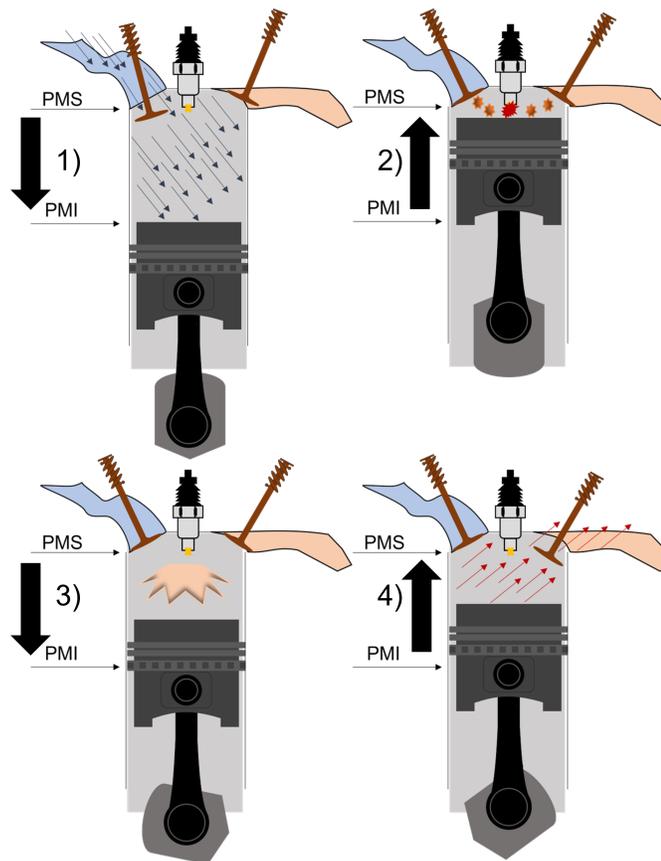


FIGURA 2.1: Fases de la combustión en motor de 4 tiempos

1. Carrera de admisión: El émbolo es desplazado del punto muerto superior (PMS) al punto muerto inferior (PMI) generando un cambio en la presión del cilindro menor a la ambiental. Esto permite el ingreso de aire o de la mezcla aire/combustible dependiendo el tipo de inyección mediante la apertura de las válvulas de admisión.

2. Carrera de compresión: El émbolo se desplaza del PMI al PMS, comprimiendo la carga del fluido dentro del cilindro, manteniendo las válvulas de admisión y escape cerradas. Antes de finalizar esta carrera se genera la descarga de la chispa o la inyección del chorro de combustible, dependiendo la configuración del motor en que se encuentre, iniciando la combustión.
3. Carrera de expansión: El émbolo se desplaza del PMS al PMI como efecto de la presión generada por la combustión de la carrera anterior. En esta etapa se obtiene trabajo mecánico. Ambas válvulas continúan cerradas.
4. Carrera de escape: El émbolo se desplaza del PMI al PMS. Este movimiento genera un desplazamiento de los gases producto de la combustión que se evacúan por medio de la apertura de la válvula de escape.

2.1.2 MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO

Los MEP usualmente utilizan mezcla de aire gasolina como fluido de trabajo para transformarla en energía mecánica. La particularidad de estos motores radica en la forma de operación. Para el encendido es necesario una descarga eléctrica externa (producto de una bujía ubicada en el cilindro) generando una chispa. En los distintos motores que hay en el mercado el ángulo de ignición es diferente, sin embargo, cumplen con la premisa de generarse antes del punto muerto superior (PMS) al final de la carrera de compresión, de esta manera la presión generada por la combustión se convierte en energía mecánica. El proceso de combustión en los MEP se desarrollan a través del avance del frente de llama, recorriendo la cámara de combustión dividiendo en 2 zonas particulares: una en donde se encuentran los gases frescos (aún sin quemar) y otra con los gases quemados (producto de una combustión reciente). El tipo de llama que se produce en el frente es turbulenta. También se les conoce como Spark Ignition (SI) y motor Otto [17, 71, 72].

2.1.2.1 MEP INYECCIÓN AL PUERTO

La inyección al puerto o PFI (port fuel injection) se caracteriza por que la mezcla aire/combustible se realiza fuera del cilindro, durante la carrera de admisión. Estos motores también son conocidos como motores de mezcla homogénea [17, 76]. La Figura 2.2 ilustra el método de inyección al puerto en MCI [76].

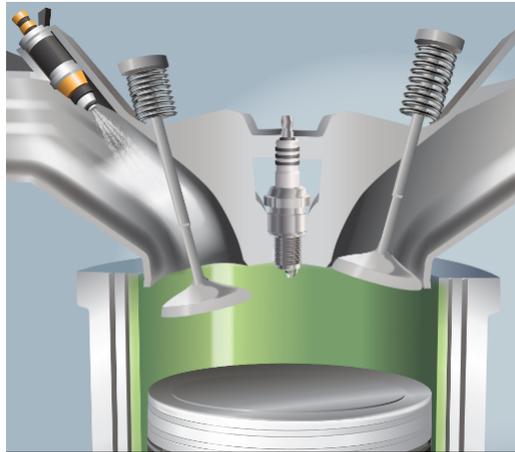


FIGURA 2.2: Inyección al puerto [76].

2.1.2.2 MEP INYECCIÓN DIRECTA

En los MEP con inyección directa se admite cierta cantidad de aire en la carrera de admisión, este aire adquiere calor que es transferido por las paredes del cilindro. La inyección del combustible se realiza en la carrera de compresión, siendo inyectada directamente en la cámara de combustión con presiones mayores en comparación al PFI. La mezcla que se genera es una mezcla heterogénea [17, 76]. La Figura 2.3 ilustra el método de inyección directa en MCI [76].

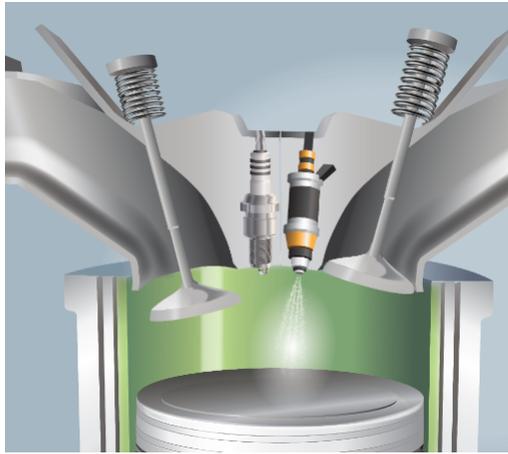


FIGURA 2.3: Inyección directa [76].

2.1.3 MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

Los MEC son alimentados principalmente con diésel. El proceso de combustión inicia con un autoencendido de la mezcla de combustible en ambientes de alta presión y alta temperatura. A diferencia de los MEP, los MEC no inician la combustión por medio de una chispa. En la carrera de admisión solo se introduce aire, el combustible es inyectado al final de la carrera de compresión, momento en el cual el aire se encuentra a temperaturas altas listo para producir el autoencendido. Al ser una mezcla heterogénea y no haber un frente de llama, las autoigniciones se producen en los lugares donde la mezcla aire/combustible son las adecuadas y cercanas al dosado estequiométrico. Conforme el chorro de combustible es inyectado se generan los distintos frentes de llama dentro de la cámara de combustión. [17, 71, 72]

2.1.4 RELACIÓN DE COMPRESIÓN EN LOS MOTORES

La relación de compresión (r_c) es la diferencia que hay entre los volúmenes máximos y mínimos dentro de la cámara de combustión, es decir, los puntos muertos superior e inferior y se define por la Ecuación (2.1).

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (2.1)$$

El numerador indica el volumen máximo, siendo la suma del volumen desplazado (V_d) del PMI al PMS y el volumen en cámara de combustión (V_c) cuando el pistón se encuentra en el PMS, y el denominador el volumen mínimo (V_c) [17, 71].

La r_c se expresa a través de 2 números indicando el número de veces que se comprime la mezcla aire/combustible. Una mayor r_c indicará un mayor rendimiento térmico del motor [17, 71].

Para los MEC las r_c deberán ser altas provocando el autoencendido, donde los combustibles utilizados se basan en el cetanaje, que es el que determina la cantidad de tiempo en que tarda para detonar. Caso contrario en los MEP, las r_c son limitadas evitando la aparición del autoencendido y los combustibles utilizados se basan en el octanaje [17, 71]. Los valores para MEC rondan entre 18:1 hasta 24:1, mientras que los MEP solo alcanzan 12:1 para vehículos comerciales [17, 71].

2.1.5 FENÓMENO DE AUTOIGNICIÓN EN MEP

La autoignición, conocida como cascabeleo, golpeteo o knock, es un fenómeno anómalo e indeseado de la combustión en un MEP, cuando su propagación alcanza niveles elevados de oscilación en la presión de cámara. Comienza al producirse una combustión fuera del frente de llama, especialmente en zonas ricas, esta reacción provoca aumentos bruscos de presión. Con base en lo anterior, el knock es un producto sin necesidad de un agente externo y libera energía de forma muy rápida, antes o después de la descarga de la bujía.

El knock ocurre por condiciones de extrema p y T generado por la compresión del cilindro y el frente de llama, principalmente cuando el número de octano del combustible es bajo. En los MEP causa daños físicos al motor y limita el rendimiento

del mismo, se caracteriza por un sonido particular de cascabeleo en el motor, bajo rendimiento del combustible y pérdida de potencia [71, 72, 77].

La autoignición se hace presente cuando las fluctuaciones de presión se extienden a lo largo de la cámara de combustión y oscilan entre rangos de 50 y 100 kPa, se relaciona con la T de autoignición que causa una explosión térmica [71, 72, 77].

2.2 COMBUSTIBLES

Los MCI utilizan como fluido de trabajo combustibles tradicionalmente derivados del petróleo, por medio de mezclas de distintos compuestos de hidrocarburos. Los combustibles son sustancias que reaccionan exótermicamente en contacto con el oxígeno y su energía térmica depende de la estructura molecular que lo conforma. Los MCI utilizan principalmente combustibles líquidos y gaseosos, los primeros tienen la facilidad de manejo y cuentan con alto poder calorífico, por esta razón son los de mayor uso como fluido de trabajo, en comparación de los gaseosos, los cuales necesitan grandes volúmenes para su almacenamiento [17, 73]. En los combustibles base petróleo, los dos elementos que predominan son el carbono (C) y el hidrógeno (H), con pesos moleculares de 86 % para el C y 14 % para el H, segregando un 1 % para azufre (S) en el caso del diésel. Los combustibles base alcohol contienen una fracción de oxígeno en su fórmula química [71]. Los combustibles con pesos moleculares grandes generalmente presentan altas temperaturas de ebullición [72].

2.2.1 GASOLINA

En el caso de las gasolinas, los componentes con bajos pesos moleculares serán utilizados para iniciar el encendido de la mezcla en frío debido a su baja temperatura de ebullición, y los componentes con altos pesos moleculares mantendrán un buen encendido y desplazamiento de la llama por medio de su alta temperatura de ebulli-

ción, tratando de conformar la mezcla perfecta. El exceso de componentes con bajo peso molecular tiende a vaporizar el combustible en las líneas de gasolina, mientras que el exceso de componentes con alto peso molecular tiende a no vaporizarse y crear una mala combustión, con emisiones contaminantes mas elevadas. Para conocer los rangos en temperaturas de ebullición es común utilizar las temperaturas donde se vaporiza al 10, 50 y 90 % del combustible [72].

Los átomos de carbono se agrupan en estructuras de 4 enlaces, mientras que los hidrógenos se agrupan con un solo enlace. Los hidrocarburos saturados son aquellos que tiene 4 enlaces sencillos unidos a hidrogeno u otro carbono, mientras que los insaturados se componen de enlaces dobles y triples [72].

Los compuestos principales en las gasolinas se agrupan en familias. La Tabla 2.1 muestra la composición de las gasolinas mexicanas [78] y son las siguientes [71, 72, 73]:

TABLA 2.1: Composición de las gasolinas mexicanas

Componentes de la gasolina (%)	Octanaje 87 (Magna)	Octanaje 92 (Premium)
Parafinas	9.59	7.48
Isoparafinas	38.34	39.68
C. Aromáticos	38.61	43.36
Naftalenos	6.10	3.26
Olefinas	7.36	6.22

1. Parafinas o alcanos: Hidrocarburos saturados de cadenas sencillas, la unión de C y H se basa en la fórmula C_nH_{2n+2} , los compuestos ramificados obtienen el prefijo iso o n cuando se mantienen lineales.
2. Cicloparafinas o naftenos: Anillos de hidrocarburos insaturados con cadenas sencillas, los H pueden ser reemplazados por radicales. Su unión se basa en la fórmula C_nH_{2n} . Están relacionadas con ser un buen compuesto para gasolinas.

3. Olefinas o alquenos: Compuestos de hidrocarburos insaturados con un doble enlace de C a C. La fórmula que los une es C_nH_{2n} .
4. Diolefinas: Cadenas similares a las olefinas que agregan otro doble enlace entre C y C. La fórmula química que los une es C_nH_{2n-2} .
5. Acetilenos o alquinos: Cadenas de compuestos de hidrocarburos insaturados con un triple enlace entre C y C. La fórmula química que los une es C_nH_{2n-2} .
6. Aromáticos: Estructura de anillos con uniones de doble enlace C a C con fórmula química C_nH_{2n-6} . Los H muchas veces son reemplazados por otras familias creando nuevos isómeros. Destacan por ser buenos compuestos para las gasolinas, sin embargo algunos isómeros producen mayor cantidad de emisiones.
7. Alcoholes: Similares a los alcanos donde un grupo hidroxil con radical OH sustituye un H.
8. Aldeídos: Contienen un grupo formil radical, con un doble enlace hacia el O, un enlace sencillo al H y otro enlace sencillo a un H o un radical orgánico.

Además de las familias antes mencionadas, en México se agregan aditivos mejoradores de octanaje a las gasolinas, los mas comunes son: el éter metil tert-butílico (MTBE) con 116 octanos y el etanol con 108 octanos [78].

2.2.2 COMBUSTIBLES BASE ALCOHOL

El aumento de los precios y el agotamiento de las reservas petroleras de primera instancia han traído consigo el uso de otros combustibles con base alcohol. Estos tienen las ventajas de poseer alto octanaje y bajo sulfuro, emitir una menor cantidad de materia contaminante en comparación a las gasolinas, una mejor eficiencia volumétrica debido a su elevado calor latente de evaporización y una mayor presión que se traduce en potencia en la carrera de expansión por una mayor cantidad de

moles contenidos en los gases de escape producto de la combustión, sin embargo, cuentan con una menor cantidad de energía contenida y emiten mayor cantidad de aldehídos a comparación de las gasolinas. Además de estas principales desventajas, también tienen la facilidad de corroer líneas, empaques y tanques de combustible, así como los mecanismos metálicos que entran en contacto con el alcohol al hacer la combustión. Sus propiedades de combustión son muy pobres comparadas con las gasolinas, destacando dificultades de encendido en T menores a 10°C por lo que debe añadirse gasolina como iniciador [17, 72].

2.2.2.1 BUTANOL ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$)

Producto del proceso de fermentación acetobutílica tras la intervención de la bacteria *Clostridium Acetobutylicum* en materia azucarada. A pesar de ser un potencial sustituto de gasolinas no a demostrado rentabilidad a escala industrial [17].

2.2.2.2 METANOL (CH_3OH)

Historicamente es un producto de la destilación de madera, sin embargo, en la actualidad se produce por medio de gasificación vegetal o fósil y un posterior tratamiento de los gases formados en reactores catalíticos de alta p y T. Es utilizado en MCI con altas prestaciones en mezclas con gasolina hasta en un 85 v/v % [17, 72].

2.2.3 NÚMERO DE OCTANO

Definido como la resistencia a la autoignición de un combustible. Los valores asignados al número de octano se encuentra entre los rangos 0 y 100, con respecto a la concentración de iso-octano (C_8H_{18} , 2,2,4-trimetilpentano) en n-heptano ($\text{n-C}_7\text{H}_{16}$) como mezcla, siendo combustibles de referencia de 100 y 0 octanos respectivamente.

La medida es asignada tras las pruebas de los métodos ASTM 2699 y ASTM 2700. El combustible al tener un mayor número de octano la resistencia a la autoignición aumenta por lo que soporta relaciones de compresión mas elevadas [71, 79, 80].

Los métodos ASTM D2699 y D2700 [79, 80] se llevan a cabo en un motor monocilíndrico de tipo CFR de relación de compresión variable, con ángulo de chispa fijo en 13° antes del punto muerto superior (BTDC) y temperatura del aire de admisión a 52°C para el método D2699, mientras que el D2700 varía el ángulo de chispa acorde a la relación de compresión y la temperatura del aire de admisión 38°C , al ser métodos de estudio y bajo condiciones reguladas no siempre otorgan un número predictivo real del comportamiento del octanaje en los combustibles utilizados en motores a condiciones reales, con distintos ambientes y condiciones de carga, por esta razón, el desarrollo de métodos más cercanos a la realidad en condiciones reales o pruebas bajo dinamómetros deberán ser desarrollados [71].

Los desarrolladores de automóviles y gasolinas se interesan en el número de octano mínimo requerido por los automotores y lo definen como la tasa mínima de NO que pueda resistir el knock durante condiciones de operación reales y no esta diseñado para un automóvil en específico [71]. En USA utilizan el Índice Antiknock (IA) para definir la calidad de las gasolinas y se define a través de la Ecuación (2.2):

$$\mathbf{IA} = \frac{RON + MON}{2} \quad (2.2)$$

Además de USA, México y Canadá utilizan este sistema de medida, comercializando gasolinas regular, plus y premium, con 87, 89 y 91+ octanos respectivamente, aunque en ciudades de USA y Canadá con altitudes elevadas sobre el nivel del mar es posible observar gasolinas con valores de 85 octanos, justificadas por una menor cantidad de oxígeno en el aire. La compañía Ford no hace válidas garantías en vehículos si la gasolina consumida tiene octanaje menor a 87 [81].

2.3 EMISIONES CONTAMINANTES EN LOS MCI

El incremento en el número de automotores a nivel mundial contribuye al deterioro del ambiente, a través de la mezcla de gases contaminantes producto de la combustión junto con el aire [17, 71]. Los principales problemas que causan estas emisiones repercuten directamente en la vida de los seres vivos y el ambiente, causando alteraciones en el cuerpo y problemas de salud, así como disminución de la capa de ozono a nivel atmosférico.

A continuación se plantean las principales emisiones por MCI.

Las emisiones contaminantes relacionadas al proceso de combustión en MCI de origen primario son: hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), dióxido de carbono (CO_2) y materia particulada [17, 71, 72, 73], además pueden formarse en un segundo proceso cuando entran en contacto con la atmósfera. La Figura 2.4 ilustra las emisiones mencionadas anteriormente.

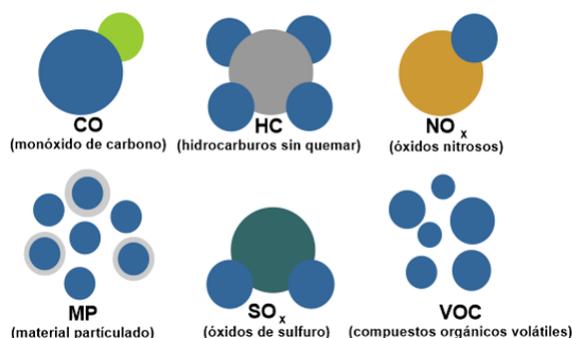


FIGURA 2.4: Estructuras químicas de las principales emisiones por MCI.

La formación de NO , NO_2 y N_2O se deben al porcentaje de nitrógeno (N) en el aire y en algunos combustibles que lo contienen en baja proporción. Son agrupados en el término NO_x y su producción aumenta cuando hay altas temperaturas en la combustión, debido a la oxidación del N_2 en mezclas pobres y cercanas a la estequiometría por el mecanismo en cadena propuesto por Zeldovich. Son responsables de

la lluvia ácida y el smog fotoquímico, reducen la capa de ozono y además generan reacción en los pulmones al respirar aire en ambientes contaminados por NO_x .

La formación de CO es directamente relacionado con el dosado de la mezcla aire/combustible, siendo un proceso intermedio entre la oxidación de los hidrocarburos. Al combinarse con la hemoglobina de la sangre puede llegar a ser letal, aún en exposición a pequeños porcentajes y poco tiempo, debido a una mayor velocidad de transporte en comparación al oxígeno. Como emisión secundaria, el CO puede convertirse en CO_2 y provoca la formación de gases efecto invernadero.

Los hidrocarburos sin quemar y parcialmente quemados son efecto de una mala combustión, y estan relacionados a la composición del combustible. El efecto del combustible adherido a la pared del cilindro, pistón y culata, generado por la cesión de calor del hidrocarburo al metal produce un apagado de llama cercano a la película de combustible lo que ocasiona una combustión incompleta y mayor cantidad de HC. Los combustibles con cantidades altas de aromáticos y olefinas emiten mayor cantidad. Los grupos en que se dividen los HC son: los HC aromáticos policíclicos (PAH) formado por 2 o más anillos aromáticos y los HC carbonílicos que aparecen en etapas intermedias de la combustión y se caracterizan por tener un grupo alquilo.

Para ahondar mas en los procesos termo-químicos y físico-químicos de formación, los índices de emisiones para MEC y MEP, y los efectos que generan estas emisiones podrá consultarse los libros relacionados a combustión y motores de combustión interna escritos por Payri, Heywood, Pullbreak y Glassman [17, 71, 72, 73].

2.3.1 NANOPARTÍCULAS

Las nanopartículas (NP) son parte del grupo del material particulado (MP) y se distinguen por ser la escala más pequeña de medición. La Figura 2.5 ilustra las escalas de medición del MP [82], se observan las escalas PM10, PM2.5 y PM0.1, como resultado de los efectos nucleación y acumulación.

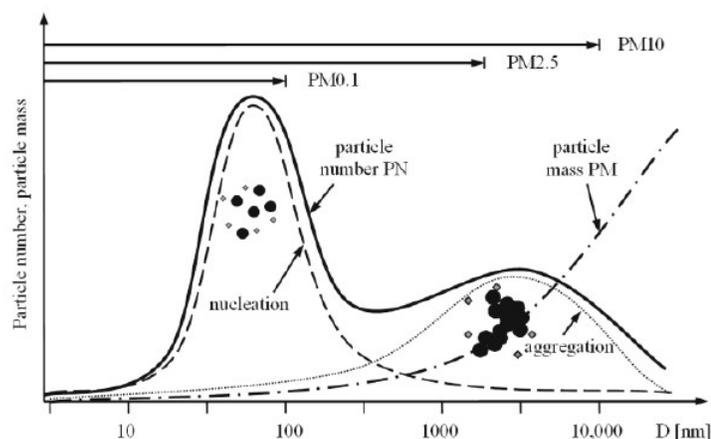


FIGURA 2.5: Distribución del material particulado producto de la combustión de un MCI, resultado de los efectos nucleación y acumulación [82].

Las nanopartículas se definen [54] como toda sustancia en fase sólida y líquida presente en los gases de escape a excepción del agua, en condiciones ambientales. La Figura 2.6 muestra la estructura general de una nanopartícula.

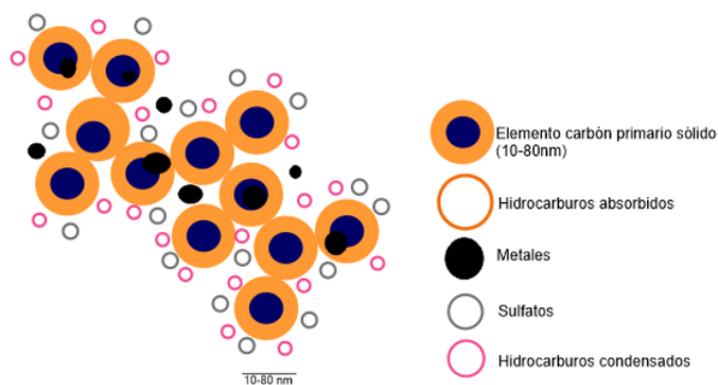


FIGURA 2.6: Estructura general de una NP

Las nanopartículas se dividen en 2 fracciones, una soluble y una insoluble.

La fracción insoluble parte de un núcleo de carbón primario con estructura similar al grafito o ceniza, conocido como PM_{SOL} , además puede contener nitratos, sulfatos y metales [82, 83].

La fracción orgánica soluble (SOF) puede extraerse a través de diclorometano (CH_2Cl_2), conocida como PM_{SOF} . Estas contienen aromáticos policíclicos compues-

tos por oxígeno, nitrógeno, zinc, fósforo, calcio, cromo, silicio, hierro y sulfuros, que forman dióxidos de sulfuro, ácidos sulfúricos y dióxido de nitrógeno. Las NP de tipo SOF se encuentran en forma de vapor, que varían dependiendo el diseño y operación del motor, con rangos entre el 10 y 90 % total de la masa de partícula [82, 83].

Ambas fracciones son producto de la combustión justo después de la válvula de escape, siendo derivadas del combustible, el aceite de motor y en algunos casos pequeños metales de los mecanismos que hacen contacto directo con el fenómeno de combustión, sin embargo, las partículas que se estudian y que son limitadas por las regulaciones son de segundo proceso y se miden en condiciones ambientales, ya sea justo en la tubería de escape o en el aire que circula por el medio ambiente [58].

La distribución de tamaños de NP consiste en 3 mecanismos [58, 82, 83]:

1. Modo acumulación: los diámetros de las partículas rondan de 80 a 1000 nanómetros (nm), se lleva a cabo por la aglomeración de carbón y la absorción de fracción SOF. Constituye la mayor parte de masa de partículas.
2. Modo nucleación: con diámetros entre 1 a 80nm, se forman durante la dilución y enfriamiento del gas, mayormente formada por la fracción SOF, metales y pequeños núcleos de carbón. Dentro de la masa de partículas su participación es pequeña con rangos entre 1 y 20 %, caso contrario para el número de partículas, donde se estima hasta un 90 % de presencia.
3. Modo grueso: con diámetros de 2.5 y 40 μm , sucede tras el choque y unión de las partículas en modo acumulación principalmente en la tubería de gases de escape. Tiene una participación en la masa de partículas entre el 5 y 20 %.

El diámetro aerodinámico es utilizado para medir el tamaño de las partículas de carbón sólido, debido a sus formas complejas [82, 83]. Los MCI emiten partículas con diámetros mayores a 10nm, los MEC en particular emiten partículas con rangos entre 60 y 100nm, mientras que los MEP rangos entre 50 y 80nm [82, 83].

2.3.1.1 FORMACIÓN DE NP

La estructura final de las partículas emitidas y colectadas en la tubería de escape están relacionados a los procesos iniciales e intermedios, tras procesos químicos producto de la combustión y la temperatura de combustión, sin embargo, uno de los procesos que más contribuye a la formación es el momento justo después de la inyección del combustible o la mezcla al cilindro, en cual una mala homogeneización de la mezcla trae consigo la formación de pequeñas gotas y zonas más ricas de combustible, que al hacer contacto con la llama genera hollín, el cual es precursor para la formación de NP [55, 56, 58, 82, 83].

Las altas temperaturas en el proceso de combustión favorecen a la oxidación y descomposición de las estructuras químicas que conforman el combustible en la carrera de compresión, momento donde la deshidrogenación hace presencia. Durante la carrera de expansión los gases disipan la temperatura hacia el block del motor, creandose un proceso de enfriamiento, lo que facilita la condensación de partículas con tamaños al rededor de los 2nm, fase donde inicia del proceso de la nucleación de NP. El ambiente de T y p que genera la carrera de escape y la fluidez de movimiento de las NP en esta fase, ocasionan el choque y unión entre ellas aumentando su tamaño, continúa la formación en modo nucleación con diámetros aerodinámicos entre 10 y 80nm con características de 10 átomos de carbono por 1 de hidrógeno, este proceso es conocido como “Brownian motion” [55, 56, 58, 82, 83].

La aglomeración sucede en el momento que los gases de escape son trasladados hacia la atmósfera, con cambios bruscos en p y T que resultan en coagulación de fracciones SOF y choque entre partículas aumentando el área superficial, con una fuerte dependencia a la concentración de partículas que se encuentran en esta fase final [82, 83].

Debido a los contenidos altos de aromaticos policíclicos y los altos valores del punto de ignición del diésel, los MEC tienden a una mayor formación y emisión de hollín y NP a comparación de los MEP [82].

Las NP conforman la mayor parte del número total de partículas pero una pequeña parte de la masa y no existe una relación directa entre ellas [58, 82, 83].

2.4 MOTOR CFR

En los años 1920's el crecimiento en la industria del transporte y los combustibles creó un comité para responder a las necesidades de definir y estandarizar la medición y características de las gasolinas, fue nombrado Co-operative Fuel Research (CFR). En 1928 el CFR decide estandarizar un método de prueba para la autogignición en las gasolinas mediante un motor monocilíndrico. El diseño de Waukesha Motor Company fue aceptado y 45 días después se presentó en la junta anual de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) [84].

La necesidad de medir el octanaje de combustibles para MEP originó la construcción de motores CFR [85]. Además de promover estándares de gasolina que permitan conocer las calidades bajo los métodos ASTM D2699 y ASTM D2700, tras los cuales se investiga el Motor Octane Number (MON) y el Research Octane Number (RON) respectivamente. Esto a permitido aumentar las relaciones de compresión en los MCI por la correspondencia que hay con el aumento del número de octano (NO), comenzando con aditivos como el tetraetilo de plomo y alquilantes [86].

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describe la metodología experimental, los equipos que forman parte del banco experimental y la matriz experimental. Posterior a esta descripción, se definen los parámetros para establecer los resultados de la concentración de nanopartículas, las presiones en cámara de combustión, el fenómeno de autoignición y otras emisiones contaminantes.

3.1 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

A continuación se describen los equipos utilizados en la investigación, los cuales son: el motor principal CFR de tipo compresión variable, el analizador de nanopartículas, el analizador de gases. La Figura 3.1 muestra el esquema del banco de pruebas experimental.

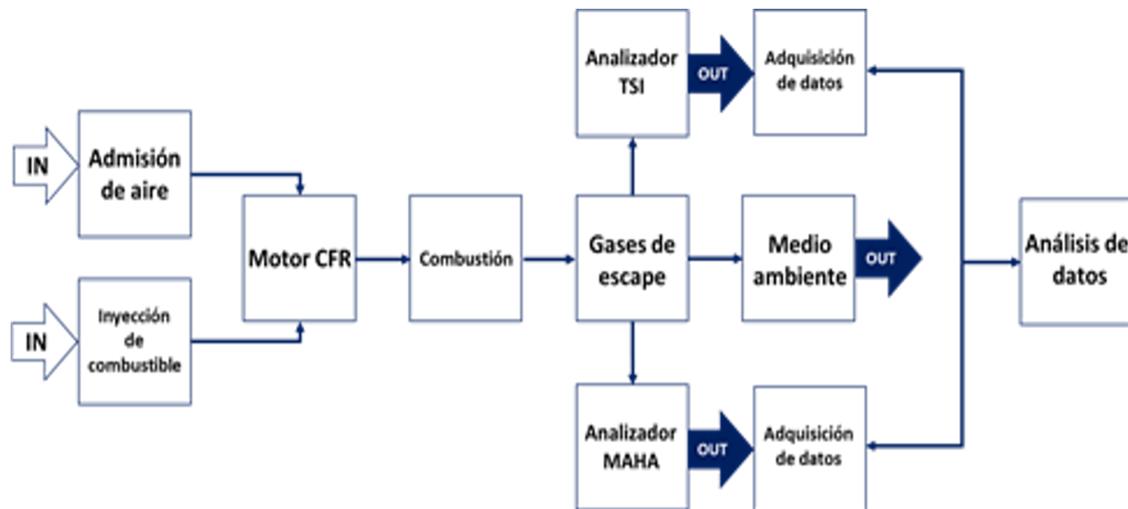


FIGURA 3.1: Diagrama de bloques del banco de pruebas experimental.

3.1.1 MOTOR CFR F1/F2

El motor utilizado para realizar las pruebas de la investigación es un Motor monocilíndrico de tipo CFR marca Waukesha, de relación de compresión variable con rangos entre 4:1 y 16:1. Siendo un motor de combustión interna de encendido provocado y con alimentación al puerto. El motor se encuentra instrumentado electrónicamente para medir, monitorizar y controlar los parámetros que conllevan al fenómeno de combustión.

El motor CFR cuenta con circuitos de admisión, de lubricación, de refrigeración y de escape, acoplado a un sistema de adquisición de datos y emisiones. La

descripción del motor, la puesta a punto y detalles técnicos se encuentran descritos a profundidad en [77, 87].

Para el arranque y funcionamiento del motor térmico, es necesario operar un motor eléctrico síncrono, en régimen de giro constante de 1200RPM con una potencia de 4HP y alimentado por un voltaje de 220/440 VAC y una intensidad de 18.2/9.1 A, capaz de arrastrar el motor CFR y absorber la potencia generada por el mismo. El régimen de giro podrá variar tras el cambio de correas que conectan los ejes de ambos motores [87], variando las RPM conforme los estándares que se utilizan para este tipo de investigaciones en el motor CFR, son: ASTM D2699 y ASTM D2700 [79, 80]. La Tabla 3.1 muestra las características principales del motor CFR.

TABLA 3.1: Especificaciones técnicas del motor CFR

Propiedad	Valor
Revoluciones	900RPM
Máxima RC	16.0:1
Mínima RC	4.46:1
Diámetro de cilindro	8.236 cm
Carrera de pistón	11.43 cm
Vol. desplazado	611.7 cm ³
Vol. cámara de combustión	40.8 cm ³
Longitud de biela	25.4 cm
Altura	20.741 cm

3.1.1.1 CIRCUITOS QUE CONFORMAN EL MOTOR CFR

El circuito de admisión se conforma por un filtro de aire, un remanso, 2 resistencias para calentamiento del aire de admisión y la precámara de inyección donde se sitúa el inyector, debido a que este motor en específico es diseñado con inyec-

ción al puerto [87]. Las resistencias utilizadas para elevar la temperatura del aire de admisión son de 2 kW cada una y establecen un rango de temperaturas entre la temperatura ambiente y 90°C. Ambas resistencias son controladas por una tarjeta reguladora de potencia SCR19Z-040 con conexión hacia el módulo de salida analógica NI 9265 del Compac RIO. Además, la tubería que conduce el aire de admisión hacia la cámara de combustión se encuentran aisladas para evitar la transferencia de calor a la zona de pruebas [77, 87]. Para el control de flujo de aire en este sistema se cuenta con un cuerpo de aceleración marca Magneti Marelli, lo que permite trabajar en cargas mínimas ideales para la investigación en modo arrastre; Para el control de la estequiometría un sensor de flujo másico Pro M Drop-In Sensor, de la marca Pro-M Racing con rangos entre 10 kg/hr y 500 kg/hr [77]

Los sistemas de inyección e ignición son controlados electrónicamente. Permiten conocer el ángulo de cigüeñal donde se hará la descarga eléctrica e inyección de combustible, ambos con una precisión de $1\mu\text{s}$. El inyector es de tipo gasolina MPI, modelo 17091654, marca Delphi & Rochester MPI e inyecta a una presión de 3 bar y un flujo volumétrico de 282 cc/min [77, 87]. La bujía utilizada en el motor CFR es de modelo Champion-D16, con una separación de electrodos de 0.025", y la bobina modelo ENAIC350801, con un voltaje de 38kV y un pulso de disparo de 3ms.

Para el circuito de escape se cuenta con una tubería aislada térmicamente y un remanso con las mismas capacidades físicas que el remanso de admisión. Su extracción dan directamente a la atmósfera y no se cuenta con algún catalizador acoplado hasta el momento.

El circuito de lubricación de motor administra un aceite grado SAE 30 y un filtro Gonher GP28, con una presión en el aceite de 28psi para un correcto funcionamiento y arranque del motor, sin embargo, la tolerancia de presión en el aceite se encuentra en el rango de 25 a 30psi, además se cuenta con un sistema de paro automático cuando la presión se registra debajo de los 25psi. La T de operación de aceite varía entre los 90 y 160°F (32-71°C) [77, 87]. El aceite que se utiliza debe

tener un cambio cada 50 horas de uso al igual que el filtro. En días fríos la presión del aceite puede ser menor al arrancar el motor, por lo que el paro será instantáneo, sin embargo, podrá hacer un segundo arranque asegurando la presión en el sistema de lubricación.

La refrigeración en el motor esta ligada directamente a la T de la culata, por lo que se debe asegurar una T de 70°C en el motor CFR. La estabilidad de la T se regula mediante un sistema de enfriamiento donde se utiliza 2 baños térmicos, uno de la marca Thomas Scientific y el otro Thermo Scientific, administrando un anticongelante comercial para evitar corrosión de metal en el motor. El baño térmico utilizado permite una controlar la T del motor con precisión de 0.01°C.

El control de la relación de compresión del motor se lleva a cabo por medio de un motor paso a paso de elevada con resolución de 0.0144°.

La adquisición y monitoreo de datos se lleva a cabo por un Compact Rio modelo cRIO-9038 que cuenta con un controlador de 1.33GHz y un chip FPGA Kintex-7 160T, el cual tiene conexión con tarjetas como: NI 9213 TC para la lectura de los termopares, NI 9203 AI 20mA para el transductor de presión, NI 9401 con conexión al Encoder Incremental, tarjeta Mosfet e inyector y bobija y bujía, además una NI 9265 AO 20mA dirigida a la tarjeta SCR que controla la T de las resistencias [87]. Para la lectura de señal de presión en cámara se utiliza un osciloscopio con adquisición de datos en tiempo real Yokogawa DL850E [77].

La medición emisiones de nanopartículas y gases son tomadas a través de los analizadores TSI 3795 y MAHA MET 3.6, descritos en la próxima subsección. La toma de muestra por medio de estos se encuentra en el tubo de escape antes del remanso, con una adaptación especial para cada sonda.

3.1.2 ANALIZADOR DE GASES MAHA MET 3.6

Para la medición de gases se utiliza el equipo MAHA MET 3.6 con capacidad para cuantificar Hidrocarburos sin quemar (HC), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Oxígeno (O), valor Lambda (λ), el grupo de Óxidos de Nitrógeno (NO_x), opacidad y concentración de partículas. La Tabla 3.2 muestra las especificaciones técnicas del analizador MAHA MET 6.3.

TABLA 3.2: Especificaciones técnicas del analizador de gases MAHA MET 6.3

Parámetro	Rango	Unidades	Resolución
HC Hexano	0-2000	ppm	4ppm abs
HC Propano	0-4000	ppm	8 ppm abs
CO	0-10	% vol	0.02 % abs
CO ₂	0-15	% vol	0.3 % abs
O ₂	0-25	% vol	0.02 % abs
NO _x	0-2000	ppm	3ppm abs
Concentración de partículas	1-1100	mg/m ³	1mg/m ³
Coefficiente de absorción	0-9.99	m ⁻¹	0.01m ⁻¹
Absorción	0-99	%	
Temperatura	0-150	°C	
Velocidad	400-8000	RPM	
Cálculo de λ	0-9.99		

El analizador de gases puede ser utilizado para motores a gasolina y motores a diésel sin necesidad de cambiar la sonda de muestreo. Equipado con detección electroquímica de O₂ y espectrometría infrarroja de gases para HC, CO y CO₂, así como medidas de extinción para partículas y opacidad.

La importancia de la implementación del analizador MAHA MET 6.3 en esta investigación se debe a que los experimentos son llevados a cabo con la estabilización

del dosado estequiométrico para cada elemento de la matriz experimental, permite la medición del parámetro λ en tiempo real presente en los gases de escape lo que indica el coeficiente de la relación aire/combustible al momento. La modificación de λ se lleva a cabo por medio del sistema de inyección, que al conocer la masa de aire que entra en el cilindro del motor CFR se ajusta el tiempo de apertura del inyector de combustible mediante el software, moderando la relación de la proporción másica aire/combustible y determina una mezcla rica, pobre o estequiométrica. En los motores es de gran importancia conocer esta relación para determinar el grado de carga y operación, así como el par y potencia generada y las emisiones contaminantes. Como la investigación que se realiza es llevada a cabo en grados de carga bajos y a revoluciones constantes se determinó utilizar el dosado estequiométrico.

Además, el analizador de gases MAHA MET 6.3, proporciona la medición de otros gases contaminantes mencionados en la Tabla 3.2, por lo que serán analizados y formarán parte de los resultados de esta investigación para aportar una mayor información acerca del uso de los combustibles de la matriz experimental.

La Figura 3.2 ilustra el analizador de gases MAHA MET 6.3.



FIGURA 3.2: Analizador de gases MAHA MET 6.3

3.1.3 ANALIZADOR DE NANOPARTÍCULAS TSI 3795

El modelo TSI 3795 es usualmente utilizado para medir la concentración del número de nanopartículas presentes en los gases de escape en tiempo real, emitidos por maquinaria de construcción equipados con motores base diésel y filtro de nanopartículas en Europa, bajo la normativa Suiza SR 941.242. Fue desarrollado tras la implementación de certificaciones del Instituto Federal de Metrología Suizo. Además de cumplir con la normativa también opera bajo modo general aplicado a mediciones fuera de esta regulación con otros MCI [88]. La Figura 3.3 ilustra el analizador de nanopartículas TSI 3795.



FIGURA 3.3: Analizador de nanopartículas TSI 3795

El analizador opera bajo los siguientes principios: absorbe una cantidad de gases de escape de 0.7 litros por minuto (LPM) que es diluida 10 partes a 1, posterior a eso una trampa de ciclón atrapa las partículas con tamaños mayores a $1\mu\text{m}$ y una trampa de agua remueve la humedad de los gases, el tercer proceso seca y filtra las partículas por medio de 2 filtros HEPA para luego continuar el flujo hacia un separador catalítico que calienta las partículas a una T de 350°C removiendo y oxidando las fracciones SOF que contienen las partículas. Como proceso final atraviesan un contador de partículas condensadas con isopropanol que proporciona una medida precisa y directa del número de partículas en concentraciones altas y bajas en todo el rango de condiciones de temperatura y altitud [88].

La Tabla 3.3 muestra las especificaciones técnicas del analizador de nanopartículas TSI 3795.

TABLA 3.3: Especificaciones técnicas del analizador de nanopartículas TSI 3795.

Características	Rangos	Unidades
Operación general	1	Hz
Operación oficial SR 941.242	10	Hz
Tamaño máximo de detección	1	μm
Eficiencia de detección	<50 % @ 23nm, >50 % @ 41nm	
Rango de concentración	1000 a $>5 \times 10^6$	partículas/cm ³
Temperatura de operación	-10 a 40	°C
Presión de operación	70-106	kPa

Las especificaciones técnicas y capacidad de este analizador hace factible su uso en la medición particular de esta investigación, debido a la detección de tamaño de partículas similares a los que emite un MEP en funcionamiento y los rangos de concentración que pueden alcanzarse en distintos modos de operación de un MEP, sin necesidad de adaptar un filtro de nanopartículas para motores de gasolina.

Al contar con una dilución dentro del analizador de 10 a 1 no es necesario implementar un tunel de dilución externo, esto nos permite un ahorro en el costo de nuevos aditamentos y en tiempo en construcción, los resultados serán mas precisos ya que no hay una mezcla con aire puro, por lo que las partículas estudiadas serán meramente de la emisión de la CFR, permitiendo distinguir las particularidades de cada mezcla de la matriz experimental.

Debido a la función que hace el separador catalítico en este analizador, las mediciones registradas serán solo de la fracción sólida de las nanopartículas. Esta peculiaridad aporta al estudio de filtros de partículas y estimar el tiempo de vida útil, así como la calidad de filtración determinando los daños en caso de existir alguno.

3.2 MATRIZ EXPERIMENTAL

En este apartado se describen los parámetros de operación del motor CFR, el tipo de medición por parte de los analizadores y la matriz experimental.

3.2.1 MOTOR CFR

El motor CFR será operado bajo la ASTM D2700 [77, 80], además se añadirá una variación en la T de aire de admisión para comparar los resultados y los efectos que ejerce sobre la emisión de la concentración del número de nanopartículas. La Tabla 3.4 muestra las condiciones de operación del motor CFR, la variación de T de aire de admisión, RC y el ° de chispa antes del punto muerto superior correspondiente.

TABLA 3.4: Condiciones de operación del Motor CFR.

Giro de motor	T aire de admisión	Relación de compresión	° de chispa
900 RPM	38°C	6.2	21
		7.36	18
		7.86	17
		8.45	16
		9.15	15
		11	14
	68°C	6.2	21
		7.36	18
		7.86	17
		8.45	16
		9.15	15
		11	14

3.2.2 COMBUSTIBLES

Las gasolinas empleadas en el experimento son gasolinas regular y premium adquiridas en una estación PEMEX en la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) y cumplen las condiciones de la NOM-016-CRE-2016, se definen como:

- Gasolina regular: Gasolina con índice de octano $([\text{RON}+\text{MON}]/2)$ de 87.
- Gasolina premium: Gasolina con índice de octano $([\text{RON}+\text{MON}]/2)$ de 92.

Los combustibles base alcohol se adquirieron a la empresa CTR Scientific. El metanol y el butanol contienen una pureza analítica mayor al 99.5%. A partir de los 4 combustibles se crean mezclas binarias de gasolina-alcohol a distintas proporciones, empleando la gasolina regular para las mezclas. Los 4 combustibles también se evalúan de manera pura. La Tabla 3.5 muestra la matriz experimental de los combustibles puros y las mezclas gasolina-alcohol y las RC a las que serán sometidas.

TABLA 3.5: Matriz experimental de los combustibles.

Gasolina Regular (v/v %)	Gasolina Premium (v/v %)	Metanol (CH ₃ OH) (v/v %)	Butanol (C ₄ H ₉ OH) (v/v %)	Nomenclatura	Relación de Compresión
100	-	-	-	GM100	6.2 a 7.86
-	100	-	-	GP100	6.2 a 7.86
-	-	100	-	M100	6.2 a 11
-	-	-	100	B100	6.2 a 9.15
85	-	15	-	G85M15	6.2 a 9.15
50	-	50	-	G50M50	6.2 a 8.45
85	-	-	15	G85B15	6.2 a 8.45
50	-	-	50	G50B50	6.2 a 8.45

Las propiedades de los combustibles puros que fueron utilizados en la investigación se observan en la Tabla 3.6. Obtenidas a través de las hojas de seguridad proporcionadas por los proveedores (PEMEX y CTR Scientific) y los reportes de datos en la tesis de maestría de Guillermo Rubio [77, 89].

TABLA 3.6: Propiedades de combustibles puros y alcoholes.

Propiedad	GM	GP	Metanol	Butanol
Poder calorífico (MJ/kg)	44.1516	44.1516	21.7377	35.8252
Temperatura de autoignición (°C)	250	250	455	340
Índice de octano	87	92	98.6	87
Calor de vaporización (kJ/kg)	340	340	1100	578.4
Peso molecular(g/mol)	94.135	94.135	32.04	74.12
Relación A/F	14.7	14.7	6.429	11.1166
Densidad@20°C (g/cc)	0.7231	0.7231	0.7915	0.809

Debido a que los alcoholes tienden a ser altamente higroscópicos, las mezclas fueron utilizadas en los momentos consecuentes a su preparación para evitar la absorvancia de humedad. Además, se apartó un volumen de 100ml de las mezclas para estudiar la separación de fases. Las observaciones se realizaron después de 1, 8 y 24 hr para determinar el grado de separación de fases. La separación de fases en mezclas gasolina-alcohol ocurre en mayor grado cuando la temperatura ambiental es baja y en concentraciones de alcohol altas [90], por lo que se puso especial atención a las mezclas con porcentajes del 50%. Los resultados de estas observaciones arrojaron una nula separación entre mezclas y una correcta homogeneidad sin necesidad de añadir aditivos. Las propiedades de las mezclas gasolina regular-metanol y gasolina regular-butanol, como lo son: densidad @ 20°C y relación aire combustible (AFR), fueron obtenidas de manera teórica, como se explica Rubio-Gomez [77], considerando una homogeneidad en las mezclas y baja o nula higroscopía. Las propiedades antes mencionadas se observan en la Tabla 3.7.

Propiedad	GM85M15	GM50M50	GM85B15	GM50B50
Densidad@20°C (g/cc)	0.7252	0.7525	0.7277	0.7607
Poder calorífico (MJ/kg)	44.1516	44.1516	21.7377	35.8252
Relación A/F	13.346	10.3503	14.1032	12.7971

TABLA 3.7: Propiedades de mezclas gasolina-alcohol.

La formula teórica utilizada para determinar la densidad del combustible se muestra en la Ecuación 3.1 [77], debido a su comportamiento líneal en mezcla con relación a las densidades de la gasolina y alcohol, dónde $\eta_{gasolina}$ y $\eta_{alcohol}$ se consideran a una T ambiente de 20°C medidas en g/cc, y X_v representa la concentración volumétrica de cada combustible, medida en rango de 0 a 1:

$$\eta_{mezcla} = \eta_{gasolina} \cdot X_{v,gasolina} + \eta_{alcohol} \cdot X_{v,alcohol} \quad (3.1)$$

La formula teórica utilizada para determinar la AFR se muestra en la Ecuación 3.2 [77], es determinada por los valores de gasolina y alcohol en mezcla, bajo los parámetros conocidos de AFR, densidades (η) @20°C y proporción volumétrica (X_v) de cada combustible presente en la mezcla:

$$AFR_{mezcla} = \frac{AFR_{gasolina} \cdot \eta_{gasolina} \cdot X_{v,gasolina} + AFR_{alcohol} \cdot \eta_{alcohol} \cdot X_{v,alcohol}}{\eta_{mezcla}} \quad (3.2)$$

El poder calorífico se obtiene a través de la Ecuación 3.3, por medio de la cantidad de porcentaje volumétrico presente en la mezcla y el valor del poder calorífico de cada combustible:

$$PC_{mezcla} = PC_{gasolina} \cdot X_{v,gasolina} + PC_{alcohol} \cdot X_{v,alcohol} \quad (3.3)$$

3.2.3 MATRIZ DE ENSAYOS Y CONDICIONES DE OPERACIÓN EXPERIMENTAL

La matriz de experimentos bajo la ASTM D2700 consta de 64 elementos que se encuentran delimitadas por la T de aire de admisión, RC con ángulo de chispa propio, tipo de alcohol presente en la mezcla y concentración volumétrica. La variación de ángulo de chispa antes del PMS se puede observar en la Tabla 3.4 y la matriz de experimentos por mezcla de combustible puede observarse en la Tabla 3.5, las 2 tablas en conjunto crean la matriz de ensayos y condiciones de operación. Para esta experimentación, ha sido elegida la ASTM D2700 [80] por las condiciones de operación (mayor RPM y T de aire de admisión) mas severas, además que el ángulo de chispa cambia conforme la relación de compresión, lo que representa condiciones mas cercanas a las reales de motores en funcionamiento, en comparación con la ASTM D2699 [79], donde el ángulo de chispa es 13° antes del punto muerto superior.

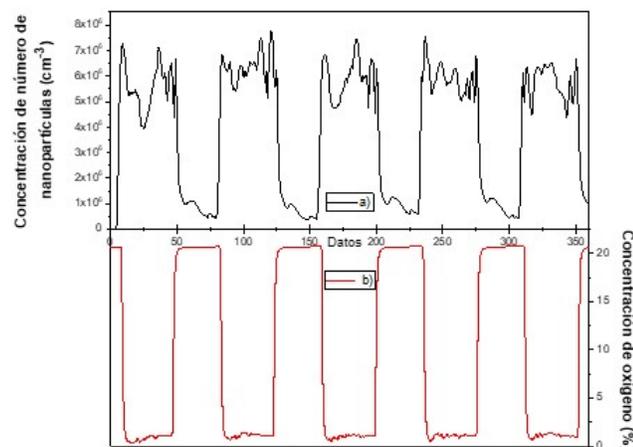
Cada elemento de la matriz constó de 11 conjuntos de combustión y arrastre. Los conjuntos de combustión se realizaron en un tiempo total de 35 segundos y otros 35 segundos de arrastre para cada elemento de la matriz, de esta manera se obtuvieron los datos reales por las mediciones de los analizadores TSI y MAHA durante los conjuntos de combustión, mientras que los conjuntos de arrastre serán para barrer los gases de escape que se encuentren en la tubería de escape y así tomar muestras seguras sin alteraciones por gases producto de combustiones anteriores.

De los 11 conjuntos, los 4 iniciales no serán medidos por el analizador de nanopartículas TSI y serán utilizados para lograr una estabilización en la temperatura local de la cámara de combustión y el factor lambda (λ). La temperatura se estabiliza sin cambios bruscos alrededor de los 400°C medidos por un termopar acoplado justo después de la cámara de combustión. El factor λ es medido a través del sensor electroquímico de oxígeno que posee el analizador MAHA MET 6.3. Al estabilizar la cámara de combustión en una temperatura sin cambios bruscos se asegura una estabilidad del λ debido a los cambios que genera la T en la densidad de la mez-

cla, que al ser admitida adquiere T de las paredes del cilindro [17]. Además para lograr la estabilidad de λ deberán hacerse los ajustes necesarios en los controladores de la interfaz de usuario [87], con las medidas justas en los parámetros de AFR estequiométrica para cada elemento de la matriz experimental y el factor de enriquecimiento Gamma. Por estas razones es de gran importancia estabilizar la máquina antes de comenzar las lecturas por parte del analizador de nanopartículas TSI.

Posterior a los primeros 4 conjuntos de estabilización, los conjuntos 5, 6, 7, 8, 9 y 10 fueron medidos con los analizadores TSI y MAHA para la obtención de emisiones de la concentración del número de partículas y emisión de gases contaminantes, respectivamente. El analizador de nanopartículas se operó bajo el modo de uso general, debido a que no se requiere una certificación de un motor, con la facilidad de programar una medición en tiempo real de 1Hz durante los ciclos de combustión. Esto permitió observar curvas con crestas y valles, en donde las crestas corresponden a las emisiones de NP en ciclo de combustión y los valles a los ciclos de arrastre, como se ilustra en la Figura 3.4.

FIGURA 3.4: Comparación de gráficas a) NP y b) O₂, bajo combustión y arrastre.



El modo de lectura en tiempo real permitió observar tendencias de concentraciones para cada elemento de la matriz. Estas tendencias aportaron a la elección del tiempo de ciclos de combustión y arrastre, determinando que con 35 segundos para cada uno existía estabilidad entre crestas y valles sin alteración de los resultados por

concentraciones que pudieran haber quedado de los ciclos anteriores. Además pudieron concretarse conclusiones sencillas en tiempo real antes de hacer el tratamiento de los datos y monitorear el correcto funcionamiento del motor CFR, el combustible en estudio y los sensores que conforman la instalación experimental.

El conjunto número 11, fue designado solo en caso de que alguno de los conjuntos anteriores surgiera algún contratiempo en la medición o cambio de parámetro, sin embargo, al final de las pruebas este conjunto solo fue como medida precautoria ya que no fue necesario tomas adicionales.

Las lecturas de la medición de presión en cámara se realizaron a través del ScopeCorder YOKOGAWA DL850E con frecuencia de muestreo de 1 MHz.

3.2.4 TRATAMIENTO DE DATOS

3.2.4.1 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LAS NANOPARTÍCULAS

El tratamiento para los datos de la concentración del número de nanopartículas se realizó con base a estadística debido a la cantidad de datos arrojados y la dispersión entre ellos. Como parte del tratamiento estadístico se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. El primer paso del tratamiento estadístico después de observar los datos en vivo fue un análisis de mayor profundidad para determinar los inicios y finales de las curvas tipo cresta y valle, correspondientes al ciclo de combustión y arrastre respectivamente. El interés principal fue centrado en los datos de combustión para este estudio y por lo tanto los que serán expuestos al tratamiento estadístico. La comparación entre las gráficas de la emisión de NP y oxígeno (O_2), obtenidas por medio del TSI y el MAHA en el orden dado, da la certeza de los inicios y finales de las crestas para la gráfica de nanopartículas

al estar vinculada en tiempo con la gráfica de valles del O_2 tal como se vió en la Figura 3.4. La gráfica a) corresponde a los ciclos de combustión y arrastre para la concentración del número de nanopartículas y la gráfica b) a los ciclos de combustión y arrastre para la concentración de oxígeno.

Al haber combustión la concentración de O_2 disminuye a valores cercanos al 1% y la de nanopartículas aumenta. La relación entre ambas gráficas de datos se determinó por los tiempos de medición que indican cada analizador, razón por la que este tipo de comparación se fortalece. Para que los datos analizados sean válidos, el comportamiento de λ debe observarse con valores de 1 y rangos entre ± 0.05 de holgura entre mediciones. Si λ supera esos rangos se encontraría fuera del dosado estequiométrico, por lo que ese set quedaría descartado.

2. Al filtrar los valores de combustión, es necesario realizar tablas de distribución de frecuencias e histogramas con campanas de Gauss, debido a la cantidad de datos que se colectaron en los 5 sets de medición y la dispersión de las medidas.
3. Con base a los datos de la tabla de distribución de frecuencias fue posible determinar los máximos, mínimos, modas, medianas. Al procesar los parámetros mencionados anteriormente se obtuvieron cuartiles, la varianza, la media aritmética y los valores para error y desviación estándar. Los rangos datos y tendencias se observaron a través del histograma y la campana de Gauss.
4. Al considerar una varianza relativamente alta se optó por utilizar la media armónica como punto de referencia entre los resultados de concentración de nanopartículas de cada elemento de la matriz. Se representa con la letra H y es utilizada en distribuciones asimétricas manteniendo su representatividad cuando se promedian valores con la misma variable. La formula para determinar la H puede observarse en la Ecuación 3.4.

$$H = \frac{N}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}} = \frac{N}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}} \quad (3.4)$$

5. Para la representación de los valores antes mencionados se distribuyeron en gráficas de barras y bigotes (boxchart), facilitando la comprensión y descripción

de distintos parámetros estadísticos. Los parámetros que se representan en los resultados de esta investigación son: los valores mínimos y máximos de los datos de combustión, observados a través de las líneas verticales que se unen a la caja, mientras que la caja tiene por contenido en su primer línea horizontal el primer cuartíl, la mediana en segundo orden y el tercer cuartíl, descritos en líneas horizontales con dirección abajo hacia arriba, la media armónica (H) de los valores se representa como el punto gris dentro de la caja.

3.2.4.2 TRATAMIENTOS DE DATOS PARA LAS EMISIONES

Como se comentó anteriormente el analizador MAHA cuenta con un sensor electroquímico de O_2 , necesario para determinar el dosado en que se están llevando a cabo las combustiones, a través de λ . Estas 2 emisiones serán las más importantes de este analizador para la puesta a punto de la experimentación, sin embargo, las demás emisiones como hidrocarburos sin quemar, NO_x , CO, CO_2 y concentración de partículas, serán agrupadas en gráficas de barras a través de la media armónica obtenida tras el análisis estadístico de datos por medio de la Ecuación 3.4. La comparación de los resultados entre emisiones será objeto de conclusiones para determinar que combustible o mezcla emite la menor cantidad y observar si hay alguna influencia de estas emisiones en la modificación de los resultados del parámetro de importancia en este estudio particular que es la concentración del número de nanopartículas.

3.2.5 TRATAMIENTO DE DATOS PARA PRESIÓN EN CÁMARA

Como se mencionó anteriormente, dentro del fenómeno de combustión en MEP existe un espectro de autoignición que puede ser detectado por pérdida de potencia y golpeteo cuando los valores son altos. Esta investigación se realiza una medición de las fluctuaciones de presión en cámara con tratamiento por medio de un filtro tipo paso banda, con frecuencias en corte inferior de 4 kHz y superior de 20 kHz. La señal

de autoignición se toma como el valor máximo de la señal de oscilaciones provocadas por el mismo fenómeno. Se distingue de manera visual en la interfaz de usuario por medio de curvas superpuestas en la curva típica de presión durante la combustión, considerando la autoignición cuando se superan los 50 kPa. La descripción de la interfaz y el procesamiento de las señales se encuentra mas detallada por Rubio-Gómez [77].

Los valores que se presentan en este estudio se tomarán tras el tratamiento estadístico de los datos de presión en cámara de 350 ciclos de combustión, y serán representados los valores máximos y las medias de la presión en cámara e índices de autoignición en gráficas de líneas con marcadores, por cada elemento de la matriz. La finalidad del tratamiento de estos datos será destinada a detectar una relación entre el índice de autoignición y la emisión de la concentración del número de nanopartículas, así como en los demás gases detectados por el analizador MAHA MET 6.3.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Este capítulo es dedicado a presentar los resultados obtenidos de manera experimental con explicación mediante gráficas. En primera instancia se presenta un análisis para cada elemento de la matriz por medio de gráficos de cajas y bigotes que describen los resultados obtenidos a partir del analizador de nanopartículas TSI 3795. Como segundo a través de la comparación por combustibles, agrupados en gráficas de líneas con marcadores. Posterior a eso se analizan los resultados obtenidos de las curvas de presión en la cámara de combustión por combustible, relación de compresión y temperatura, continuando con las gráficas relacionadas a la intensidad de autoignición. Por último se comparan los resultados obtenidos mediante el analizador MAHA Met 6.3 determinando las emisiones producto de los gases de escape del motor CFR F1/F2 utilizado en la experimentación.

4.1 GRÁFICAS DE CAJAS Y BIGOTES PARA VALORES DE LA CONCENTRACIÓN DEL NÚMERO DE NP PARA CADA ELEMENTO DE LA MATRIZ

La Figura 4.1 representa los valores por medio de gráficas de cajas y bigotes para GM100, divididas por (T_{adm}) de 38 y 68°C. La comparación entre medias armónicas en ambas (T_{adm}) coloca la de 68°C con valores ligeramente mayores a los de 38°C. Además, se observa una tendencia de aumento en los rangos máximos y mínimos de la concentración de NP cuando se aumenta la RC en ambas (T_{adm}), aunque a mayor temperatura de aire de admisión los rangos son de menor magnitud. La amplitud en las cajas en la gráfica con (T_{adm}) de 38°C, se observan de mayor magnitud, en comparación con las cajas con (T_{adm}) de 68°C. Es clara la relación entre el aumento de (T_{adm}), RC y concentración de NP respecto a la media armónica.

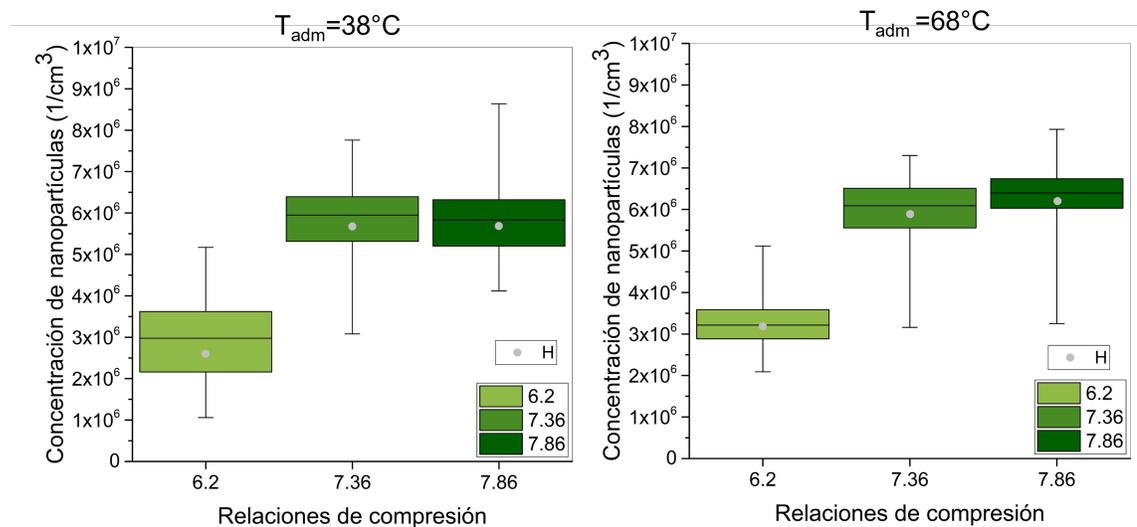


FIGURA 4.1: Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de gasolina magna al 100 % con (T_{adm}) de 38 y 68°C.

La Figura 4.2 representa los valores para el combustible GP100 en ambas (T_{adm}). Se perciben valores con relación de aumento de RC y aumento en la concentración de NP, en ambas (T_{adm}). En la comparación entre las diferencias del aumento de (T_{adm}) y el aumento en concentración de NP se observan valores muy similares para las H, mostrando un pequeño aumento en la concentración NP en la RC 7.86 a mayor (T_{adm}). La (T_{adm}) de 68°C tiene rangos mayores entre máximos, mínimos y amplitud en la caja en las RC 6.2 y 7.86, caso contrario para la RC 7.36, donde la (T_{adm}) de 38°C muestra rangos y amplitudes en mayor proporción.

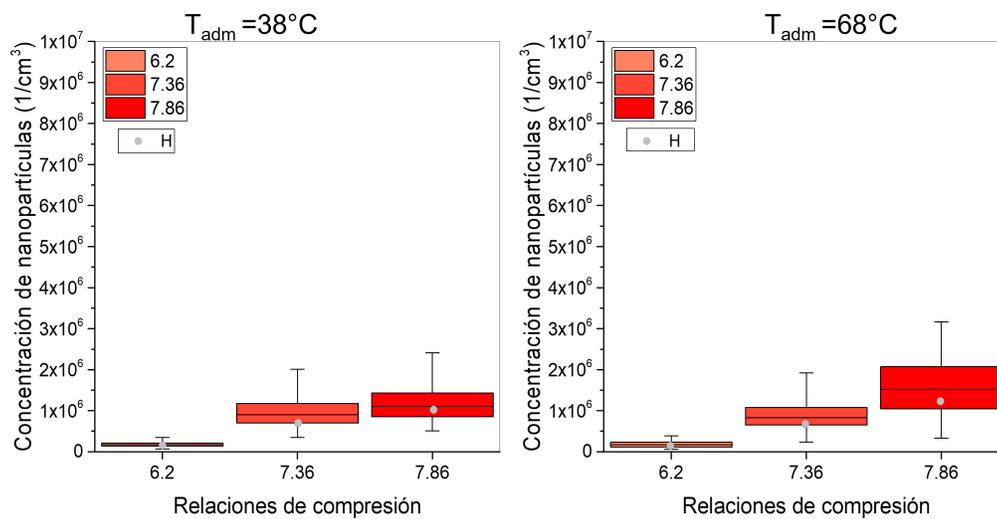


FIGURA 4.2: Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de gasolina premium al 100% con (T_{adm}) 38 y 68°C.

La Figura 4.3 corresponde a los datos arrojados tras el tratamiento estadístico para el butanol puro (B100) en 2 condiciones de (T_{adm}) distintas, además, se observa mayor cantidad de RC, alcanzando la RC 9.15 como la mas alta para la experimentación en este combustible. La relación entre el aumento de RC y aumento en la concentración de NP se hace presente en ambas (T_{adm}) para las H, de la misma manera, esta afirmación es válida también para el aumento en rangos entre máximos y mínimos y amplitud de la caja a una mayor (T_{adm}).

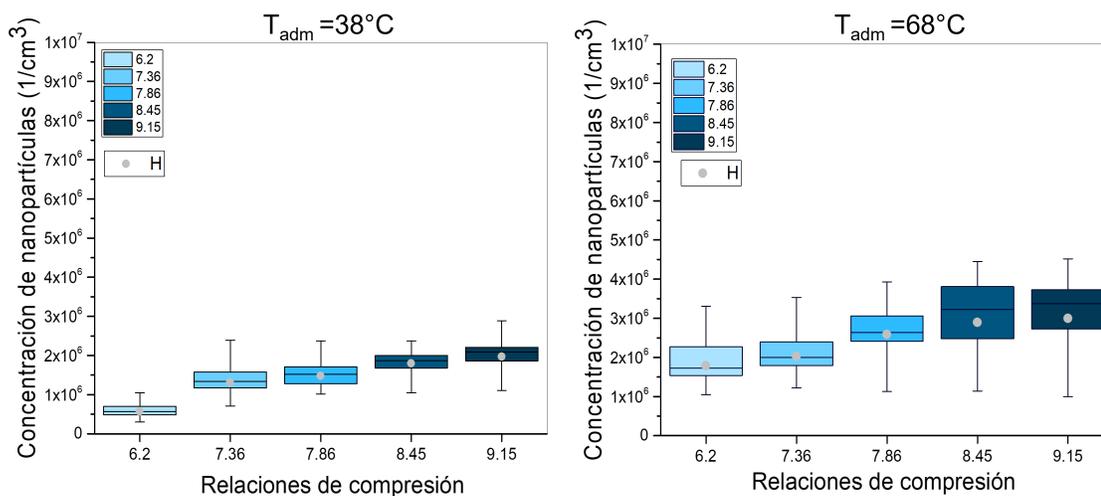


FIGURA 4.3: Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de butanol al 100 % con (T_{adm}) de 38 y 68°C.

La Figura 4.4 representa los valores estadísticos para el metanol puro (M100), en donde se llega a una RC máxima de 11 para ambas (T_{adm}). En estas gráficas no se observa una relación entre el aumento de RC y el aumento en la emisión del número de NP sin importar la (T_{adm}), contrario en la relación que existe para el aumento de (T_{adm}) y el aumento de la concentración de NP, donde a mayor (T_{adm}) se observa una mayor cantidad de NP referente a las H y los máximos, mínimos y los valores de las cajas, en todas las RC. El comportamiento que existe en las RC 6.2, 7.36 y 7.86 para las H se observa en depresión, con valores ligeramente menores cuando se aumenta la RC y es válido en ambas (T_{adm}), para la RC 8.45 en ambas (T_{adm}) se observa un aumento, la RC 9.15 muestra un ligero descenso en la (T_{adm}) de 38°C casi nulo, mientras que en la (T_{adm}) de 68°C se ve un descenso de mayor magnitud en el valor, por último la RC 11 aumenta tras la caída en la RC anterior.

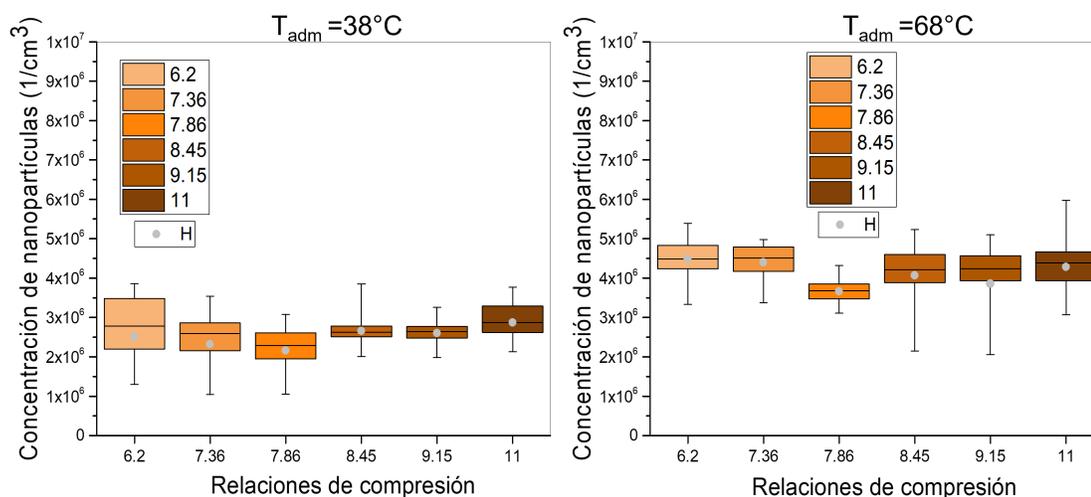


FIGURA 4.4: Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de metanol al 100% con (T_{adm}) de 38 y 68°C.

La Figura 4.5 corresponde a los valores obtenidos tras el tratamiento estadístico de datos para la mezcla de gasolina regular y butanol, al 85 y 15 % respectivamente, en ambas (T_{adm}). Las H para ambas (T_{adm}) se observa la relación entre el aumento de RC y el aumento en la emisión del número de NP, mientras que las RC 6.2, 7.36 y 8.45 el aumento en la (T_{adm}) coincide con el aumento de concentración de NP, caso contrario sucede en la RC 7.86, donde la (T_{adm}) menor presenta una mayor concentración en el número de NP. Los valores entre rangos de máximos son similares en ambas (T_{adm}) para cada RC, no así para los mínimos donde solo la RC 6.2 muestra una similitud en ambas (T_{adm}), las RC 7.36 y 8.45 concentraciones mayores para los mínimos a mayor (T_{adm}) y la RC 7.86 una menor concentración en el mínimo de (T_{adm}) 68°C. Las amplitudes de las cajas coinciden con similitudes en los valores de RC 6.2, 7.86 y 8.45 para ambas (T_{adm}), mientras que en la (T_{adm}) menor se observa una mayor amplitud en la caja. Las RC solo alcanzan el máximo de 8.45.

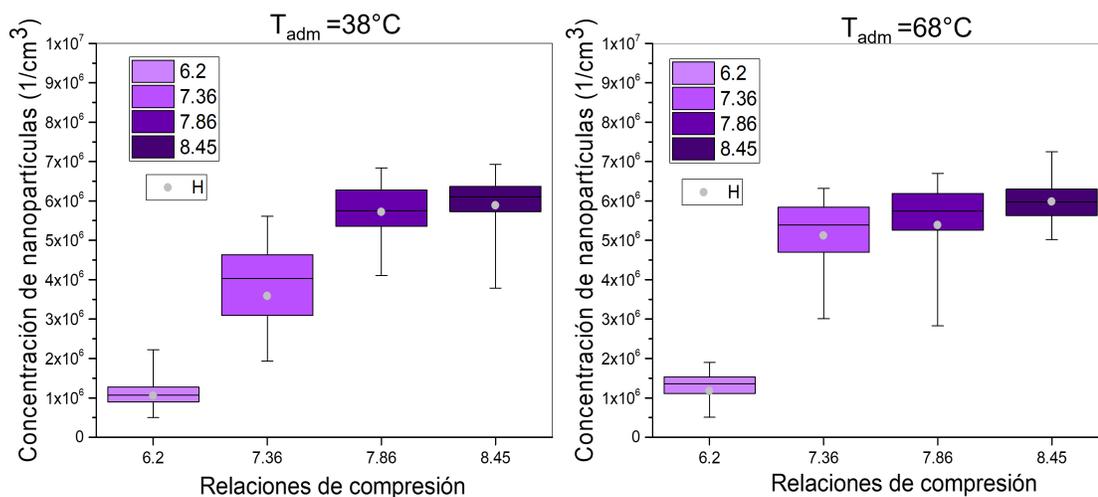


FIGURA 4.5: Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de mezcla gasolina magna al 85 % y butanol al 15 % con (T_{adm}) de 38 y 68°C.

La Figura 4.6 representa los valores estadísticos que corresponden a la mezcla de gasolina regular al 85 % y metanol al 15 % de volumen, en (T_{adm}) de 38 y 68°C, con alcance en la experimentación hasta RC de 8.45. En primera instancia se observa que las dos (T_{adm}) cumplen con la relación entre el aumento a la RC y el aumento en la concentración de NP para los valores de la media armónica. La comparación entre ambas (T_{adm}) arroja valores mayores de media armónica para la (T_{adm}) de 38°C. Los rangos máximos que muestra la RC 6.2 en la menor (T_{adm}) tiene un valor mas grande a comparación de la misma RC a una (T_{adm}) mayor, mientras que los valores de mínimos se observan casi idénticos, con una amplitud de caja mayor para la (T_{adm}) 38°C. La RC 7.36 en (T_{adm}) de 68°C contiene rangos entre máximos y mínimos y amplitud de caja mayor en comparación de la misma RC a (T_{adm}) de 68°C, caso contrario sucede en ambas (T_{adm}) con RC 7.86 en el cual se invierte lo dicho para la RC de 7.36. Por último, en la RC 8.45 los valores máximos son similares en ambas (T_{adm}), no así para los mínimos, donde la (T_{adm}) de 68°C muestra menores concentraciones al igual que la amplitud de la caja, frente a la (T_{adm}) 38°C.

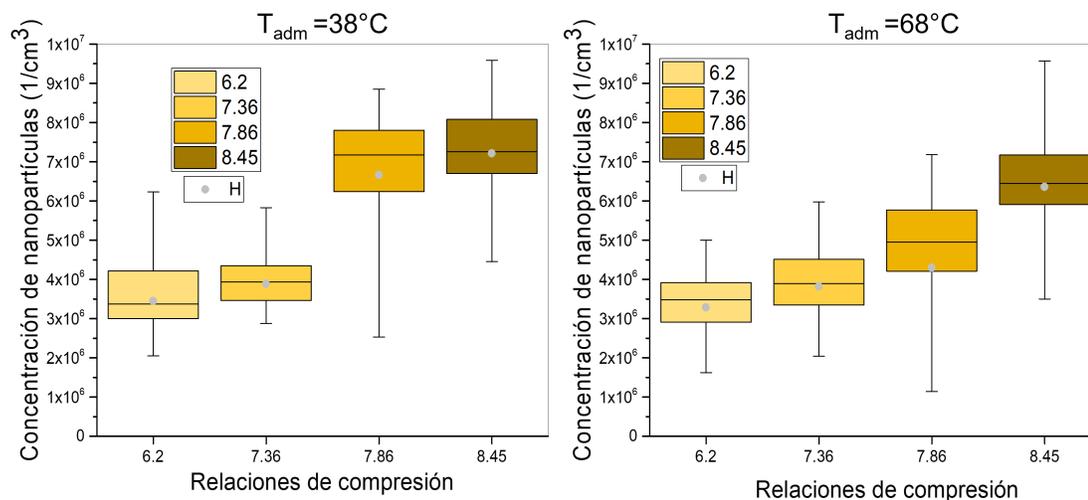


FIGURA 4.6: Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de la mezcla gasolina magna al 85 % y metanol al 15 % con (T_{adm}) de 38 y 68°C.

La Figura 4.7 muestra los resultados del tratamiento experimental para la mezcla gasolina regular y butanol, con un volumen del 50 % para cada parte, con (T_{adm}) de 38 y 68°C para RC hasta 8.45. Se observa una clara relación entre el aumento de RC y aumento en la concentración del número de NP en ambas (T_{adm}) con referencia en la H. Al comparar ambas (T_{adm}) se observan mayores concentraciones de NP en las RC 6.2 y 7.36 cuando la (T_{adm}) es de 68°C, mientras que las RC 7.86 y 8.45 en esta misma (T_{adm}) son menores comparadas a las (T_{adm}) de 38°C. Los rangos entre máximos y mínimos, así como la amplitud de las cajas se observan menores para las RC 6.2 y 7.36 cuando las condiciones en (T_{adm}) son menores, opuesto a lo que se observa en las RC 7.86 y 8.45, donde a menor (T_{adm}) los valores antes mencionados son de mayor rango y amplitud.

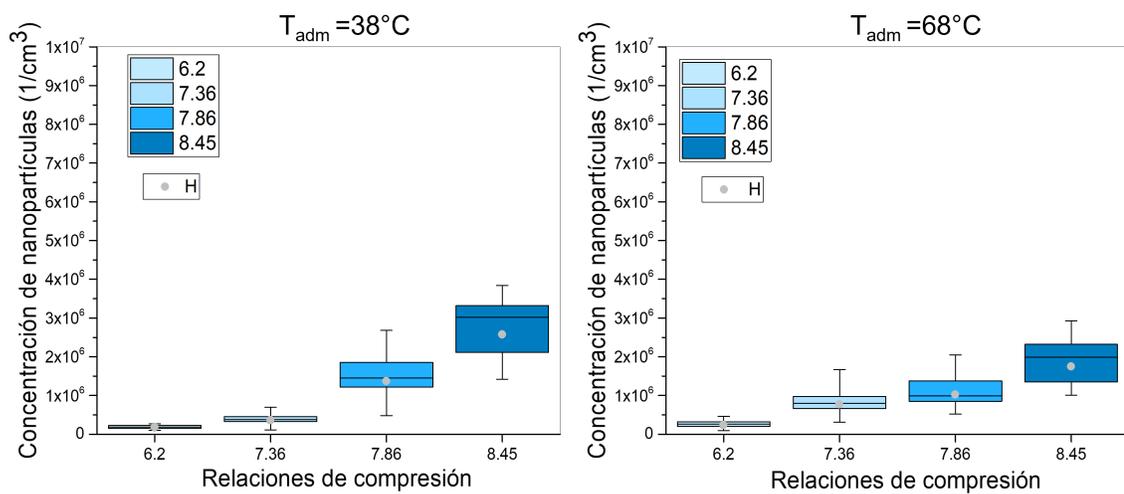


FIGURA 4.7: Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de mezcla gasolina magna al 50 % y butanol al 50 % con (T_{adm}) de 38 y 68°C.

La Figura 4.8 ilustra los valores resultantes del tratamiento estadístico para la mezcla entre gasolina regular y metanol, al 50% de volumen. La mayor RC a la que fue posible experimentar se sitúa en 9.15. Con base en la media armónica se observa una relación directa entre el aumento de (T_{adm}) y el aumento en RC con el aumento en la concentración de NP, esta relación puede ser observada también en los máximos y mínimos, donde tienen valores mayores, al igual que en las amplitudes de las cajas. En general la (T_{adm}) de 38°C muestra valores de concentración mucho mas pequeños en comparación de la (T_{adm}) de 68°C.

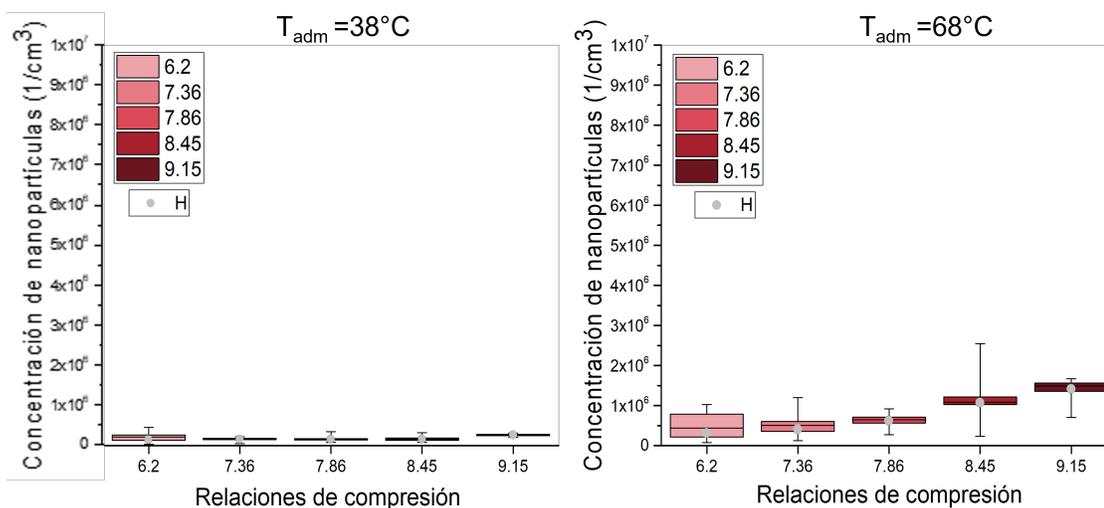


FIGURA 4.8: Gráficas de cajas y bigotes: concentración del número de nanopartículas de la mezcla gasolina magna al 50% y metanol al 50% con (T_{adm}) de 38 y 68°C.

4.2 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LA CONCENTRACIÓN DEL NÚMERO DE NANOPARTÍCULAS

Los resultados de nanopartículas muestran comportamientos distintos debido a la estructura química particular, ya sea como combustible o mezcla binaria.

En la Figura 4.9 se observan las medias armónicas (H) obtenidas a través del tratamiento estadístico, detallado en la Sección 3.2.4.1, para los alcoholes y gasolinas puras a través de una gráfica de líneas con marcadores.

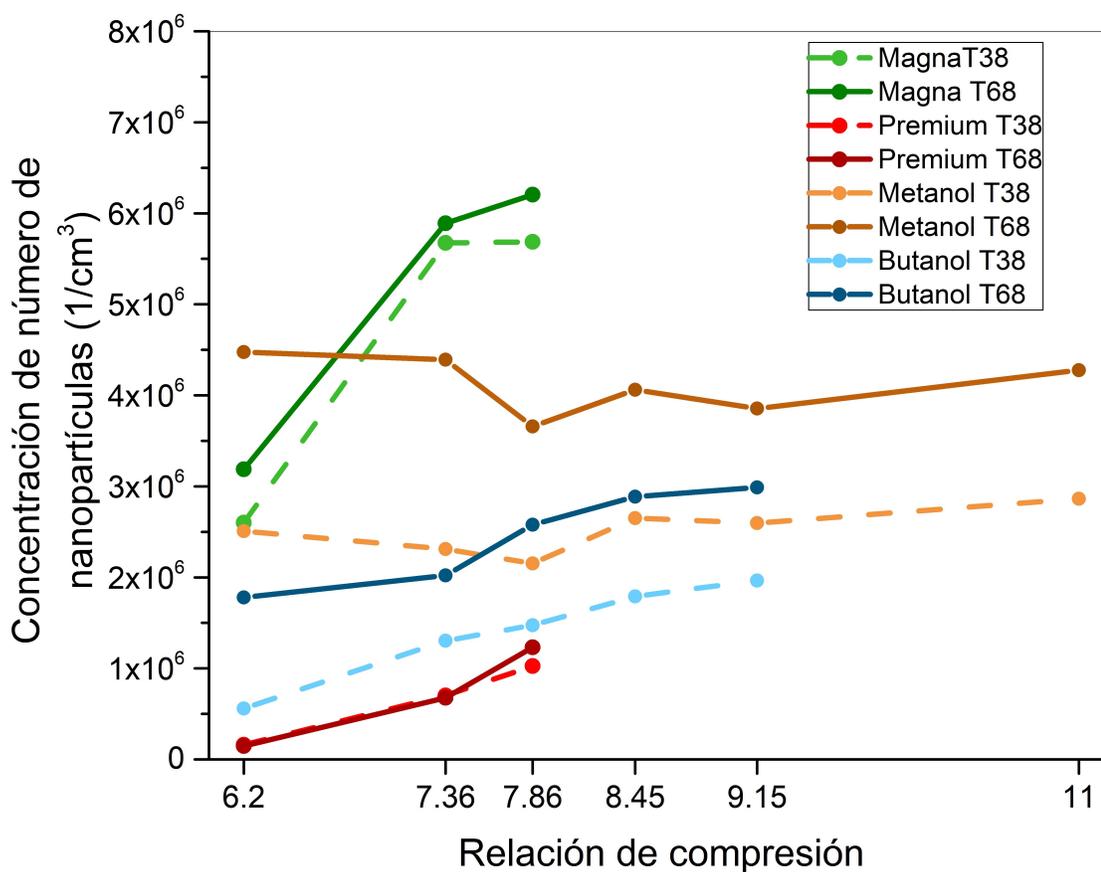


FIGURA 4.9: Comportamiento de la media armónica de la concentración de NP - Combustibles puros.

En primera instancia se distinguen las gasolinas magna y premium con RC hasta 7.86, con colores rojos y verdes respectivamente, mientras que los alcoholes se observan en colores azules para el butanol con RC hasta 9.15 y colores café para el metanol alcanzando RC de 11. El análisis de gráfica muestra a la gasolina premium (GP100) con concentraciones del número de NP mas bajas a comparación de los otros 3 combustibles puros en las 3 RC que se experimentó. Caso contrario sucede con la gasolina regular (GM100) que muestra mayor concentración a comparación de los demás combustibles en las 3 RC, exceptuando el metanol puro en la RC 6.2 con T de admisión de 68°C. Para el caso del metanol (M100) se observa una variación menor, con aumentos y disminuciones de concentraciones mientras aumenta las RC en comparación de las variaciones que presentan los otros 3 combustibles. En los resultados plasmados del butanol se aprecia un aumento en la concentración de NP relacionado al aumento de las RC con valores menores a GM100 y M100, pero mayores a GP100.

El análisis general de la gráfica muestra tendencias de incremento en la concentración del número de NP relacionadas al incremento de la T del aire de admisión. Así mismo, esta relación del aumento en la concentración de NP se observa cuando se eleva la RC, con excepción del M100, donde la relación de compresión no muestra un fuerte impacto. El cambio de concentración entre las (T_{adm}) de 38 y 68°C para cada combustible presentado en esta gráfica muestra tendencias muy similares, observandose valores mayores en la temperatura de aire de admisión de 68°C con afirmación válida para cualquier combustible.

Las media armónica de las concentraciones del número de NP para cada elemento de la matriz presente en esta gráfica y posteriores se observan en la Tabla A.1 del Apéndice 1.

La Figura 4.10 muestra gráficas de línea y marcador de las medias armónicas obtenidas a través del tratamiento estadístico de la concentración del número de nanopartículas en mezclas con contenidos del 85 % en volumen de gasolina regular y el 15 % en volumen para metanol (G85M15) o butanol (G85B15) con referencia a las gasolinas regular (GM100) y premium (GP100) puras.

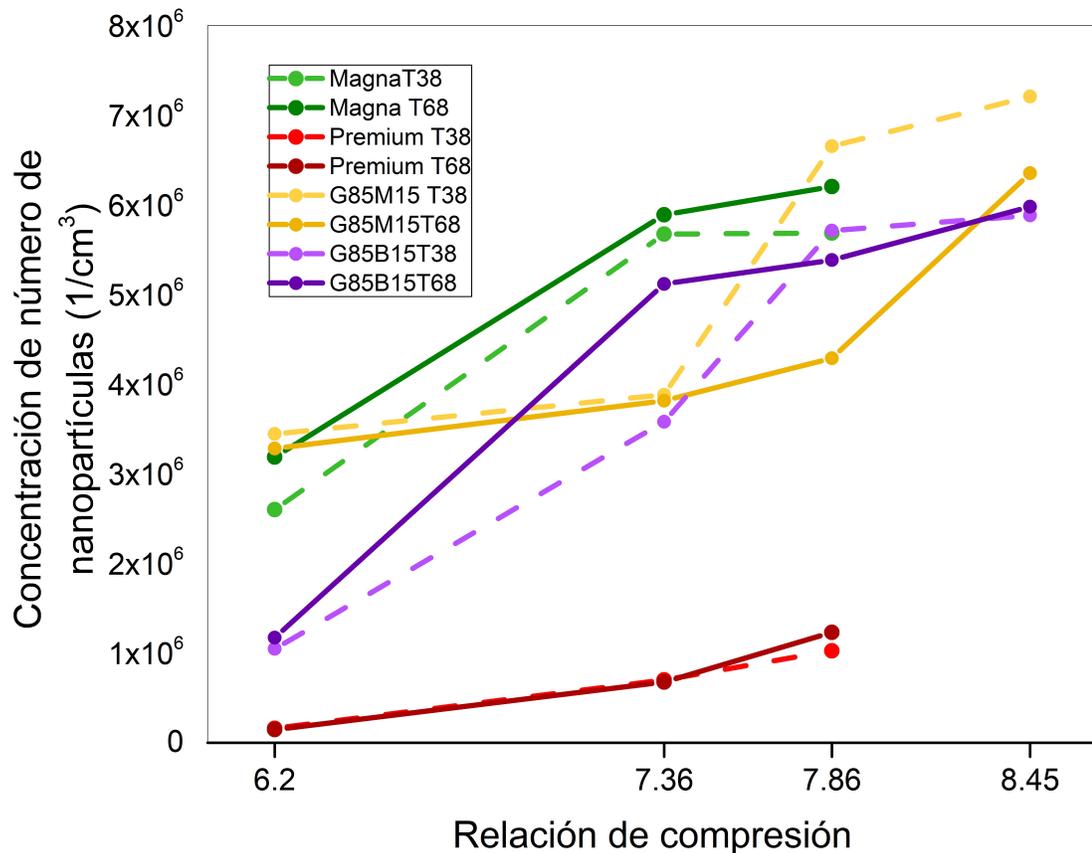


FIGURA 4.10: Comportamiento de la media armónica de la concentración de NP - Mezclas con 85 % de gasolina regular y 15 % de alcohol.

En esta gráfica se observan cambios en el eje de las X donde se disminuye la cantidad de RC, dejando fuera la RC de 9.15 y 11. La razón principal en disminución de las RC en la experimentación fue el aumento en el índice de autoignición que presentaban las mezclas con porcentaje del 85 en volumen de gasolina regular y tan solo el 15 % de volumen para los alcoholes, las cuales a elevadas RC presentan valores de autoignición severos y perjudiciales para el motor. Para las gráficas de G85B15 se

utilizaron los colores en tonalidades moradas, mientras que las tonalidades amarillas corresponden a la mezcla G85M15. Los colores para GM100 y GP100 quedan en las mismas tonalidades mencionadas en la figura anterior y estas son tomadas solo como referencia.

La mezcla G85B15 se aprecia un cambio brusco debido a una mayor emisión de la concentración de NP cuando la RC aumenta de 6.2 a 7.36, mientras que los cambios en RC de 7.36 a 7.86 y de 7.86 a 8.45 se observan mas moderados. El aumento de la RC se relaciona con el aumento en la emisión de NP. La relación entre aumento de (T_{adm}) y aumento de NP consiste para las RC 6.2, 7.36 y 8.45, mientras que la RC 7.86 en (T_{adm}) de 38°C tiene una mayor concentración a comparación de los valores obtenidos para (T_{adm}) de 68°C.

En los datos observados para la mezcla G85M15 la tendencia en concentraciones de NP y su relación con el aumento en la (T_{adm}) se invierte. La (T_{adm}) de 38°C muestra valores con mayor magnitud en las medias armónicas a comparación de la (T_{adm}) de 68°C. La tendencia entre el aumento de RC y mayor emisión de NP sigue válida para esta mezcla, aunque los aumentos son moderados en las primeras dos relaciones de compresión, contrario al cambio entre la RC 7.36 y 7.86 donde se ve un aumento brusco.

Para los resultados en general no se observa un crecimiento lineal en la emisión de NP relacionada al aumento de (T_{adm}) o RC. Los valores para la mezcla G85B15 se encuentran entre los valores de GM100 y GP100, mientras que los valores de la mezcla G85M15 se observan con valores ligeramente mayores a los de GM100 para RC 6.2, los valores en RC 7.36 se encuentran entre los valores de las gasolinas puras al igual que la RC 7.86 con (T_{adm}) de 68°C, caso contrario cuando se encuentra en la misma RC pero con (T_{adm}) 38°C. En los valores para RC 8.45 son mayores para la mezcla con metanol a comparación de los valores de la mezcla con butanol.

La Figura 4.11 representa los valores de la H para la concentración del número de NP resultado del tratamiento estadístico para las mezclas con un porcentaje del 50 % en volumen de gasolina magna y 50 % de volumen para metanol (GM50M50) y butanol (GM50B50). Con colores en tonalidades rosáceos para GM50M50 y tonalidades celestes para G50B50, además de representar los valores obtenidos para las concentraciones de NP de GM100 y GP100 como referencia, con las tonalidades mencionadas anteriormente.

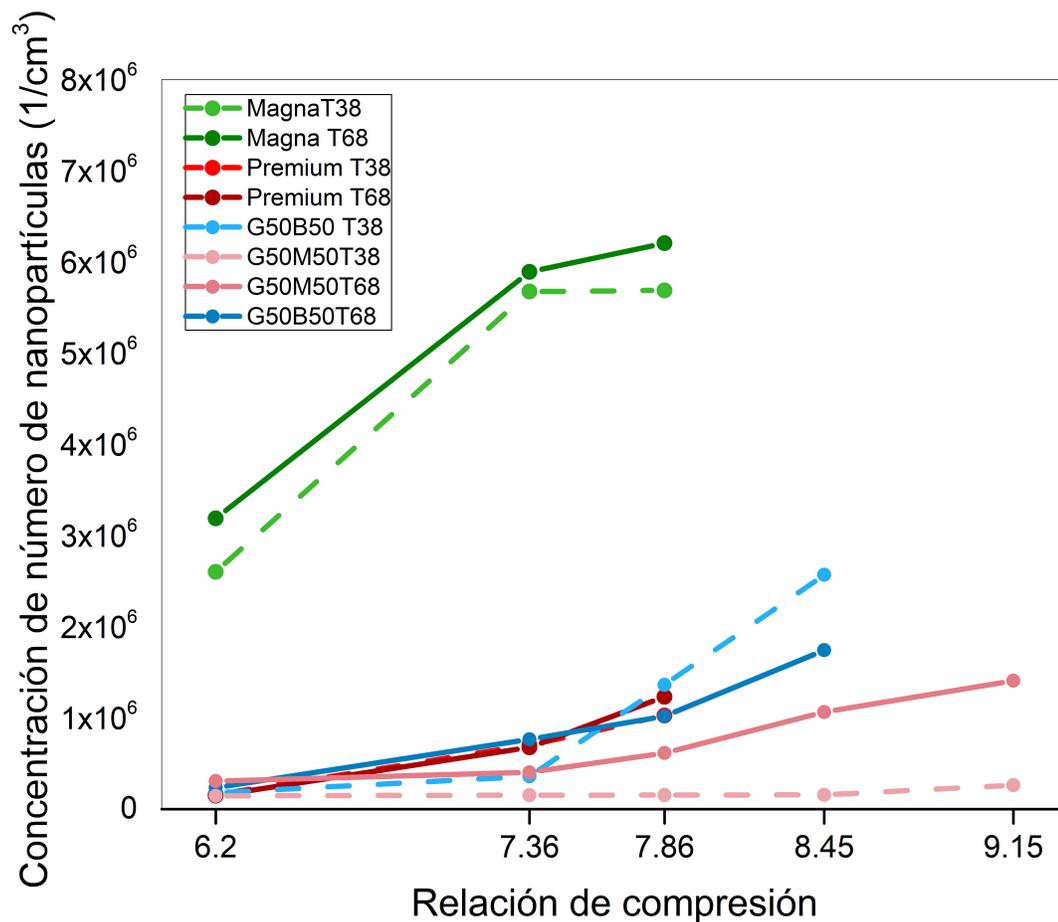


FIGURA 4.11: Comportamiento de la media armónica de la concentración de NP - Mezclas con 50 % de gasolina regular y 50 % de alcohol.

Esta gráfica sufre también de cambios en el eje de las X por la razón explicada anteriormente, sin embargo, para la mezcla GM50M50 fue posible experimentar hasta la RC 9.15, disminuyendo solo 1 RC, mientras que la mezcla con contenido

de butanol (GM50B50) se experimentó solamente hasta RC 8.45 al igual que en las mezclas expuestas anteriormente, reduciendo 2 RC.

La mezcla G50B50 muestra un comportamiento similar a GP100, en los valores de H para la concentración de las NP en (T_{adm}) de 68°C con valores ligeramente más pequeños en RC 7.86, mientras que en la (T_{adm}) de 38°C se observan valores similares para RC 6.2, menores en RC 7.36 y mayores en RC 7.86 a comparación de GP100 sin importar la (T_{adm}) de este último. La comparación entre las (T_{adm}) de 38 y 68°C para GM50B50 no demuestra un aumento lineal, pero si una relación entre el aumento de RC y concentración de NP emitidas. Para las RC 6.3 y 7.36 las concentraciones en (T_{adm}) de 38°C son menores a las de (T_{adm}) de 68°C, y en las RC 7.86 y 8.45 se invierte el comportamiento de los valores aumentando en (T_{adm}) de 38°C frente a la (T_{adm}) de 68°C.

La mezcla G50M50 muestra tendencias claras en la relación que hay entre el aumento de RC y aumento en la concentración de NP, de la misma manera cuando la (T_{adm}) aumenta de 38°C a 68°C. El único valor que sobrepasa los valores de GP100 es el que esta bajo las condiciones de (T_{adm}) 68°C y RC 6.2 mientras que todos los demás tienen un comportamiento menor en concentración de NP con relación a GP100.

De manera general en las comparaciones de las gráficas de ambas mezclas frente a las de ambas gasolinas muestran concentraciones con valores mucho menores a GM100 y cercanas a GP100, inclusive por debajo de los estos, tal es el caso de la mezcla GM50M50 a excepción de la RC 6.2 y (T_{adm}) 68°C. Además se observa que los valores de la mezcla con metanol (GM50M50) son menores a los valores de concentración emitidos por la mezcla con butanol (GM50B50).

4.3 RESULTADOS DE LAS CURVAS DE PRESIÓN EN CÁMARA OBTENIDAS EXPERIMENTALMENTE PARA CADA TIPO DE COMBUSTIBLE Y SUS RELACIONES DE COMPRESIÓN CONFORME LA ASTM D2700

El ciclo Otto es asociado al funcionamiento de los MEP el rendimiento térmico aumenta con la relación de compresión [17, 91]. Acorde a esto y a la ASTM D2700 [80], que indica el procedimiento para obtener el MON con relación a la RC y el ángulo del cigüeñal donde se lleva a cabo el inicio de la chispa antes del PMS ligados a la potencia y par generado por medio del motor [17, 71, 72] se realiza un análisis de las presiones en cámara como se explicó en la Sección 3.2.5.

Las Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 muestran el comportamiento de la presión en cámara de combustión para cada elemento de la matriz experimental en ambas (T_{adm}) a distintas RC. Como primera observación general se concluyen 3 afirmaciones válidas para todas las figuras:

1. La primera es la relación que existe es entre el aumento de RC y el aumento en la presión en cámara, válido para ambas (T_{adm}).
2. La segunda es que los picos de presión disminuyen cuando la (T_{adm}) aumenta de 38 a 68°C, válido para todas las RC en que se experimentó cada elemento.
3. La tercera es una mayor magnitud en la pendiente de la curva a mayor RC.

Estas aseveraciones son similares a las registradas en [77].

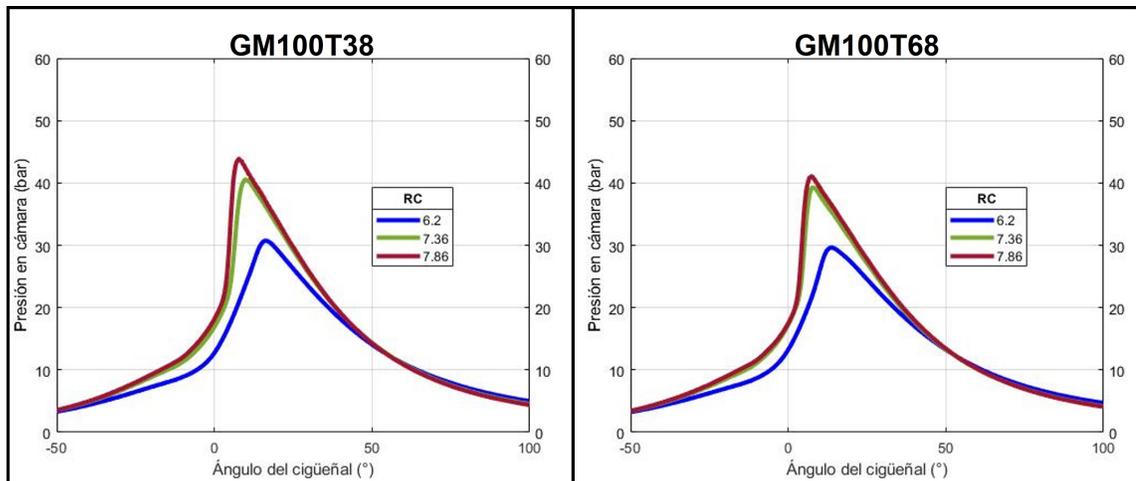


FIGURA 4.12: Presión en cámara de combustión con gasolina magna pura a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.

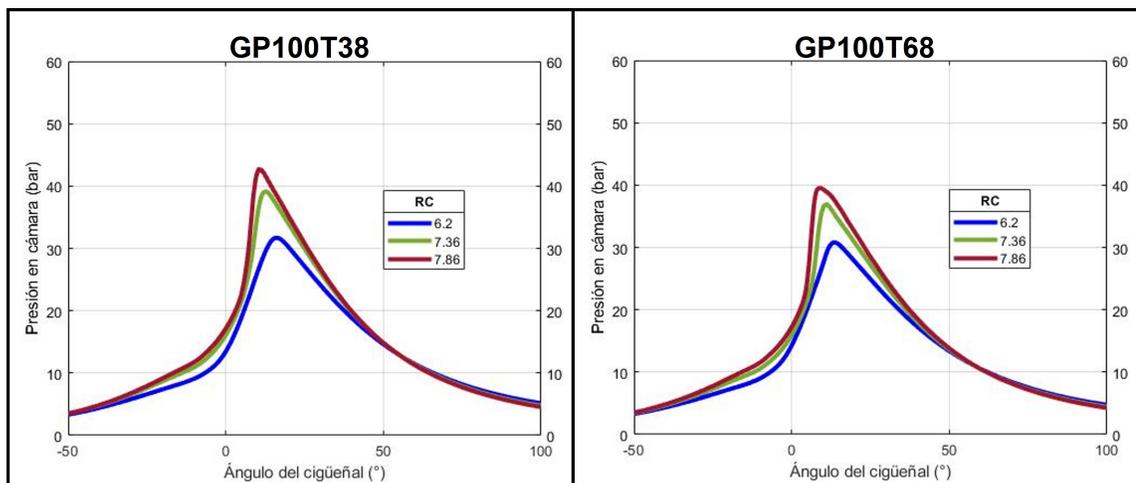


FIGURA 4.13: Presión en cámara de combustión con gasolina premium pura a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.

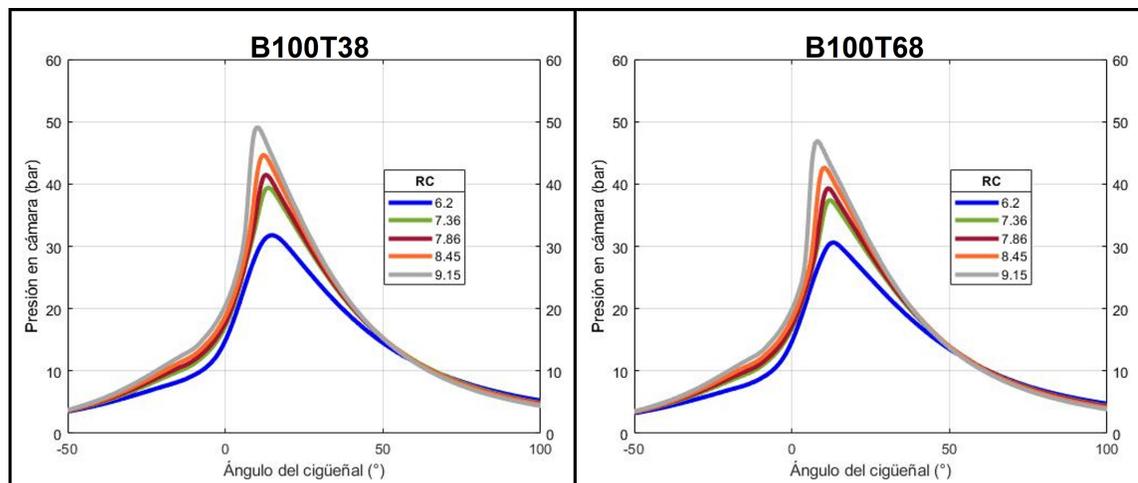


FIGURA 4.14: Presión en cámara de combustión con butanol puro a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.

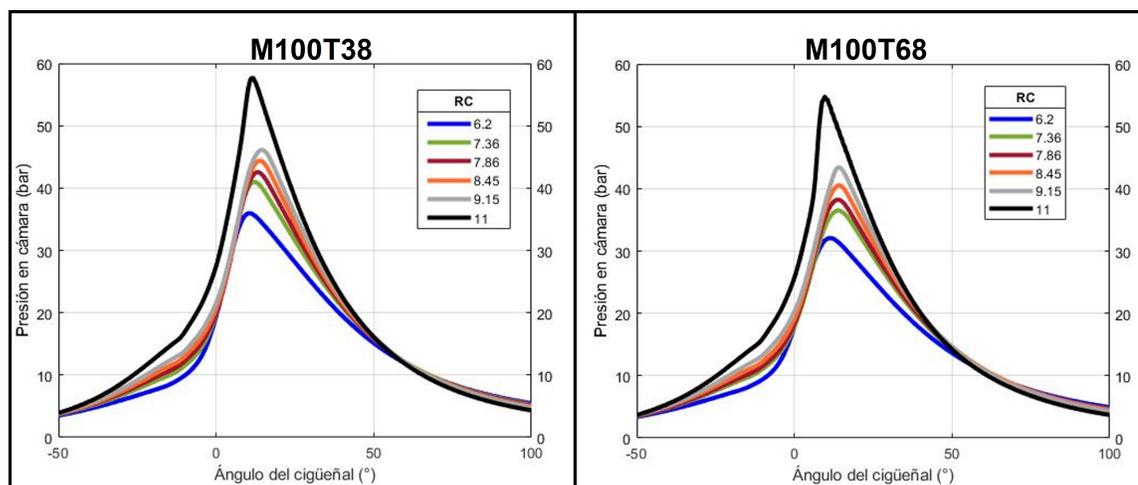


FIGURA 4.15: Presión en cámara de combustión con metanol puro a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.

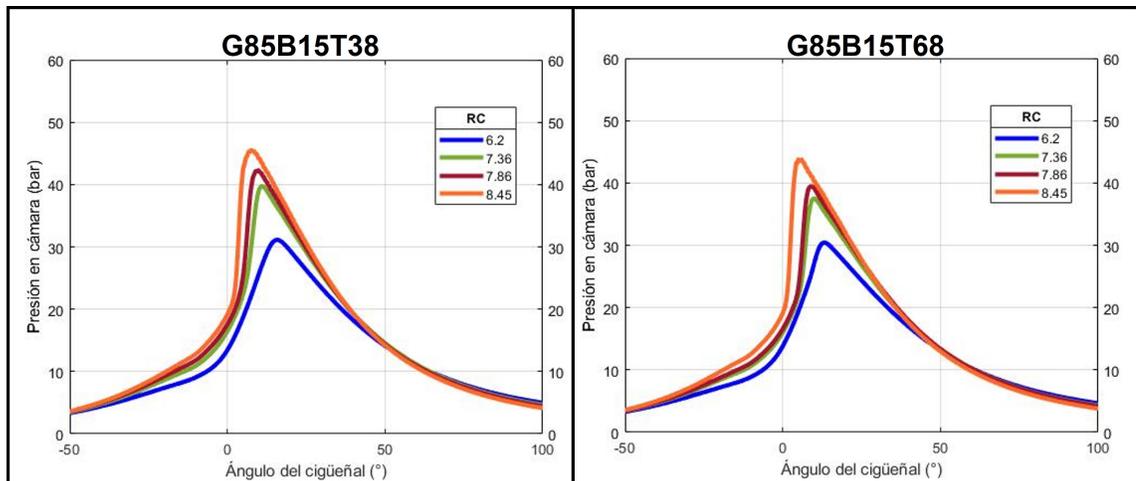


FIGURA 4.16: Presión en cámara de combustión con gasolina magna al 85 % y butanol al 15 % a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.

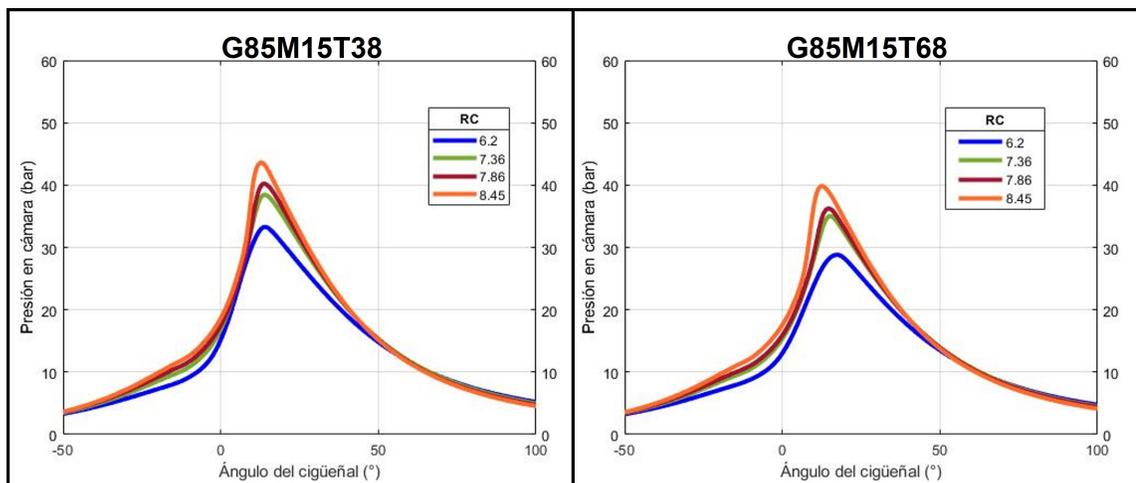


FIGURA 4.17: Presión en cámara de combustión con gasolina magna al 85 % y metanol al 15 % a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.

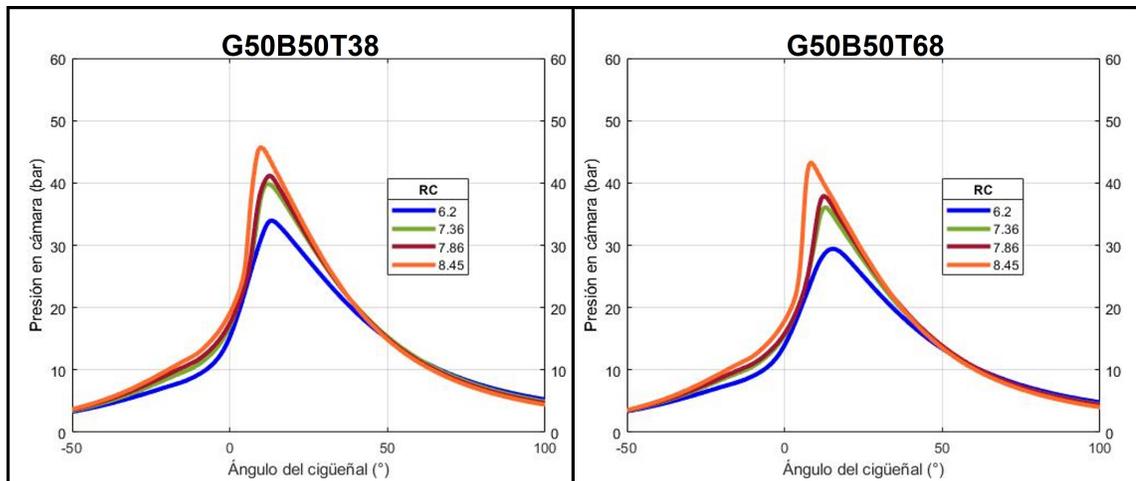


FIGURA 4.18: Presión en cámara de combustión con gasolina magna al 50 % y butanol al 50 % a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.

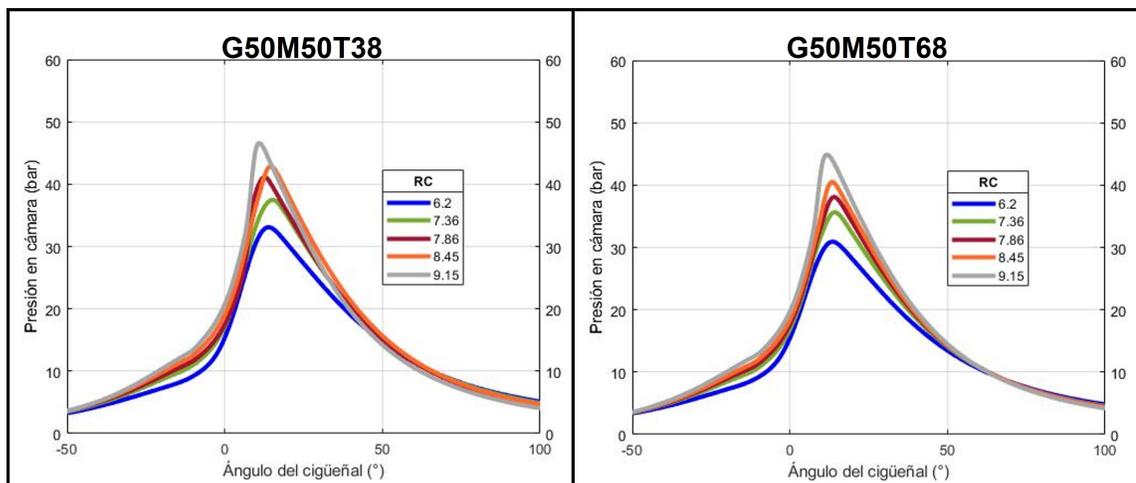


FIGURA 4.19: Presión en cámara de combustión con gasolina magna al 50 % y metanol al 50 % a distintas relaciones de compresión y temperaturas de aire de admisión.

4.3.1 RESULTADOS ÍNDICE DE AUTOIGNICIÓN

El índice de autoignición esta relacionado directamente con el octanaje del combustible y la RC, sin embargo, la estequiometría de AFR, el retraso en la chispa y el calor latente de evaporización del combustible también están ligados a este fenómeno [91]. Debido a esto, los alcoholes puros muestran valores en menor magnitud en máximos y promedios en el índice de autoignición, sin importar la (T_{adm}), a pesar que el butanol tiene un índice de octano de 87, igual al de la gasolina regular y menor en comparación a la gasolina premium (91 octanos), mientras que el metanol (98.6 octanos) cuenta con el mayor índice de octano entre los 4 combustibles puros.

4.3.1.1 VALORES MÁXIMOS EN ÍNDICE DE AUTOIGNICIÓN.

Las Figuras 4.20 y 4.21 representan los máximos valores registrados para el índice de autoignición, en condiciones de operación con (T_{adm}) a 38 y 68°C respectivamente. Ambas Figuras se subdividen en 3 gráficos nombrados en orden alfabético. El gráfico A) corresponde a los combustibles puros (gasolinas y alcoholes). El gráfico B) corresponde a las mezclas de combustibles con un 85 % de gasolina y 15 % de alcohol contenido en volumen. El gráfico C) corresponde a las mezclas de combustibles con un 50 % de gasolina y 50 % de alcohol contenido en volumen. Esta nomenclatura es válida para ambas Figuras. El rango en medición para los índices máximos de autoignición se observa hasta los 700 kPa.

En los 3 gráficos representados en la Figura 4.20 se observa la GM100 con los índices de autoignición con indicadores en mayor grado para los valores de relación de compresión, en comparación de los demás combustibles, mientras que el M100 y las mezclas con metanol al 15 y 50 % de contenido en volumen, muestran los valores de menor magnitud. El caso del butanol, su uso puro y mezcla del 50 % presenta menores valores de autoignición que ambas gasolinas, aunque la mezcla de 15 % toma valores similares a los de la GP100, además muestra un incremento fuerte en la RC

de 8.45 al compararse con la mezcla metanol al 15 %. Esta Figura hace referencia a los valores de máximo índice de autoignición para una (T_{adm}) de 38°C.

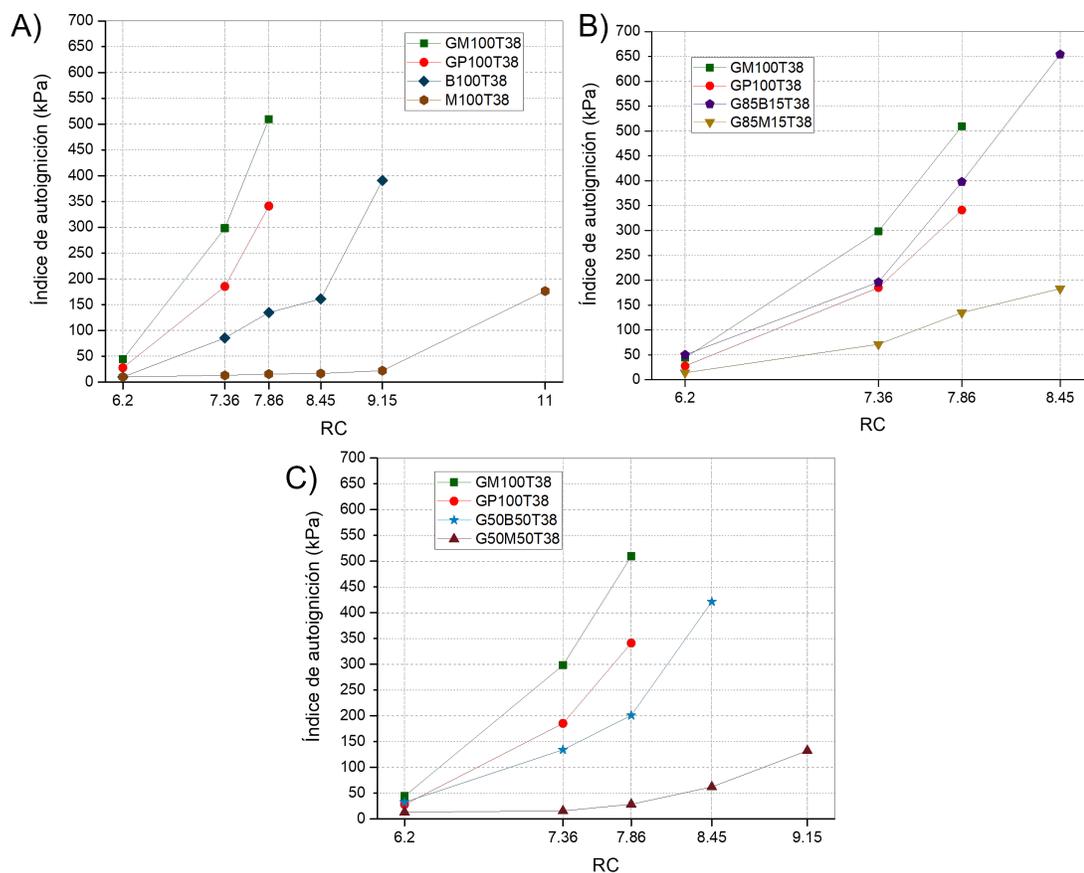


FIGURA 4.20: Gráficas de línea y marcador: valores máximos para índice de autoignición con (T_{adm}) de 38°C. A) Gasolinas y alcoholes puros. B) Gasolinas y mezclas con 15 % contenido de alcohol. C) Gasolinas y mezclas con 50 % contenido de alcohol.

La Figura 4.21 muestra los valores máximos del índice de autoignición para cada elemento de la matriz, con una (T_{adm}) de 68°C . Las tendencias percibidas en el comportamiento de la autoignición a la temperatura de 38 se presentan de manera similar cuando la temperatura sube a 68. Cuando la mezcla contiene 15 % de butanol se presenta un menor valor a la RC de 6.2 comparado a la gasolina premium. Es observable que el incremento de la temperatura de admisión propicia condiciones para que se presenten valores de autoignición superiores.

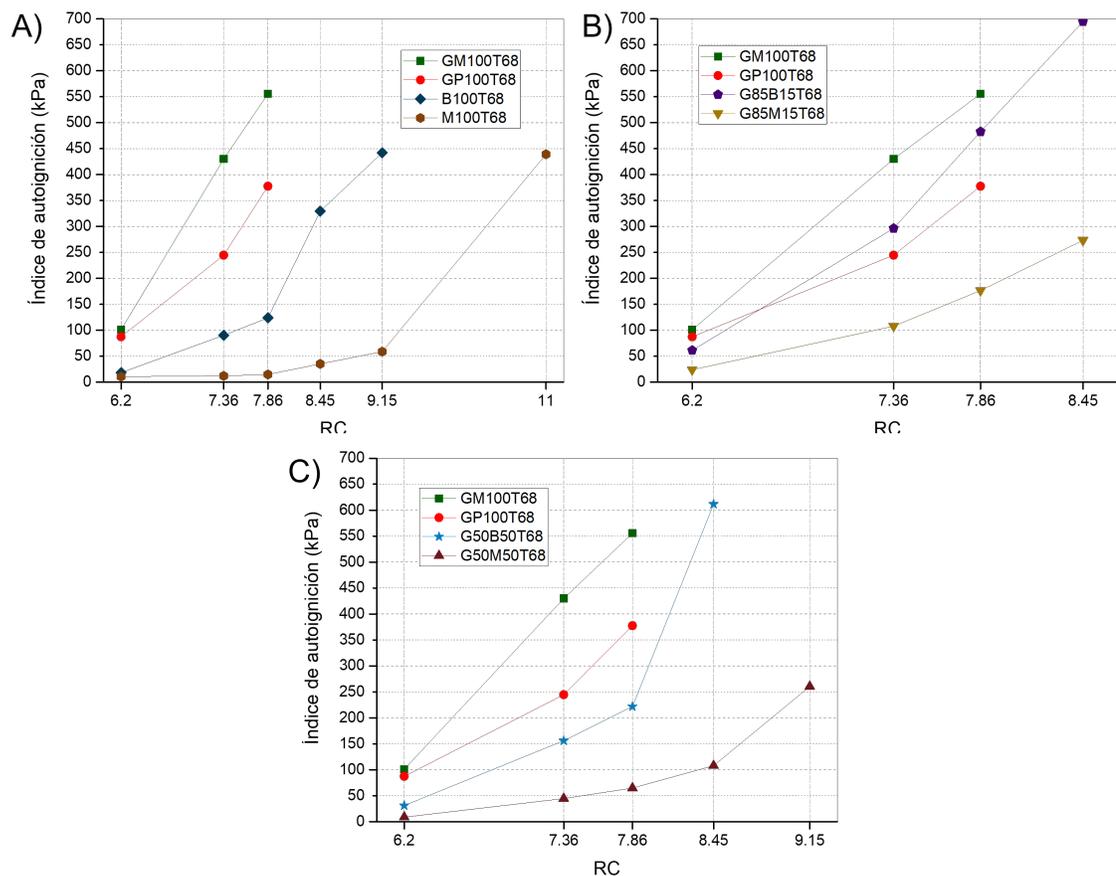


FIGURA 4.21: Gráficas de línea y marcador: Valores máximos para índice de autoignición con (T_{adm}) de 68°C . A) Gasolinas y alcoholes puros. B) Gasolinas y mezclas con 15 % contenido de alcohol. C) Gasolinas y mezclas con 50 % contenido de alcohol.

4.3.1.2 VALORES PROMEDIO EN ÍNDICE DE AUTOIGNICIÓN.

Las Figuras 4.22 y 4.23 representan los valores promedio registrados para el índice de autoignición, en condiciones de operación con (T_{adm}) a 38 y 68°C respectivamente. Ambas Figuras se subdividen en 3 gráficos ordenados alfabéticamente. El gráfico A) corresponde a los combustibles puros (gasolinas y alcoholes). El gráfico B) corresponde a las mezclas de combustibles con un 85 % de gasolina y 15 % de alcohol contenido en volumen. El gráfico C) corresponde a las mezclas de combustibles con un 50 % de gasolina y 50 % de alcohol contenido en volumen. Esta nomenclatura es válida para ambas Figuras. El rango en medición para los índices promedio de autoignición se observa hasta los 350 kPa.

Los valores promedio del índice de autoignición con (T_{adm}) de 38°C son representados en los gráficos de la Figura 4.22.

Existe un comportamiento similar del valor de autoignición promedio, donde las gasolinas puras presentan valores superiores a los alcoholes puros. Siendo importante puntualizar que para el M100 la autoignición es casi despreciable, por lo tanto a un mayor porcentaje de alcohol presente disminuye la magnitud en el promedio de los valores del índice de autoignición. El gráfico B) muestra valores de GM85B15 mayores que los de GP100 y menores a los de GM100. Un menor porcentaje de alcohol aumenta los valores en las mezclas de metanol y butanol en comparación de las gráficas A) y C).

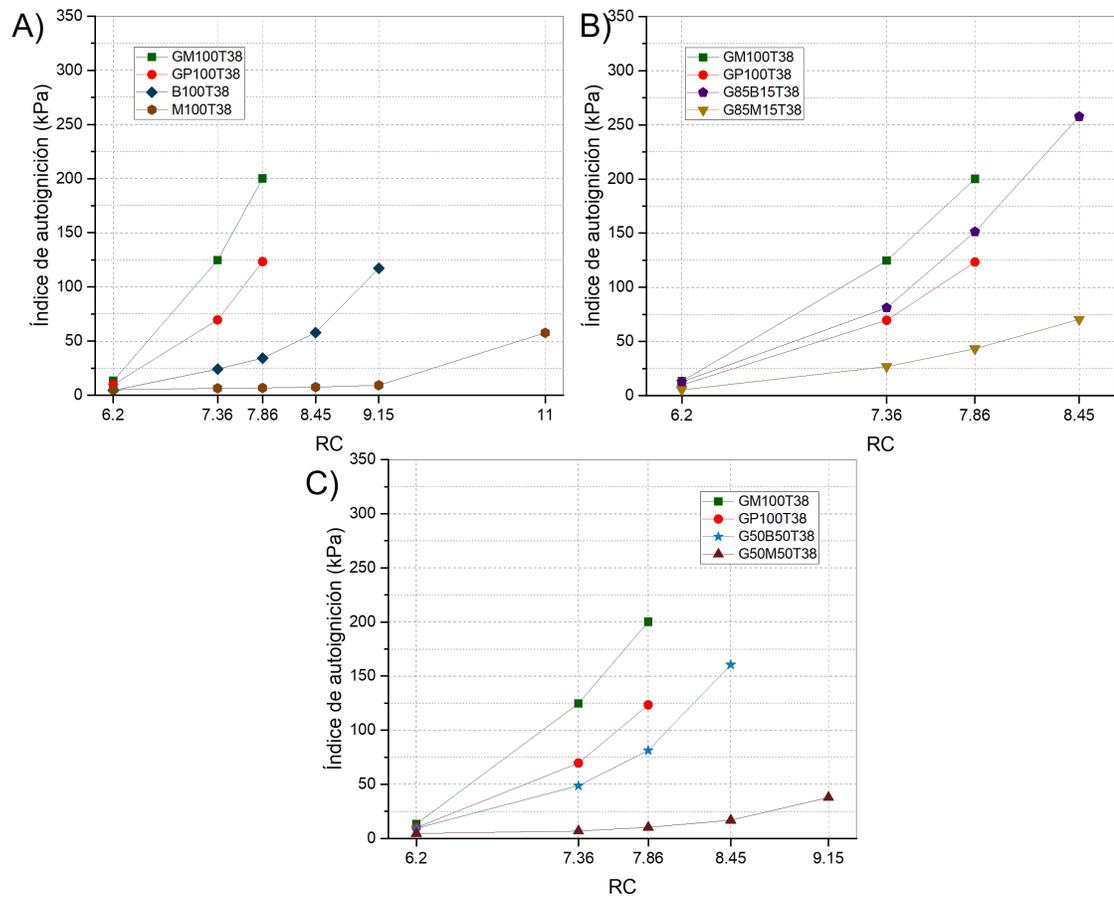


FIGURA 4.22: Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para índice de autoignición con (T_{adm}) de 38°C. A) Gasolinas y alcoholes puros. B) Gasolinas y mezclas con 15% contenido de alcohol. C) Gasolinas y mezclas con 50% contenido de alcohol.

La Figura 4.23 muestra los valores promedio de intensidad de autoignición para una (T_{adm}) de 68°C. Los valores para una (T_{adm}) mayor muestran ser mayores, por lo que hay una dependencia del aumento en el índice de autoignición medio con el aumento en la (T_{adm}). De manera similar a la temperatura de admisión de 38 °C se observa una tendencia relacionada a la cantidad de alcohol, donde su incremento reduce la intensidad de autoignición.

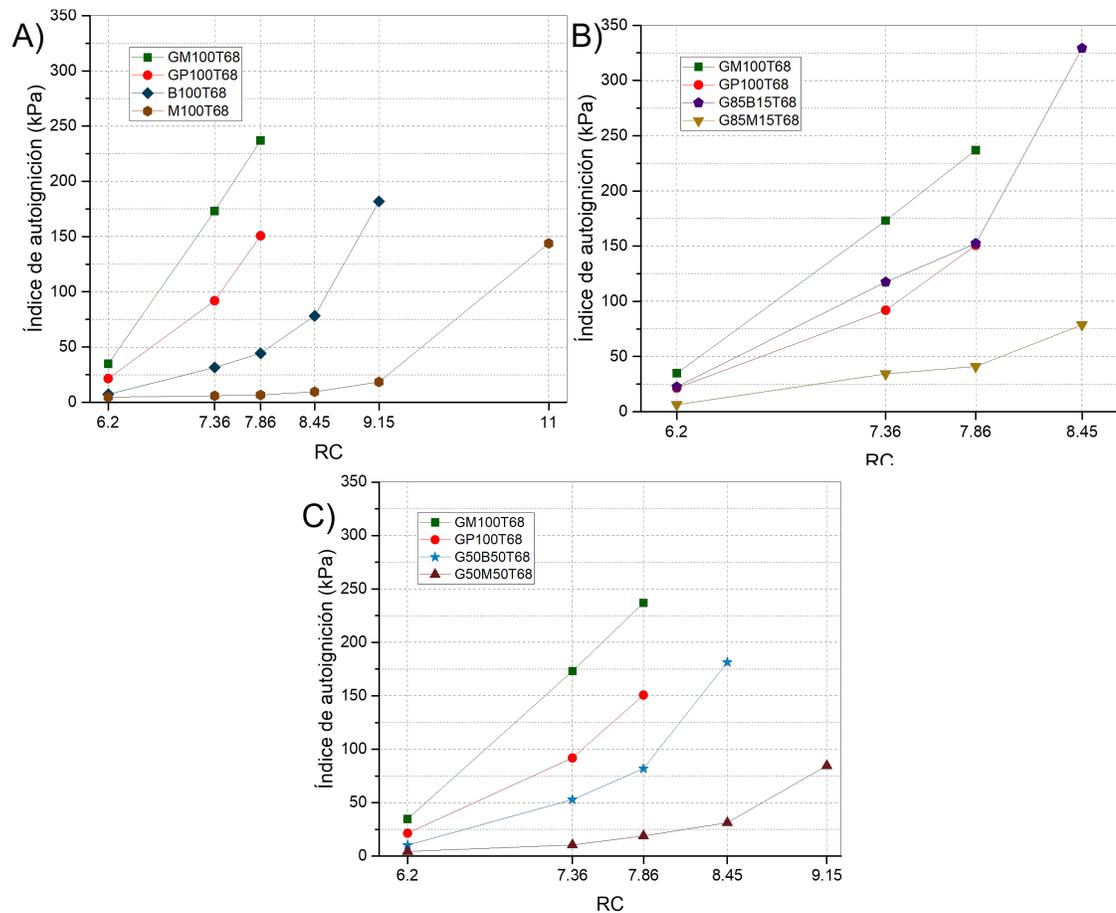


FIGURA 4.23: Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para índice de autoignición con (T_{adm}) de 68°C . A) Gasolinas y alcoholes puros. B) Gasolinas y mezclas con 15 % contenido de alcohol. C) Gasolinas y mezclas con 50 % contenido de alcohol.

4.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE GASES

Como se mencionó en el subcapítulo referente a la instalación experimental, los analizadores fueron conectados directamente a la tubería de escape sin ningún catalizador de 3 o 4 vías, por lo que el análisis de resultados esta conformado por datos sin filtraciones o transformaciones fisico-químicas post combustión.

4.4.1 RESULTADOS DE LAMBDA Y OXÍGENO

La medida del oxígeno refleja la reacción de la mezcla y hasta cierto punto puede dar una idea de la homogeneidad de la misma dentro del cilindro en un motor de encendido provocado. La eficiencia de la reacción del oxígeno con el combustible en las gasolinas, alcoholes y mezclas varía según el valor puntual del dosado estequiométrico, relacionado directamente a la cantidad de oxígeno presente en la constitución química del combustible. La GM100 y GP100 mantienen los valores estables en las 3 relaciones de compresión con (T_{adm}) 38, aunque menores para la GP100, mientras que la (T_{adm}) 68 muestra una disminución cuando la RC aumenta de 6.2 a 7.36 manteniéndose estable en 7.86, válido para ambas gasolinas. El alcohol M100 a (T_{adm}) 38 no presenta un patrón destacado de aumento o disminución del % presente mientras aumenta la RC, al contrario de la (T_{adm}) 68, donde se observa un aumento del oxígeno al mismo tiempo del aumento en RC. Los resultados del B100 no muestran relación entre el % de oxígeno y la RC en ambas (T_{adm}) . La mezcla G85M15 muestra una estabilidad relativa entre el % de oxígeno y el aumento en RC para la (T_{adm}) 38, frente a la (T_{adm}) 68 donde se observa la disminución del oxígeno cuando aumenta la RC. La mezcla G50M50 no muestra relación entre el aumento de RC y el % de oxígeno, en la (T_{adm}) 38, mientras que en la (T_{adm}) 68 se observa un aumento considerable al aumentar la RC 6.2 a 7.36 y estabilizarse en ese valor en las demás RC. Las mezclas con butanol presente al 15 % muestran una relativa estabilidad en los % de oxígeno para ambas (T_{adm}) y todas las RC, contrario en G50B50. Los resultados se ilustran en las gráficas de la Figura 4.24, además se encuentran en los apéndices D.1 y D.2.

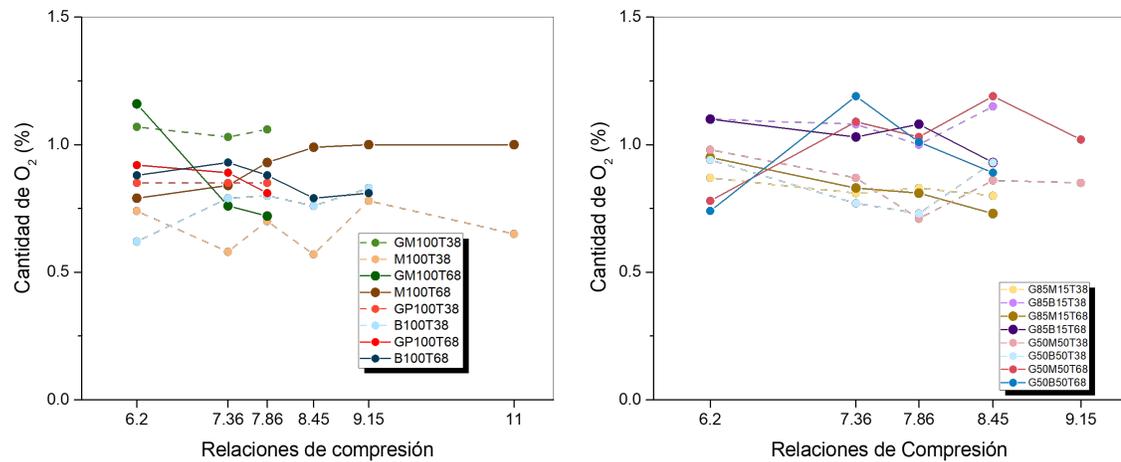


FIGURA 4.24: Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para emisiones de Oxígeno.

La estabilización del lambda fue realizada manualmente como se explicó en la subsección de condiciones de operación, por lo que la amplitud de los resultados es pequeña en torno a 1. Los resultados se ilustran en las gráficas de la Figura 4.25, además se encuentran en los apéndices D.3 y D.4.

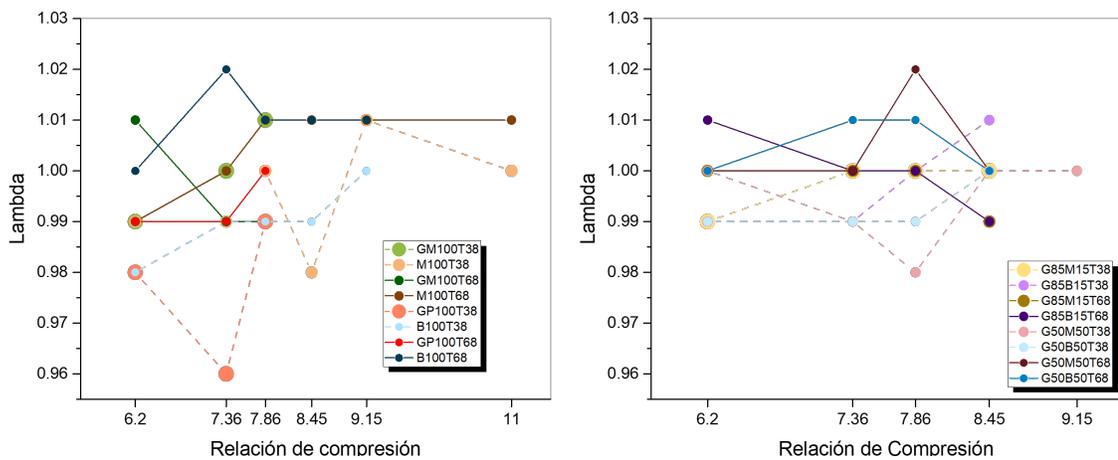


FIGURA 4.25: Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para emisiones de Lambda.

4.4.2 RESULTADOS DE LA CONCENTRACIÓN DE MASA DE LAS PARTÍCULAS

Los resultados de la concentración de masa de las partículas medidos en mg/m^3 relacionan el aumento de estas emisiones con el aumento en la relación de compresión en las 2 gasolinas, los 2 alcoholes y las 4 mezclas, además de aumentar estos valores cuando la (T_{adm}) aumenta de 38 a 68 para ambas gasolinas y M100, no así en B100 donde se observan mayores concentraciones en (T_{adm}) de 38. Las mezclas muestran una mayor concentración de masa cuando la (T_{adm}) es de 38 a comparación de los resultados de la (T_{adm}) 68. Las mezclas con concentraciones de alcohol al 50% y los 2 alcoholes puros muestran tener valores mas bajos que la GM100 y GP100, teniendo menores concentraciones en la magna a comparación de la premium, mientras que GM85B15 se asimila a GP100 y G85M15 aumenta el rango al doble con referencia a GP100, esto en la (T_{adm}) 38. Por otro lado, la (T_{adm}) 68 muestra lo inverso entre la comparación de GM100 y GP100, con valores mas altos para la magna, los 2 alcoholes puros y las 4 mezclas reflejan valores menores en concentración a comparación de las gasolinas. Los resultados se ilustran en las gráficas de la Figura 4.26 y pueden consultarse en los apéndices D.5 y D.6.

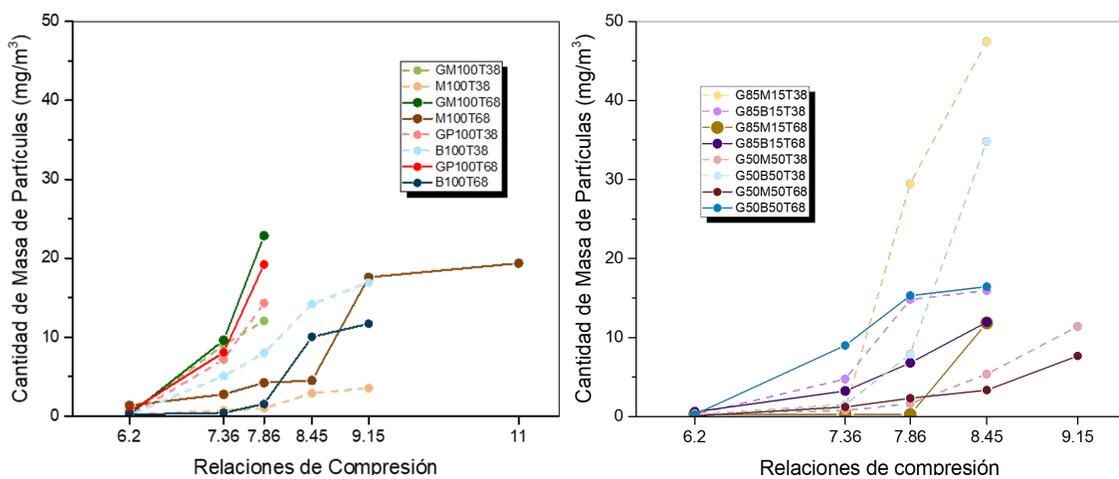


FIGURA 4.26: Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para emisiones de la concentración de masa de partículas.

4.4.3 RESULTADOS DE CO Y CO₂

Los resultados obtenidos en el parámetro CO y CO₂ son presentados en porcentajes. Los combustibles puros no presentan alguna relación entre RC, cambio en la (T_{adm}) y porcentaje de emisión. El metanol puro arroja menores porcentajes de emisión, seguido del butanol y a comparación de ambas gasolinas, el cual la premium arroja mayores porcentajes de emisión de CO en la (T_{adm}) 38, en cambio, la (T_{adm}) 68 aunque se define a partir de la RC 7.36, el butanol obtiene menores porcentajes de emisión, seguido del metanol, la gasolina regular y la gasolina premium con mayor emisión de CO. Las mezclas tampoco muestran una relación entre el porcentaje de emisión, la (T_{adm}) o la RC, sin embargo, en la RC 6.2 en (T_{adm}) de 38 las 4 mezclas arrojan valores menores a los de GM100, contrario a lo que se observa en las RC 7.36 y 7.86 donde los resultados se invierten, en esta (T_{adm}) la mezcla con 15% de metanol muestra menores valores de emisión. Las mezclas en (T_{adm}) 68 arrojan resultados con valores similares a los de la (T_{adm}) 38, y aunque la mezcla G85M15 en la RC 6.2 muestra valores similares a los de GM100, en las RC consiguientes disminuyen, siendo esta mezcla la que emite menores porcentajes de CO a comparación de las otras 3. Los resultados se ilustran en las gráficas de la Figura 4.27 y pueden consultarse en los apéndices D.9 y D.10.

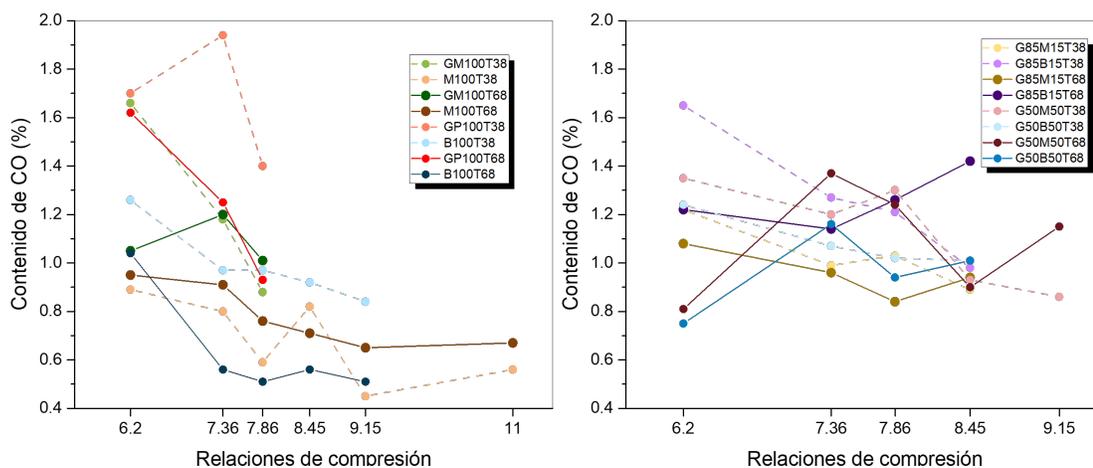


FIGURA 4.27: Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para CO.

Los resultados en porcentaje de emisión de CO₂ rondan valores entre 13, esto genera una nula relación entre la RC, la (T_{adm}) y el porcentaje de emisión. Los resultados se ilustran en las gráficas de la Figura 4.28 y pueden consultarse en D.11 y D.12.

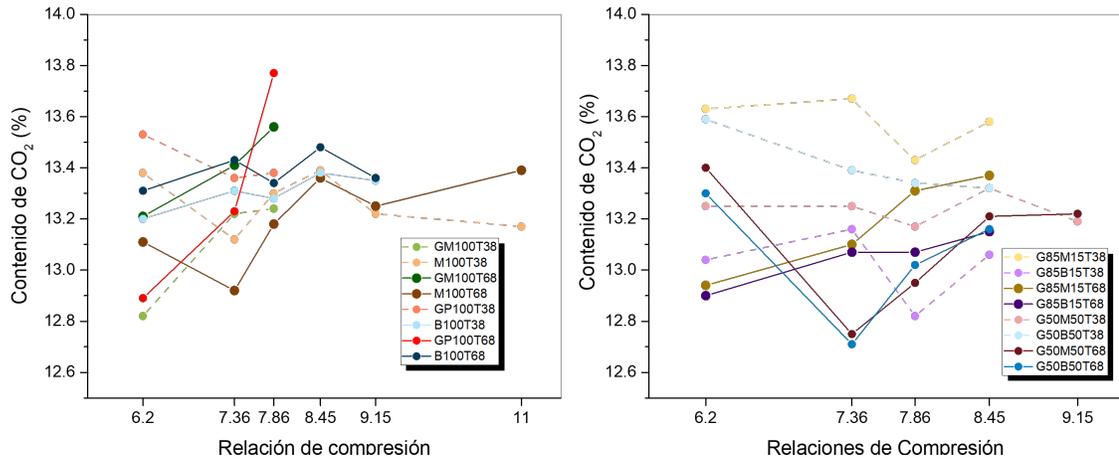


FIGURA 4.28: Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para CO₂.

4.4.4 RESULTADOS DE LOS NO_x

Las emisiones registradas fueron medidas en ppm. Los combustibles puros arrojan resultados con relación entre el aumento de RC y aumento en la emisión de NO_x, también una relación entre el aumento de (T_{adm}) de 38 a 68 y el aumento de ppm. La relación entre el aumento de RC y ppm se observa en las 4 mezclas mientras la (T_{adm}) prevalece en 38, en las mezclas con contenido del 50% de alcohol el aumento en la emisión de NO_x se relaciona con el aumento en la (T_{adm}), contrario a lo que sucede en las mezclas con 15% presente de alcohol, donde la (T_{adm}) mayor muestra menores ppm. El metanol puro, así como las mezclas que lo contienen, muestran disminución en la emisión de este parámetro. Los resultados se ilustran en las gráficas de la Figura 4.29 y pueden consultarse en los apéndices D.13 y D.14.

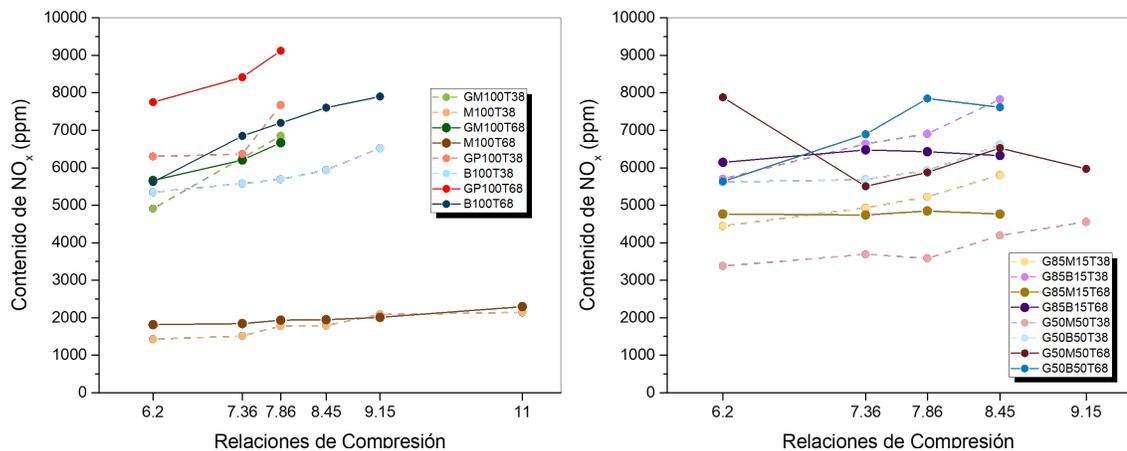


FIGURA 4.29: Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para NO_x.

4.4.5 RESULTADOS DE HIDROCARBUROS

El análisis de los hidrocarburos sin quemar fue medido en ppm. Para los combustibles puros, el metanol presenta una emisión mayor a comparación del B100, GM100 y GP100, respectivamente en ambas (T_{adm}) y todas las RC. En la (T_{adm}) 68 las gasolinas y el B100 muestran un aumento en la emisión de HC mientras aumenta la RC, mientras que en la (T_{adm}) 38 solo el B100 tiene este comportamiento, la mezcla G50M50 en general muestra los menores valores de las 4 mezclas, mientras que la G85B15 tiene los valores mas altos. En general las mezclas con metanol incluido presentan menores valores en comparación a los de ambas gasolinas y ambos alcoholes puros. Los resultados se ilustran en las gráficas de la Figura 4.30 y pueden consultarse en los apéndices D.7 y D.8.

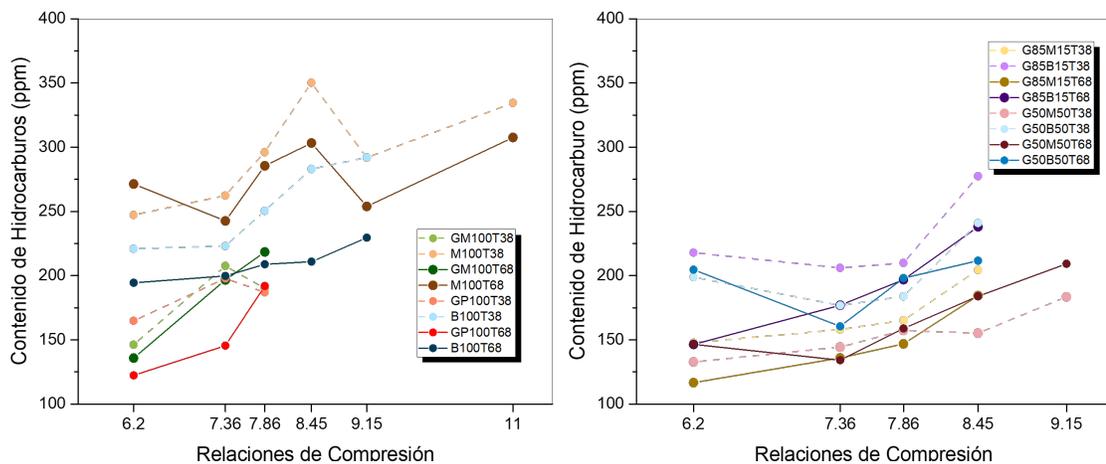


FIGURA 4.30: Gráficas de línea y marcador: Valores promedio para HC sin quemar.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Esta sección es dedicada a presentar las conclusiones de los resultados obtenidos por medio de comparación entre los fenómenos estudiados y la relación que pudiera o no existir entre ellos. Además, se hace mención de futuros experimentos que pudieran complementar la línea de investigación.

5.1 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN LA CONCENTRACIÓN DEL NÚMERO DE NANOPARTÍCULAS.

Trás el análisis de resultados de las medias armónicas se concluye:

1. La conclusión general entre los 4 combustibles puros (gasolinas y alcoholes) muestra una tendencia incremental en la media armónica de la concentración del número de NP cuando se aumenta la temperatura de aire de admisión, esto puede deberse a la disminución en la densidad del aire que se admite en la mezcla, aumentando su pobreza cuando la (T_{adm}) aumenta, lo que provoca combustiones incompletas y con mayores precursores para la formación de NP.
2. En segundo lugar que el porcentaje de alcohol presente en la mezcla tiene una injerencia directa en la emisión de la concentración del número de nanopartículas entre mezclas con los mismos componentes, sin importar la temperatura de aire de admisión ni la relación de compresión experimentadas en este estudio, siendo así que las mezclas con contenido de 50 % de alcohol en volumen presente disminuye drásticamente los valores obtenidos de la media armónica de la concentración del número de NP frente a la mezcla con contenido de 15 % de alcohol contenido. Una explicación para este fenómeno es la cantidad de oxígeno disponible que hay en la mezcla de gasolina y alcohol, al cambiar la estructura química de la mezcla. El alcohol contiene un grupo radical hidróxilo que aporta un átomo de oxígeno en la mezcla, además, la relación estequiométrica de aire combustible también disminuye. Otro efecto directo que hace presente es una combustión mas completa debido a la mayor cantidad de oxígeno que reacciona con el combustible, mejorando la eficiencia volumétrica al requerir una menor cantidad de aire para realizar la combustión, relacionado directamente a la AFR.

3. Como tercera conclusión se determina que la estructura química del alcohol influye en la concentración del número de nanopartículas. El metanol (CH_3OH) en la mezcla del 50 % presenta valores menores de la media armónica a comparación con el butanol ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$) en la mezcla de 50 %. La fórmula química del metanol contiene número de átomos de carbono menores frente al número de átomos que presenta el butanol. Esto es ligado directamente a productos de combustión con mayores contenidos de carbono presentes en las emisiones, por lo que fomenta el aumento la formación de nanopartículas al ser un precursor de ellos.
4. Las mezclas con contenidos del 15 % de alcohol muestran comportamientos sin una tendencia clara en cuanto a los valores de media armónica. En estas mezclas pudo haber influenciado la entalpía de vaporización, donde el butanol presenta valores mas altos a comparación de los valores con los que cuenta el metanol, lo que indica una pobre relación cuando se combina con gasolina regular que contiene la menor entalpía de vaporización de los combustibles estudiados.
5. La comparación entre gasolinas muestra una tendencia directa en la relación que hay entre el octanaje y la relación de compresión con la concentración del número de nanopartículas emitidas. Contrario a lo que se revisó en la literatura [61, 82], los niveles de aromáticos en este experimento no presentan una influencia en el aumento del número de nanopartículas. La gasolina premium cuenta con un índice de octanaje de 92 y un porcentaje de 43.36 en aromáticos frente a la gasolina regular con solo 87 y 38.61 % de aromáticos. Se presenta además una relación directa cuando la temperatura de aire de admisión aumenta y el efecto knock hace presencia, sin embargo, las RC 6.2 y 7.36 para GP100 son ligeramente mayores en (T_{adm}) de 38°C .
6. La importancia del octanaje frente a la emisión de NP no muestra una relación con los alcoholes puros. Los valores de H muestran una tendencia de menor emisión para el butanol frente al metanol, a pesar del octanaje menor del B100.

5.2 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA PRESIÓN EN CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

1. Existe una relación directa cuando aumenta la temperatura de aire de admisión, presentando valores menores de presión en la cámara cuando la (T_{adm}) es de 68°C, debido a la disminución de densidad que se presenta cuando se eleva su temperatura por la adquisición de calor que genera las resistencias. Estos resultados contrastan con las medias armónicas del número de nanopartículas, dónde a mayor temperatura de admisión hay mayor concentración de NP pero se relacionan por medio de la disminución de la densidad, debido a una menor cantidad de oxígeno presente.
2. Los valores en aumento de la relación de compresión se relacionan directamente con el aumento de la presión debido a un menor volumen en la cámara de combustión. Esta afirmación es válido para todos los elementos de la matriz experimental, sin embargo, no presenta un crecimiento líneal debido a las propiedades termodinámicas de cada combustible.
3. La pendiente en la curva de presión se acentúa conforme aumenta la RC, aunque se debe principalmente a la adición de alcohol en la mezcla con gasolina magna y el retardo en el ángulo de chispa, por lo tanto la combustión se genera en un tiempo menor.
4. La gasolina magna muestra un incremento superior a los demás combustibles cuando las RC son 7.36 y 7.86, al igual que el número de nanopartículas, aunque comienza con presiones similares a los otros combustibles en la RC 6.2, sin importar la (T_{adm}). Este efecto puede considerar la media del índice de autoignición como factor importante para el aumento de presión en cámara y un valor bajo de entalpía de vaporización.

5.3 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE AUTOIGNICIÓN

1. La temperatura de aire de admisión presenta una relación directa al índice de autoignición, siendo así que al aumentar la (T_{adm}) aumenta la presencia de autoignición. Esta afirmación es válida para valores medios y máximos de todos los elementos de la matriz experimental en operación de todas las RC. Además existe una relación directa entre el índice de autoignición y el aumento en el número de partículas. Debido a esto se concluye que una combustión ineficiente con altos valores en índice de autoignición propician la formación de nanopartículas, lo que aumenta la concentración en número de las mismas.
2. Existe un crecimiento proporcional en la relación de compresión y el índice de autoignición, esta relación se presenta en todos los elementos de la matriz experimental y ambas (T_{adm}).
3. La RC 6.2 en ambas (T_{adm}), no presenta índices de autoignición considerados dañinos para el mecanizado del motor. Todos los elementos presentan índices de autoignición menores a 50kPa.
4. La comparación entre gasolinas presenta una fuerte dependencia del octanaje, en el cual, la gasolina premium tiene valores del índice de autoignición menores debido a un valor de 91 en el índice de octano, frente regular.
5. El octanaje tiene un papel fundamental para la reducción del índice de autoignición cuando sucede el incremento en la relación de compresión y es válido para todos los elementos de la matriz experimental. Esto a su vez, reduce la concentración del número de nanopartículas cuando se compara la gasolina premium frente a la gasolina magna.
6. Tras la comparación entre los 4 combustibles puros se observa que el octanaje no es el único parámetro para la disminución del índice de autoignición, de-

bido a que el butanol con 87 octanos presenta menores valores a comparación de la gasolina premium. Una explicación a esto puede ser la facilidad para el desplazamiento de llama al estar presente una mayor cantidad de átomos de oxígeno en la mezcla de combustible y un mayor valor en la entalpía de vaporización, que trae consigo un efecto de enfriamiento al ser inyectado. Aunque la concentración de nanopartículas disminuye en ambos alcoholes en comparación con la gasolina regular (exceptuando el elemento M100RC6.2T68), el butanol con número de octano menor al metanol también presenta menores concentraciones del número de nanopartículas, a pesar que el metanol tiene un índice de autoignición menor al butanol. Esto indica que en los alcoholes puros no influye directamente el octanaje o la relación Carbono-Hidrógeno.

7. El porcentaje de alcohol contenido en la mezcla influye directamente en el índice de autoignición. Es clara la reducción en el índice de autoignición cuando la mezcla contiene un 50 % de alcohol presente frente a las mezclas con 15 % de alcohol. Las propiedades que juegan un papel fundamental son el octanaje y la temperatura de la entalpía de vaporización, los cuales son mayores para ambos alcoholes sobre los valores de la gasolina. Por esto cuando el porcentaje de alcohol es chico no favorece en mucho la mezcla ya que los valores de gasolina son predominantes, mientras que al mediar la mezcla a un 50 %, los valores de octanaje y entalpía de vaporización podrían aumentar considerablemente, lo que refleja menores valores en el número de nanopartículas cuando las mezclas tienen valores de 50 % alcohol y 50 % gasolina magna.
8. Los alcoholes puros no presentan valores medios en el índice de autoignición mayores a 50 kPa en RC 6.2, 7.36 y 7.86. En el caso de M100 los valores siguen bajos en 9.15, mientras que en B100 aparece en esta RC, en ambas (T_{adm}).
9. El metanol y las mezclas que lo contienen son los que menores índices de autoignición presentan por lo tanto fueron llevados a condiciones de operación con RC mayores, aunque solo la mezcla con 50 % de metanol presenta menor emisión de NP en comparación con las otras mezclas.

5.4 CONCLUSIONES GENERALES DE LAS EMISIONES DE GASES

1. Los porcentajes de Lambda obtenidos como resultado muestran una correcta aplicación del aparato experimental y la mezcla estequiométrica. Los rangos menores a 0.05 de diferencia con el valor estequiométrico (1) en los experimentos realizados permiten la certeza de los resultados del número de partículas.
2. El porcentaje de oxígeno presente en los gases de escape es un indicador relacionado a la mezcla y quema del combustible dentro de la cámara de combustión, además, de la cantidad de oxígeno presente en la química del combustible. La (T_{adm}) 38 muestra valores de emisión sin cambios bruscos al aumentar la RC para cada elemento y puede ser relacionado con una mayor densidad del aire y una combustión mas limpia, con mejores rangos de oxidación al combustible. A pesar de una mejor oxidación cuando los porcentajes del oxígeno son bajos, no existe una relación con la concentración del número de nanopartículas directa.
3. La masa de las partículas muestra un incremento cuando la (T_{adm}) aumenta de 38 a 68 en ambas gasolinas y M100 puro, caso contrario para las mezclas y B100, donde no existe alguna relación. En el caso del aumento de RC y masa de partículas si existe relación directa, por lo que el efecto del índice de autoignición afecta directamente a la producción de masa de partículas. Esto puede ligarse al aumento de nanopartículas causadas por el mismo efecto, aunque las NP constituyen un porcentaje pequeño en toda la masa de partículas, muestran comportamientos en aumento similares.
4. Los valores de CO emitidos durante las pruebas reflejan el dosado estequiométrico, por lo tanto los bajos valores referencian un correcto cálculo y aplicación de la estequiometría para todas las pruebas. Con valores entre 0.5 y 2% no se observa alguna relación directa con la estructura química del combustible en el proceso de admisión, si no que llega haber una relación en mayor grado al

proceso de combustión y desarrollo de la llama, además los factores principales como la (T_{adm}) y la RC no muestran injerencia en los procesos de emisión, descartando así la relación alguna entre la emisión de CO y ambos factores. Por otro lado, el número de nanopartículas y la concentración de CO tienen relación nula.

5. El comportamiento de CO_2 en las gasolinas, los alcoholes puros y las mezclas se mantiene en porcentajes similares, con rangos que rondan el 13% en ambas (T_{adm}) y todas las RC, esto puede ser relacionado con las RPM a la que fue hecho el estudio. A pesar que el factor mas importante en la emisión de CO_2 es el tipo de combustible estos resultados no reflejan cambios considerables entre ellos. Por otro lado, la disminución entre los poderes caloríficos de los alcoholes y las mezclas frente a las gasolinas puras conlleva a un consumo másico superior de los primeros, lo que supone una igualdad en el porcentaje de emisión medido. No se observó relación entre el número de nanopartículas y el contenido de CO_2 .
6. Los NO_x (óxidos de nitrógeno) representan las fracciones sumadas de NO (óxido nítrico) y NO_2 (dióxido nítrico), con una conformación de NO mayor frente al NO_2 . Se observa un claro aumento cuando la (T_{adm}) pasa de 38 a 68, exceptuando GM100, esto es índice claro de la formación por medio del mecanismo en térmico. Además, se hace también presente la oxidación del nitrógeno en cadena debido a las mezclas de aire combustible en dosado estequiométrico y la formación por radicales OH presentes en los alcoholes. Aunque la emisión de NO_x en el M100 se observa en menor cantidad frente a los demás combustibles y mezclas, esto puede ser favorecido por el efecto cooling propio del combustible, el cual disminuye su formación por el mecanismo mencionado en primer lugar. Aunado a esto, se observa que al aumentar el porcentaje de alcohol en la mezcla este efecto prevalece, a comparación de las gasolinas, donde sus valores son mas altos. La relación entre el aumento de RC y aumento en la emisión de NO_x se encuentra en los 4 combustibles y 4 mezclas, por lo tanto, se concluye

que el índice de autoignición en mayor grado produce un efecto que propicia la formación de NO_x . Existe una relación entre el aumento de NO_x y el número de partículas cuando se aumenta la relación de compresión, el aumento en porcentaje de alcohol en la mezcla también muestra una disminución en ambas mediciones, cuando la temperatura del aire de admisión es de 38, contrario a lo que sucede en la de 68, donde no existe una relación completa.

7. Los resultados de hidrocarburos sin quemar reflejan una disminución cuando la (T_{adm}) es mayor, esto puede estar relacionado con la facilidad de combustión tras el aumento de (T_{adm}). Por otro lado, solo el butanol y las mezclas de gasolina con ambos alcoholes muestran una tendencia de aumento de emisión cuando la RC aumenta, relacionado con la intensidad de autoignición, provocado por un frente de llama principal y algunos secundarios. El aumento en el porcentaje de alcohol muestra una tendencia de disminuir los HC totales cuando la temperatura de aire de admisión es de 38, lo mismo que sucede en el número de nanopartículas.

5.5 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS GENERAL ENTRE EMISIONES Y PARÁMETROS

Tras el análisis principal entorno a la emisión del número de nanopartículas es determinada por la estructura química del combustible y sus propiedades físico-químicas, destacando el número de octano y la entalpía de vaporización. El uso de gasolina magna propicia la emisión de nanopartículas debido a sus altos índices de autoiniciación al aumentar la relación de compresión frente a la gasolina premium, esto se debe principalmente al octanaje presente en cada una de ellas, 87 y 91 respectivamente, por lo tanto, se recomienda utilizar la gasolina que el fabricante del automóvil menciona en el manual de usuario, esto además de priorizar el cuidado de las partes internas del motor también aportaría a las emisiones contaminantes de nanopartículas mejorando la calidad del aire y la eficiencia térmica. El comportamiento de la gasolina premium refleja una menor emisión de NP al frente incluso de ambos alcoholes puros y las mezclas donde el alcohol esta presente al 15 %, estando solo por arriba de las emisiones de las mezclas donde el alcohol representa el 50 %.

La temperatura de aire de admisión propicia la intensidad de autoignición asociado con una menor densidad del aire, con aumentos en la producción de nanopartículas. Por lo tanto la recomendación anterior se hace nuevamente, utilizar la gasolina adecuada para cada motor, el aceite correcto y mantenimientos temporales.

El uso de ambos alcoholes para la mitigación de emisiones es viable en mezcla con gasolina cuando sus porcentajes son altos, disminuyendo la cantidad de nanopartículas un tanto menor a los que emite la gasolina premium, además de mejorar la eficiencia volumétrica y disminuir la temperatura en la cámara de combustión. Sin embargo, pueden perjudicar empaques y propiciar la corrosión en metales, además de contar con una red de distribución relativamente baja en México y costos altos.

5.6 TRABAJOS FUTUROS

En pro de la optimización en motores de combustión interna, los combustibles que utilizan y la mitigación de sus emisiones propongo las siguientes trabajos en la misma línea de investigación:

1. Adaptación de catalizador y filtro de partículas al motor CFR con mediciones de emisiones de gases y nanopartículas para determinar el impacto que genera el uso de estos.
2. Análisis experimental de emisiones de nanopartículas en motor Diesel con y sin filtro de partículas y catalizador para determinar el efecto de cada uno de sobre el número y masa de partículas.
3. Análisis experimental de la relación entre masa de partículas y número de nanopartículas en motor CFR y Diesel y la comparación entre resultados de ambos, observando las magnitudes de emisión bajo cada combustible y las mismas condiciones de operación.
4. Estudio experimental de mezclas ternarias gasolina-alcohol en motor CFR para determinar sus propiedades físico-químicas y las emisiones que genera.
5. Medición de gases y nanopartículas bajo el ciclo WHTC en automóviles de uso real antes y después de la afinación del automóvil.
6. Medición de gases y nanopartículas bajo el ciclo WHTC en automóviles con gas licuado de petróleo como combustible.

APÉNDICE A

VALORES DE LA CONCENTRACIÓN DEL NÚMERO DE NANOPARTÍCULAS

(T_{adm})	Combustible	RC6.2	RC7.36	RC7.86	RC8.45	RC9.15	RC11
38	GM100	2.59×10^6	5.67×10^6	5.68×10^6			
	GP100	1.59×10^5	7.01×10^5	1.02×10^6			
	M100	2.5×10^6	2.31×10^6	2.15×10^6	2.65×10^6	2.59×10^6	2.86×10^6
	B100	5.59×10^5	1.3×10^6	1.47×10^6	1.79×10^6	1.96×10^6	
68	GM100	3.18×10^6	5.89×10^6	6.2×10^6			
	GP100	1.48×10^5	6.75×10^5	1.23×10^6			
	M100	4.47×10^6	4.39×10^6	3.65×10^6	4.06×10^6	3.85×10^6	4.27×10^6
	B100	1.77×10^6	1.02×10^6	2.57×10^6	2.88×10^6	2.98×10^6	

TABLA A.1: Valores de media armónica para combustibles puros.

(T_{adm})	Combustible	RC6.2	RC7.36	7.86	8.45	9.15
38	G85M15	3.44×10^6	3.88×10^6	6.65×10^6	7.21×10^6	
	G50M50	1.43×10^5	1.51×10^5	1.53×10^5	1.55×10^5	2.61×10^5
	G85B15	1.04×10^6	3.58×10^6	5.71×10^6	5.88×10^6	
	G50B50	1.79×10^5	3.59×10^5	1.36×10^6	2.56×10^6	
68	G85M15	3.28×10^6	3.81×10^6	4.29×10^6	6.35×10^6	
	G50M50	3.08×10^5	4.03×10^5	6.15×10^5	1.06×10^6	1.4×10^6
	G85B15	1.17×10^6	5.11×10^6	5.38×10^6	5.98×10^6	
	G50B50	2.35×10^5	7.64×10^5	1.01×10^6	1.74×10^6	

TABLA A.2: Valores de media armónica para mezclas gasolina-alcohol.

(T_{adm})	RC	Mínimo	1er cuartíl	Mediana	3er cuartíl	Máximo
38	6.2	1.06×10^6	2.16×10^6	2.97×10^6	3.62×10^6	5.17×10^6
	7.36	3.08×10^6	5.31×10^6	5.95×10^6	6.39×10^6	7.76×10^6
	7.86	4.12×10^6	5.2×10^6	5.83×10^6	6.32×10^6	8.64×10^6
68	6.2	2.09×10^6	2.88×10^6	3.21×10^6	3.58×10^6	5.12×10^6
	7.36	3.16×10^6	5.55×10^6	6.09×10^6	6.51×10^6	7.3×10^6
	7.86	3.25×10^6	6.03×10^6	6.4×10^6	6.74×10^6	7.93×10^6

TABLA A.3: Valores estadísticos de la concentración del número de NP para GM100.

(T_{adm})	RC	Mínimo	1er cuartíl	Mediana	3er cuartíl	Máximo
38	6.2	6.48×10^4	1.39×10^5	1.68×10^5	2.09×10^5	3.51×10^5
	7.36	3.48×10^5	7×10^5	8.98×10^5	1.17×10^6	2.01×10^6
	7.86	5.11×10^5	8.52×10^5	1.1×10^6	1.43×10^6	2.41×10^6
68	6.2	5.49×10^4	1.15×10^5	1.73×10^5	2.31×10^5	3.89×10^5
	7.36	2.31×10^5	6.5×10^5	8.26×10^5	1.08×10^6	1.92×10^6
	7.86	3.3×10^5	1.05×10^6	1.52×10^6	2.07×10^6	3.17×10^6

TABLA A.4: Valores estadísticos de la concentración del número de NP para GP100.

(T_{adm})	RC	Mínimo	1er cuartíl	Mediana	3er cuartíl	Máximo
38	6.2	1.3×10^6	2.2×10^6	2.78×10^6	3.48×10^6	3.86×10^6
	7.36	1.04×10^6	2.16×10^6	2.59×10^6	2.86×10^6	3.54×10^6
	7.86	1.05×10^6	1.95×10^6	2.29×10^6	2.61×10^6	3.08×10^6
	8.45	2.01×10^6	2.51×10^6	2.63×10^6	2.78×10^6	3.85×10^6
	9.15	1.98×10^6	2.48×10^6	2.64×10^6	2.77×10^6	3.26×10^6
	11	2.13×10^6	2.62×10^6	2.87×10^6	3.29×10^6	3.77×10^6
68	6.2	3.33×10^6	4.24×10^6	4.48×10^6	4.83×10^6	5.39×10^6
	7.36	3.37×10^6	4.17×10^6	4.51×10^6	4.79×10^6	4.98×10^6
	7.86	3.11×10^6	3.47×10^6	3.68×10^6	3.85×10^6	4.32×10^6
	8.45	2.15×10^6	3.88×10^6	4.21×10^6	4.6×10^6	5.23×10^6
	9.15	2.06×10^6	3.93×10^6	4.24×10^6	4.57×10^6	5.1×10^6
	11	3.07×10^6	3.93×10^6	4.39×10^6	4.67×10^6	5.97×10^6

TABLA A.5: Valores estadísticos de la concentración del número de NP para M100.

(T_{adm})	RC	Mínimo	1er cuartíl	Mediana	3er cuartíl	Máximo
38	6.2	3.03×10^5	4.83×10^5	5.67×10^5	7.04×10^5	1.05×10^6
	7.36	7.1×10^5	1.17×10^6	1.34×10^6	1.58×10^6	2.39×10^6
	7.86	1.02×10^6	1.28×10^6	1.52×10^6	1.71×10^6	2.37×10^6
	8.45	1.05×10^6	1.68×10^6	1.87×10^6	2×10^6	2.37×10^6
	9.15	1.11×10^6	1.86×10^6	2.09×10^6	2.21×10^6	2.89×10^6
68	6.2	1.05×10^6	1.54×10^6	1.73×10^6	2.27×10^6	3.31×10^6
	7.36	1.22×10^6	1.79×10^6	1.99×10^6	2.4×10^6	3.53×10^6
	7.86	1.13×10^6	2.41×10^6	2.64×10^6	3.06×10^6	3.93×10^6
	8.45	1.14×10^6	2.48×10^6	3.22×10^6	3.81×10^6	4.45×10^6
	9.15	1×10^6	2.72×10^6	3.37×10^6	3.73×10^6	4.52×10^6

TABLA A.6: Valores estadísticos de la concentración del número de NP para B100.

(T_{adm})	RC	Mínimo	1er cuartíl	Mediana	3er cuartíl	Máximo
38	6.2	2.05×10^6	3×10^6	3.37×10^6	4.22×10^6	6.23×10^6
	7.36	2.88×10^6	3.46×10^6	3.93×10^6	4.35×10^6	5.83×10^6
	7.86	2.53×10^6	6.24×10^6	7.17×10^6	7.8×10^6	8.85×10^6
	8.45	4.45×10^6	6.7×10^6	7.25×10^6	8.08×10^6	9.59×10^6
68	6.2	1.62×10^6	2.91×10^6	3.48×10^6	3.92×10^6	5×10^6
	7.36	2.04×10^6	3.34×10^6	3.89×10^6	4.51×10^6	5.98×10^6
	7.86	1.14×10^6	4.21×10^6	4.95×10^6	5.77×10^6	7.18×10^6
	8.45	3.5×10^6	5.91×10^6	6.45×10^6	7.17×10^6	9.57×10^6

TABLA A.7: Valores estadísticos de la concentración del número de NP para

G85M15.

(T_{adm})	RC	Mínimo	1er cuartíl	Mediana	3er cuartíl	Máximo
38	6.2	4.975×10^5	8.97×10^5	1.07×10^6	1.27×10^6	2.22×10^6
	7.36	1.93×10^6	3.09×10^6	4.03×10^6	4.63×10^6	5.61×10^6
	7.86	4.11×10^6	5.35×10^6	5.75×10^6	6.28×10^6	6.84×10^6
	8.45	3.79×10^6	5.73×10^6	6.11×10^6	6.37×10^6	6.93×10^6
68	6.2	5.07×10^5	1.11×10^6	1.35×10^6	1.53×10^6	1.9×10^6
	7.36	3.01×10^6	4.7×10^6	5.39×10^6	5.84×10^6	6.32×10^6
	7.86	2.83×10^6	5.26×10^6	5.74×10^6	6.19×10^6	6.7×10^6
	8.45	5.02×10^6	5.63×10^6	5.97×10^6	6.3×10^6	7.25×10^6

TABLA A.8: Valores estadísticos de la concentración del número de NP para G85B15.

(T_{adm})	RC	Mínimo	1er cuartíl	Mediana	3er cuartíl	Máximo
38	6.2	3.57×10^4	1.32×10^5	2.17×10^5	2.7×10^5	4.58×10^5
	7.36	5.08×10^4	1.47×10^5	1.71×10^5	1.88×10^5	2.22×10^5
	7.86	8.14×10^4	1.39×10^5	1.57×10^5	1.77×10^5	3.52×10^5
	8.45	8.56×10^4	1.34×10^5	1.57×10^5	1.91×10^5	3.23×10^5
	9.15	2.1×10^5	2.47×10^5	2.66×10^5	2.79×10^5	3.16×10^5
68	6.2	7.79×10^4	2.15×10^5	4.35×10^5	7.9×10^5	1.02×10^6
	7.36	1.21×10^5	3.53×10^5	5.08×10^5	6.06×10^5	1.2×10^6
	7.86	2.71×10^5	5.67×10^5	6.44×10^5	7.09×10^5	9.2×10^5
	8.45	2.3×10^5	1.03×10^6	1.08×10^6	1.22×10^6	2.55×10^6
	9.15	7.07×10^5	1.35×10^6	1.49×10^6	1.56×10^6	1.67×10^6

TABLA A.9: Valores estadísticos de la concentración del número de NP para

G50M50.

(T_{adm})	RC	Mínimo	1er cuartíl	Mediana	3er cuartíl	Máximo
38	6.2	1.01×10^5	1.51×10^5	1.88×10^5	2.25×10^5	2.68×10^5
	7.36	1.13×10^5	3.26×10^5	3.81×10^5	4.55×10^5	6.92×10^5
	7.86	4.8×10^5	1.22×10^6	1.45×10^6	1.85×10^6	2.68×10^6
	8.45	1.42×10^6	2.11×10^6	3.01×10^6	3.32×10^6	3.48×10^6
68	6.2	9.69×10^4	2.02×10^5	2.62×10^5	3.18×10^5	4.6×10^5
	7.36	3.09×10^5	6.63×10^5	7.97×10^5	9.75×10^5	1.67×10^6
	7.86	5.21×10^5	8.51×10^5	9.91×10^5	1.37×10^6	2.05×10^6
	8.45	1.01×10^6	1.35×10^6	1.99×10^6	2.32×10^6	2.93×10^6

TABLA A.10: Valores estadísticos de la concentración del número de NP para

G50B50.

APÉNDICE B

TABLAS DE VALORES DE PRESIÓN EN CÁMARA DE COMBUSTIÓN

(T_{adm})	RC	GM100	GP100	M100	B100	Unidades
38	6.2	31.55	32.76	36.15	32.55	Bar
	7.36	42.87	41.29	41.22	40.24	
	7.86	46.45	44.82	42.80	42.33	
	8.45			44.7	46.33	
	9.15			46.55	51.05	
	11			59.55		
68	6.2	31.16	31.66	32.52	31.07	Bar
	7.36	41.75	38.45	36.99	38.32	
	7.86	44.29	42.96	38.55	40.35	
	8.45			41.06	44.1	
	9.15			44.32	49.03	
	11			57.11		

TABLA B.1: Media de presión en cámara de combustión para combustibles puros.

(T_{adm})	RC	G85M15	G50M50	G85B15	G50B50	Unidades
38	6.2	33.71	33.51	32.11	34.46	Bar
	7.36	39.79	37.97	41.26	41.74	
	7.86	42.42	40.48	44.99	44.16	
	8.45	46.1	43.54	50.14	48.72	
	9.15		48.15			
68	6.2	29.91	31.28	31.24	30.62	Bar
	7.36	36.65	36.22	39.33	37.74	
	7.86	38.17	38.99	41.75	39.96	
	8.45	42.69	41.66	48.12	45.53	
	9.15		48.43			

TABLA B.2: Media de presión en cámara de combustión para mezclas.

(T_{adm})	RC	GM100	GP100	M100	B100	Unidades
38	6.2	35.62	36.48	37.65	36.22	Bar
	7.36	46.71	44.69	43.68	43.45	
	7.86	49.79	49.69	44.93	45.74	
	8.45			48.28	50.13	
	9.15			50.26	54.44	
	11			62.49		
68	6.2	33.3	34.49	34.7	33.17	Bar
	7.36	45.55	41.44	40.86	40.09	
	7.86	48.22	45.56	42.93	41.95	
	8.45			45.81	46.28	
	9.15			48.76	51.65	
	11			60.68		

TABLA B.3: Máximos de presión en cámara de combustión para combustibles puros.

(T_{adm})	RC	G85M15	G50M50	G85B15	G50B50	Unidades
38	6.2	35.46	36.35	35.58	36.26	Bar
	7.36	42.35	40.97	44.28	44.55	
	7.86	45.12	43.78	48.93	46.92	
	8.45	48.82	45.99	53.97	51.98	
	9.15		50.87			
68	6.2	33.45	32.78	34.19	33.68	Bar
	7.36	40.15	38.5	41.67	41.63	
	7.86	42.38	41.8	44.49	44.48	
	8.45	46.97	43.84	51.97	49.66	
	9.15		51.35			

TABLA B.4: Máximos de presión en cámara de combustión para mezclas.

APÉNDICE C

TABLAS DE VALORES DEL ÍNDICE DE
AUTOIGNICIÓN

(T_{adm})	RC	GM100	GP100	M100	B100	Unidades
38	6.2	13.35	10.03	5.05	4.52	kPa
	7.36	124.64	69.62	6.52	24.24	
	7.86	200.12	123.35	6.82	34.4	
	8.45			7.59	57.97	
	9.15			9.29	117.19	
	11			57.74		
68	6.2	34.76	21.5	4.61	7.2	kPa
	7.36	173.13	91.92	5.8	31.45	
	7.86	236.95	150.78	6.59	44.4	
	8.45			9.47	78.25	
	9.15			18.37	181.81	
	11			143.8		

TABLA C.1: Media del índice de autoignición para combustibles puros.

(T_{adm})	RC	G85M15	G50M50	G85B15	G50B50	Unidades
38	6.2	5.48	4.58	12.81	9.37	kPa
	7.36	26.89	6.83	81.1	48.73	
	7.86	43.4	10.2	151.33	81.26	
	8.45	70.49	16.88	257.62	160.49	
	9.15		37.85			
68	6.2	6.3	4.37	22.51	10.32	kPa
	7.36	34.27	10.5	117.49	52.84	
	7.86	41.01	18.87	152.4	81.88	
	8.45	78.61	31.32	329.19	181.45	
	9.15		84.71			

TABLA C.2: Medias del índice de autoignición para mezclas.

(T_{adm})	RC	GM100	GP100	M100	B100	Unidades
38	6.2	44.25	27.78	9.89	9.63	kPa
	7.36	298.38	185.14	12.79	85.43	
	7.86	509.5	341.17	15.4	134.6	
	8.45			16.41	161.06	
	9.15			21.95	390.8	
	11			176.35		
68	6.2	101.01	87.33	10.45	18.17	kPa
	7.36	430	244.62	11.91	90.07	
	7.86	555.68	377.47	14.7	123.77	
	8.45			35.1	329.34	
	9.15			58.66	442.18	
	11			439.09		

TABLA C.3: Máximos del índice de autoignición para combustibles puros.

(T_{adm})	RC	G85M15	G50M50	G85B15	G50B50	Unidades
38	6.2	14.11	13.09	50.18	32.34	kPa
	7.36	71.33	15.35	196.15	134.12	
	7.86	134.81	28.34	397.69	200.91	
	8.45	183.18	62.01	654.04	421.29	
	9.15		132.22			
68	6.2	23.83	8.69	61.14	31.09	kPa
	7.36	107.79	44.48	296.29	156.16	
	7.86	176.44	64.74	482.65	221.76	
	8.45	273.37	107.99	694.93	611.63	
	9.15		260.55			

TABLA C.4: Máximos del índice de autoignición para mezclas.

APÉNDICE D

TABLAS DE VALORES DE GASES

(T_{adm})	RC	GM100	GP100	M100	B100	Unidades
38	6.2	1.07	0.85	0.74	0.62	%
	7.36	1.03	0.85	0.58	0.79	
	7.86	1.06	0.85	0.7	0.8	
	8.45			0.57	0.76	
	9.15			0.78	0.83	
	11			0.65		
68	6.2	1.16	0.92	0.79	0.85	%
	7.36	0.76	0.89	0.84	0.93	
	7.86	0.72	0.81	0.93	0.88	
	8.45			0.99	0.79	
	9.15			1	0.81	
	11			1		

TABLA D.1: Valores medios de oxígeno de combustibles puros.

(T_{adm})	RC	G85M15	G50M50	G85B15	G50B50	Unidades
38	6.2	0.87	0.98	1.1	0.94	%
	7.36	0.81	0.87	1.08	0.77	
	7.86	0.83	0.71	1	0.73	
	8.45	0.8	0.86	1.15	0.93	
	9.15		0.85			
68	6.2	0.95	0.78	1.1	0.74	%
	7.36	0.83	1.09	1.03	1.19	
	7.86	0.81	1.03	1.08	1.01	
	8.45	0.73	1.19	0.93	0.89	
	9.15		1.02			

TABLA D.2: Valores medios de oxígeno de mezclas.

(T_{adm})	RC	GM100	GP100	M100	B100
38	6.2	0.99	0.98	0.99	0.98
	7.36	1	0.96	0.99	0.99
	7.86	1.01	0.99	1	0.99
	8.45			0.98	0.99
	9.15			1.01	1
	11			1	
68	6.2	1.01	0.99	0.99	1
	7.36	0.99	0.99	1	1.02
	7.86	0.99	1	1.01	1.01
	8.45			1.01	1.01
	9.15			1.01	1.01
	11			1.01	

TABLA D.3: Valores medios de lambda de combustibles puros.

(T_{adm})	RC	G85M15	G50M50	G85B15	G50B50
38	6.2	0.99	1	0.99	0.99
	7.36	1	0.99	0.99	0.99
	7.86	1	0.98	1	0.99
	8.45	1	1	1.01	1
	9.15		1		
38	6.2	1	1	1.01	1
	7.36	1	1	1	1.01
	7.86	1	1	1	1.01
	8.45	0.99	1.02	0.99	1
	9.15		1		

TABLA D.4: Valores medios de lambda de mezclas.

(T_{adm})	RC	GM100	GP100	M100	B100	Unidades
38	6.2	0.15	0.04	0.17	0.13	mg/m^3
	7.36	9.01	7.16	0.69	5.03	
	7.86	12.03	14.3	0.97	7.98	
	8.45			2.85	14.19	
	9.15			3.51	16.9	
	11			6.75		
68	6.2	0.19	0.54	1.35	0.18	mg/m^3
	7.36	9.58	8.06	2.73	0.39	
	7.86	22.86	19.19	4.2	1.51	
	8.45			4.48	10.02	
	9.15			17.57	11.67	
	11			19.36		

TABLA D.5: Valores medios de la masa de partículas de combustibles puros.

(T_{adm})	RC	G85M15	G50M50	G85B15	G50B50	Unidades
38	6.2	0.26	0.38	0.26	0.27	mg/m^3
	7.36	0.84	0.73	4.73	1.47	
	7.86	29.44	1.62	14.8	6.88	
	8.45	47.44	5.36	15.95	34.83	
	9.15		11.4			
68	6.2	0.25	0.09	0.6	0.25	mg/m^3
	7.36	0.27	1.2	3.23	8.99	
	7.86	0.22	2.31	6.78	15.29	
	8.45	11.84	3.34	11.94	16.42	
	9.15		7.66			

TABLA D.6: Valores medios de la masa de partículas de mezclas.

(T_{adm})	RC	GM100	GP100	M100	B100	Unidades
38	6.2	146.25	164.77	247.21	220.95	ppm
	7.36	207.56	197.76	262.31	222.98	
	7.86	190.1	187.03	296.1	250.36	
	8.45			350.21	283.02	
	9.15			291.85	292.04	
	11			334.47		
68	6.2	135.82	122.31	271.31	194.39	ppm
	7.36	196.62	145.44	242.56	199.77	
	7.86	218.4	191.91	285.51	208.86	
	8.45			303.21	210.89	
	9.15			253.86	229.48	
	11			307.55		

TABLA D.7: Valores medios de hidrocarburos de combustibles puros.

(T_{adm})	RC	G85M15	G50M50	G85B15	G50B50	Unidades
38	6.2	147.8	132.78	217.9	198.85	ppm
	7.36	158.01	144.37	205.98	176.82	
	7.86	165.21	157.34	209.86	183.8	
	8.45	204.34	155.13	277.44	240.87	
	9.15		183.46			
68	6.2	116.64	146.5	146.41	204.6	ppm
	7.36	135.85	134.11	176.89	160.51	
	7.86	146.78	158.83	196.88	198.01	
	8.45	184.43	183.96	238.04	211.59	
	9.15		209.12			

TABLA D.8: Valores medios de hidrocarburos de mezclas.

(T_{adm})	RC	GM100	GP100	M100	B100	Unidades
38	6.2	1.66	1.7	0.89	1.26	%
	7.36	1.18	1.94	0.8	0.97	
	7.86	0.88	1.4	0.59	0.97	
	8.45			0.82	0.92	
	9.15			0.45	0.84	
	11			0.56		
68	6.2	1.05	1.62	0.95	1.04	%
	7.36	1.2	1.25	0.91	0.56	
	7.86	1.01	0.93	0.76	0.51	
	8.45			0.71	0.56	
	9.15			0.65	0.51	
	11			0.67		

TABLA D.9: Valores medios de monóxido de carbono de combustibles puros.

(T_{adm})	RC	G85M15	G50M50	G85B15	G50B50	Unidades
38	6.2	1.22	1.35	1.65	1.24	%
	7.36	0.99	1.2	1.27	1.07	
	7.86	1.03	1.3	1.21	1.02	
	8.45	0.89	0.93	0.98	1.01	
	9.15		0.86			
68	6.2	1.08	0.81	1.22	0.75	%
	7.36	0.96	1.37	1.14	1.16	
	7.86	0.84	1.24	1.26	0.94	
	8.45	0.94	0.9	1.42	1.01	
	9.15		1.15			

TABLA D.10: Valores medios de monóxido de carbono de mezclas.

(T_{adm})	RC	GM100	GP100	M100	B100	Unidades
38	6.2	12.82	13.53	13.38	13.2	%
	7.36	13.22	13.36	13.12	13.31	
	7.86	13.24	13.38	13.3	13.28	
	8.45			13.39	13.38	
	9.15			13.22	13.35	
	11			13.17		
68	6.2	13.21	12.89	13.11	13.31	%
	7.36	13.41	13.23	12.92	13.43	
	7.86	13.56	13.77	13.18	13.34	
	8.45			13.36	13.48	
	9.15			13.25	13.36	
	11			13.39		

TABLA D.11: Valores medios de dióxido de carbono de combustibles puros.

(T_{adm})	RC	G85M15	G50M50	G85B15	G50B50	Unidades
38	6.2	13.63	13.25	13.04	13.59	%
	7.36	13.67	13.25	13.16	13.39	
	7.86	13.43	13.17	12.82	13.34	
	8.45	13.58	13.32	13.06	13.32	
	9.15		13.19			
68	6.2	12.94	13.4	12.9	13.3	%
	7.36	13.1	12.75	13.07	12.71	
	7.86	13.31	12.95	13.07	13.02	
	8.45	13.37	13.21	13.15	13.16	
	9.15		13.22			

TABLA D.12: Valores medios de dióxido de carbono de mezclas.

(T_{adm})	RC	GM100	GP100	M100	B100	Unidades
38	6.2	4912.94	6305.87	1426.55	5351.9	ppm
	7.36	6263.3	6371.04	1512.16	5580.94	
	7.86	6853.69	7674.44	1782.43	5694.53	
	8.45			1793.66	5942.29	
	9.15			2085.93	6526.6	
	11			2143.33		
68	6.2	5662.63	7751.35	1815.75	5620.09	ppm
	7.36	6209.16	8417.07	1842.46	6849.66	
	7.86	6669.69	9122.7	1935.14	7199.53	
	8.45			1948.28	7604.23	
	9.15			2010.3	7903.27	
	11			2294.87		

TABLA D.13: Valores medios de NO_x de combustibles puros.

(T_{adm})	RC	G85M15	G50M50	G85B15	G50B50	Unidades
38	6.2	4445.88	3380.77	5704.11	5620.55	ppm
	7.36	4934.34	3692.15	6640.07	5689.18	
	7.86	5227.93	3584.4	6907.87	5929.32	
	8.45	5806.94	4195.4	7828.52	6611.9	
	9.15		4556.22			
68	6.2	4765.94	7879.98	6145.52	5635.39	ppm
	7.36	4741.84	5508.65	6477.94	6896.4	
	7.86	4848.57	5876.46	6430.32	7848.03	
	8.45	4765.69	6527.43	6326.1	7617.86	
	9.15		5971.4			

TABLA D.14: Valores medios de NO_x de mezclas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNITED NATIONS: Department of Economic and Social Affairs Population Division. Total population by sex. Recurso libre, <https://population.un.org/dataportal/data/indicators/49/locations/900/start/1950/end/2100/line/linetimeplotsingle>, 2022.
- [2] BANCO MUNDIAL. Crecimiento de la población (% anual). Recurso libre, <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.GROW>, 2021.
- [3] International Energy Agency. World energy outlook 2021. Technical report, IEA, 2022.
- [4] Richard Newell, Daniel Raimi, Seth Villanueva, Brian Prest, et al. Global energy outlook 2021: Pathways from paris. *Resources for the Future*, 8, 2021.
- [5] United Nations. *Paris Agreement*, 2015.
- [6] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Inventario nacional de gases de efecto invernadero (gei). Recurso libre, <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/Inventario-GEI.aspx>, 2022.
- [7] Christopher Waite. 2020 uk greenhouse gas emissions, final figures. Technical report, Department of Bussiness, Energy Industrial Strategy, 2022.
- [8] Iniciativa Climática de México. Emisiones del sector transporte: Urge acelerar el cambio tecnológico y cultural. Technical report, Iniciativa Climática de México, 2021.

- [9] Energy Industrial Strategy UK Department for Business. Greenhouse gas reporting: conversion factors 2019. Recurso libre, <https://ourworldindata.org/travel-carbon-footprint>, 2019.
- [10] *Encyclopaedia od Hydrocarbons*. Instituto della Enciclopedia Italiana Fondata Da Giovanni Treccani, 2007.
- [11] Coordination of information on the environment. Recurso libre, <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/corinair>.
- [12] Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Recurso libre, <https://www.epa.gov/espanol/agencias-federales/agencia-de-proteccion-ambiental-de-estados-unidos>.
- [13] Secretaría del Medio Ambiente. Recurso libre, <http://aire.sema.gob.mx/mapa.html>.
- [14] EC3V London. World energy council. 2021.
- [15] Gautam Kalghatgi. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? *Applied energy*, 225:965–974, 2018.
- [16] Jeff D Colgan and Miriam Hinthorn. Is cheap gasoline killing us? fuel subsidies and under-taxation as a driver of obesity and public health problems worldwide. *Energy Research & Social Science*, 82:102316, 2021.
- [17] Francisco Payri González and José M^a Desantes Fernández. *Motores de combustión interna alternativos*. Editorial Universitat politècnica de valencia, 2011.
- [18] Parlamento Europeo. Fit for 55: Meps back objective of zero emissions for cars and vans in 2035. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220603IPR32129/fit-for-55-meps-back-objective-of-zero-emissions-for-cars-and-vans-in-2035>, 2022.
- [19] The International Council on Clean Transport. European vehicle market statistics pocketbook 2021-2022. 2022.

-
- [20] INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Estadística mensual de vehículos de motor registrados en circulación. <https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/>, 2020.
- [21] Kate Blumberg and Francisco Posada. Comparison of us and eu programs to control light-duty vehicle emissions. *The ICCT*, 2015.
- [22] Continental. Worldwide emissions standards and related regulations, passenger cars/light and medium duty vehicles. 2019.
- [23] Delphi Technologies. Worldwide emissions standards, passenger cars and light duty vehicles. 2021.
- [24] Office of the Press Secretary The White House. Leaders' statement on a north american climate, clean energy, and environment partnership. <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2016/06/29/leaders-statement-north-american-climate-clean-energy-and-environment>, 2016.
- [25] Frederick J Miller, Donald E Gardner, Judith A Graham, Robert E Lee Jr, William E Wilson, and John D Bachmann. Size considerations for establishing a standard for inhalable particles. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 29(6):610–615, 1979.
- [26] Ian M Kennedy. The health effects of combustion-generated aerosols. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2):2757–2770, 2007.
- [27] Douglas W Dockery, C Arden Pope, Xiping Xu, John D Spengler, James H Ware, Martha E Fay, Benjamin G Ferris Jr, and Frank E Speizer. An association between air pollution and mortality in six us cities. *New England Journal of Medicine*, 329(24):1753–1759, 1993.
- [28] Independent Particulate Matter Review Panel. The need for a tighter particulate-matter air-quality standard, 2020.
- [29] Environmental Protection Agency. Policy assessment for the review of the national ambient air quality standards for particulate matter: Epa-452/r-20-002. 2020.

- [30] World Health Organization. What are the who air quality guidelines? Recurso libre, <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>, 2021.
- [31] Lilian Calderón-Garcidueñas and Alberto Ayala. Air pollution, ultrafine particles, and your brain: Are combustion nanoparticle emissions and engineered nanoparticles causing preventable fatal neurodegenerative diseases and common neuropsychiatric outcomes? *Environmental Science & Technology*, 56(11):6847–6856, 2022.
- [32] Lilian Calderón-Garcidueñas, Rafael Reynoso-Robles, and Angélica González-Maciel. Combustion and friction-derived nanoparticles and industrial-sourced nanoparticles: The culprit of alzheimer and parkinson’s diseases. *Environmental research*, 176:108574, 2019.
- [33] Álvaro Veiga-Álvarez, Daniel Sánchez-de Alcázar, María Martínez-Negro, Ana Barbu, Juan B González-Díaz, and Jerónimo Maquea-Blasco. Riesgos para la salud y recomendaciones en el manejo de nanopartículas en entornos laborales. *Medicina y Seguridad del Trabajo*, 61(239):143–161, 2015.
- [34] L Caudillo, D Salcedo, O Peralta, T Castro, and H Alvarez-Ospina. Nanoparticle size distributions in mexico city. *Atmospheric Pollution Research*, 11(1):78–84, 2020.
- [35] Lilian Calderón-Garcidueñas, Randall Engle, Antonieta Mora-Tiscareño, Martin Styner, Gilberto Gómez-Garza, Hongtu Zhu, Valerie Jewells, Ricardo Torres-Jardón, Lina Romero, Maria E Monroy-Acosta, et al. Exposure to severe urban air pollution influences cognitive outcomes, brain volume and systemic inflammation in clinically healthy children. *Brain and cognition*, 77(3):345–355, 2011.
- [36] Gill Livingston, Jonathan Huntley, Andrew Sommerlad, David Ames, Clive Ballard, Sube Banerjee, Carol Brayne, Alistair Burns, Jiska Cohen-Mansfield, Claudia Cooper, et al. Dementia prevention, intervention, and care: 2020 report of the lancet commission. *The Lancet*, 396(10248):413–446, 2020.

- [37] Antonio Pacitto, Luca Stabile, Lidia Morawska, Mawutorli Nyarku, Mehdi Amouei Torkmahalleh, Zarina Akhmetvaliyeva, Alexandro Andrade, Fabio Hech Dominski, Paride Mantecca, Waleed H Shetaya, et al. Daily submicron particle doses received by populations living in different low-and middle-income countries. *Environmental Pollution*, 269:116229, 2021.
- [38] Jos Lelieveld, John S Evans, Mohammed Fnais, Despina Giannadaki, and Andrea Pozzer. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569):367–371, 2015.
- [39] Maciej Strak, Nicole AH Janssen, Krystal J Godri, Ilse Gosens, Ian S Mudway, Flemming R Cassee, Erik Lebret, Frank J Kelly, Roy M Harrison, Bert Brunekreef, et al. Respiratory health effects of airborne particulate matter: the raptex project. *Environmental health perspectives*, 120(8):1183–1189, 2012.
- [40] Saurabh Sonwani, Simran Madaan, Jagjot Arora, Shalini Suryanarayan, Deepali Rangra, Nancy Mongia, Tanvi Vats, and Pallavi Saxena. Inhalation exposure to atmospheric nanoparticles and its associated impacts on human health: a review. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3:690444, 2021.
- [41] Thomas W Hesterberg, Christopher M Long, Charles A Lapin, Ali K Hamade, and Peter A Valberg. Diesel exhaust particulate (dep) and nanoparticle exposures: what do dep human clinical studies tell us about potential human health hazards of nanoparticles? *Inhalation toxicology*, 22(8):679–694, 2010.
- [42] Suburban Nation. The rise of sprawl and the decline of the american dream. *New York: North Point*, 2000.
- [43] Constitución Política, QUE REFORMA LA DE, and DE FEBRERO. Constitución política de los estados unidos mexicanos. *Extraído de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1.pdf> Última reforma publicada en el DOF el, 9, 1917.*

- [44] Secretaría de Gobernación. Diario oficial de la federación. Recurso libre, [https://dof.gob.mx/busqueda_detalle.php?textobusqueda = Norma+Oficiogsc.tab = 0](https://dof.gob.mx/busqueda_detalle.php?textobusqueda=Norma+Oficiogsc.tab=0), 2022.
- [45] CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN. Ley general de salud. Recurso libre, [https://dof.gob.mx/busqueda_detalle.php?textobusqueda = Norma + Oficiogsc.tab = 0](https://dof.gob.mx/busqueda_detalle.php?textobusqueda=Norma+Oficiogsc.tab=0), 2022.
- [46] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Compendio de estadísticas ambientales 2018. Recurso libre, [https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo = 5396063&fecha = 10/06/2015](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5396063&fecha=10/06/2015)*gsc.tab = 0*, 2019.
- [47] Comisión Reguladora de Energía. Norma oficial mexicana nom-016-cre-2016, especificaciones de calidad de los petrolíferos. Recurso libre, [https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo = 5450011&fecha = 29/08/2016](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016)*gsc.tab = 0*, 2016.
- [48] LUIS GERARDO SANCHEZ VELA, MJ FABELA GALLEGOS, O FLORES CENTENO, JR HERNANDEZ JIMENEZ, D VAZQUEZ VEGA, and ME CRUZ ACEVEDO. Revisión de la normativa internacional sobre límites de emisiones contaminantes de vehículos de carretera. *PUBLICACION TECNICA*, (562), 2019.
- [49] Pshtiwan M Sharif, A Aziz Hairuddin, A As'array, KAM Rezali, MM Noor, M Norhafana, Muntasser AA Mossa, and SM Shareef. International regulation of vehicle emissions control rules and its influence on academic engine development experimental study and vehicle manufacturing. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 469, page 012070. IOP Publishing, 2019.
- [50] Leticia Pineda, Kate Blumberg, Maita Schade, John Koupal, Ingrid Pérez, Sergio Zirath, Joshua Fu, Kan Huang, Lingzhi Jin, and Ulises Hernández. Beneficios en calidad del aire y salud por la mejora de normas de emisiones para vehículos y combustibles en México. 2021.

-
- [51] Martin Weiss, Pierre Bonnel, Jörg Kühlwein, Alessio Provenza, Udo Lambrecht, Stefano Alessandrini, Massimo Carriero, Rinaldo Colombo, Fausto Forni, Gaston Lanappe, et al. Will euro 6 reduce the nox emissions of new diesel cars?—insights from on-road tests with portable emissions measurement systems (pems). *Atmospheric Environment*, 62:657–665, 2012.
- [52] Oliver F Bischof. Recent developments in the measurement of low particulate emissions from mobile sources: A review of particle number legislations. *Emission Control Science and Technology*, 1(2):203–212, 2015.
- [53] H Burtscher, TH Lutz, and A Mayer. A new periodic technical inspection for particle emissions of vehicles. *Emission Control Science and Technology*, 5(3):279–287, 2019.
- [54] Pratim Biswas and Chang-Yu Wu. Nanoparticles and the environment. *Journal of the air & waste management association*, 55(6):708–746, 2005.
- [55] Heinz Burtscher, Stefan Künzel, and Christoph Hüglin. Characterization of particles in combustion engine exhaust. *Journal of Aerosol Science*, 29(4):389–396, 1998.
- [56] ZD Ristovski, Lidia Morawska, ND Bofinger, and Jane Hitchins. Submicrometer and supermicrometer particulate emission from spark ignition vehicles. *Environmental Science & Technology*, 32(24):3845–3852, 1998.
- [57] Ludovic Noël, Pascal Hayrault, Mickael Leblanc, Stéphane Raux, and Nicolas Jeuland. Detailed characterization of nanoparticles emitted by spark ignition direct injection engines. In *ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles. Zürich, Switzerland*, 2013.
- [58] David B Kittelson. Engines and nanoparticles: a review. *Journal of aerosol science*, 29(5-6):575–588, 1998.
- [59] Ivan Arsie, Silvana Di Iorio, and Salvatore Vaccaro. Experimental characterization of nanoparticles emissions in a port fuel injection spark ignition engine. Technical report, SAE Technical Paper, 2011.

-
- [60] Jinwook Lee, Rishin Patel, A Schonborn, Nicos Ladommatos, and Choongsik Bae. Effect of biofuels on nanoparticle emissions from spark-and compression-ignited single-cylinder engines with same exhaust displacement volume. *Energy & fuels*, 23(9):4363–4369, 2009.
- [61] Jiacheng Yang, Patrick Roth, Hanwei Zhu, Thomas D Durbin, and Georgios Karavalakis. Impacts of gasoline aromatic and ethanol levels on the emissions from gdi vehicles: Part 2. influence on particulate matter, black carbon, and nanoparticle emissions. *Fuel*, 252:812–820, 2019.
- [62] Wang Yinhui, Zheng Rong, Qin Yanhong, Peng Jianfei, Li Mengren, Lei Jianrong, Wu Yusheng, Hu Min, and Shuai Shijin. The impact of fuel compositions on the particulate emissions of direct injection gasoline engine. *Fuel*, 166:543–552, 2016.
- [63] Ivan Arsie, Silvana Di Iorio, and Salvatore Vaccaro. Experimental investigation of the effects of afr, spark advance and egr on nanoparticle emissions in a pfi si engine. *Journal of Aerosol Science*, 64:1–10, 2013.
- [64] Jan Czerwinski, Pierre Comte, Danilo Engelmann, Norbert Heeb, Maria Muñoz, Peter Bonsack, Volker Hensel, and Andreas Mayer. Pn-emissions of gasoline cars mpi and potentials of gpf. Technical report, SAE Technical Paper, 2018.
- [65] Jan Czerwinski, Pierre Comte, Norbert Heeb, Andreas Mayer, and Volker Hensel. Nanoparticle emissions of di gasoline cars with/without gpf. *SAE Technical Paper*, (2017-0), 2017.
- [66] Felix CP Leach, Richard Stone, David Richardson, James WG Turner, Andrew Lewis, Sam Akehurst, Sarah Remmert, Steven Campbell, and Roger Cracknell. The effect of oxygenate fuels on pn emissions from a highly boosted gdi engine. *Fuel*, 225:277–286, 2018.
- [67] Felix Köhler. Testing of particulate emissions from positive ignition vehicles with direct fuel injection system. *TUV Nord: Hanover, Germany*, 2013.

-
- [68] Jiacheng Yang, Patrick Roth, Thomas D Durbin, Kent C Johnson, Akua Asa-Awuku, David R Cocker III, and Georgios Karavalakis. Investigation of the effect of mid-and high-level ethanol blends on the particulate and the mobile source air toxic emissions from a gasoline direct injection flex fuel vehicle. *Energy & Fuels*, 33(1):429–440, 2018.
- [69] Mohsin Raza, Longfei Chen, Felix Leach, and Shiting Ding. A review of particulate number (pn) emissions from gasoline direct injection (gdi) engines and their control techniques. *Energies*, 11(6):1417, 2018.
- [70] CL Myung, H Lee, K Choi, YJ Lee, and S Park. Effects of gasoline, diesel, lpg, and low-carbon fuels and various certification modes on nanoparticle emission characteristics in light-duty vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 10(5):537–544, 2009.
- [71] John B Heywood. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education, 2018.
- [72] Willard W Pulkrabek. *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*, 2004.
- [73] Irvin Glassman, Richard A Yetter, and Nick G Glumac. *Combustion*. Academic press, 2014.
- [74] Stephen R Turns et al. *Introduction to combustion*, volume 287. McGraw-Hill Companies New York, NY, USA, 1996.
- [75] Kenneth K Kuo. *Principles of combustion*. Elsevier Science Pub. Co. Inc., New York, NY, 1986.
- [76] The Lubrizol Corporation. How do pfi and gdi engines work? Recurso libre, <https://360.lubrizol.com/Resources/How-It-Works/How-it-Works—PFI-vs-GDI-Engines>.
- [77] Guillermo Rubio Gómez. *Estudio de la combustión de mezclas de gasolina-bioalcohol en un motor de compresión variable CFR*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2018.

- [78] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Derivados del petróleo: La gasolina. Technical report, CONUEE: Dirección de Movilidad y Transporte.
- [79] ASTM International. *Standard Test Method for Research Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel*.
- [80] ASTM International. *Standard Test Method for Motor Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel*.
- [81] Ford Motor Company (FoMoCo). Fuel and refueling- fuel quality. Recurso libre, <https://www.fordservicecontent.com/FordContent/vdirsnet/OwnerManual/Home/Content?var=3650languageCode = encountryCode = USAUid = G1739546ProcUid = G1739547userMarket = usadiv = fvFilteringEnabled = False>, 2020.
- [82] Jerzy Merkisz and Jacek Pielecha. *Nanoparticle emissions from combustion engines*. Springer, 2015.
- [83] CL Myung and Simsoo Park. Exhaust nanoparticle emissions from internal combustion engines: A review. *International Journal of Automotive Technology*, 13(1):9–22, 2012.
- [84] Waukesha Engine Division Dresser Industries Inc. An international historic mechanical engineering landmark, the waukesha cfr fuel research engine, 1980.
- [85] I Baxter and B Yeo. An international historic mechanical engineering landmark: The waukesha cfr fuel research engine. 1980. *American Society of Mechanical Engineers: Waukesha, WI*.
- [86] Christopher Brock and David L Stanley. The cooperative fuels research engine: applications for education and research. *Journal of Aviation Technology and Engineering*, 2(1):7, 2012.
- [87] Pablo Gómez Gordo Villa. *Desarrollo de un sistema de control automático aplicado a un motor CFR para el estudio físico-químico de la combustión*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2017.

-
- [88] TSI. Nanoparticle emissions tester model 3795. Recurso libre, <https://tsi.com/products/particle-counters-and-detectors/engine-exhaust-particle-counters/nanoparticle-emission-tester-3795/>.
- [89] PEMEX Petróleos Mexicanos. Hoja de datos de seguridad, gasolinas pemex premium y pemex magna. Recurso libre, <https://www.distribuidorariopanuco.com/pdfs/magna.pdf>.
- [90] Patricia Castillo-Hernández, Alberto Mendoza-Domínguez, and Porfirio Caballero-Mata. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con etanol. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13(3):293–306, 2012.
- [91] Matthew A Ratcliff, Jonathan L Burton, Petr Sindler, Robert L McCormick, Earl D Christensen, and Lisa A Fouts. Effects of heat of vaporization and octane sensitivity on knock-limited spark ignition engine performance. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2018.



DICTAMEN DE TESIS

INFORMACIÓN DE LA TESIS

Autor	
Título	
Programa Educativo	
Director	
Co-Director (si aplica)	
Revisores (nombre, dependencia, institución, empresa)	

En mi carácter de Coordinador Académico del Programa Educativo arriba indicado, y con fundamento en los Informes de Evaluación de Tesis emitidos por el Comité de Evaluación de Tesis, hago constar que fue desarrollada de acuerdo a la metodología científica y que el contenido del documento es legítimo (ver anexos). Presenta _____% de similitud con otros documentos según reporte emitido por _____ y contiene el nivel para la obtención del grado correspondiente.

Por lo anterior, la decisión final es que sea ACEPTADA para su defensa.

Cd. Universitaria, _____

Coordinador Académico del Programa Educativo



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

IT-8-SPG-05-R07



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

ANEXOS

Indicaciones: Favor de anexar el reporte de similitud de la tesis, firmado por el Director de Tesis.

Si existen publicaciones arbitradas o algún otro producto (como patente, diseño de utilidad, etc.) derivados del trabajo de tesis, enliste las referencias completas de los mismos. Si no, deje en blanco el siguiente recuadro.



Revisión: 2
Vigente a partir de: 1 de agosto de 2021

Ciudad Universitaria Pedro de Alba s/n, C.P. 66455. A.P. 076 Suc. "F"
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tels: (81) 8332 0903 /
Conm.: 8329 4020 / Fax: (81) 8332 0904



INFORME DE EVALUACIÓN DE TESIS¹

IDENTIFICACIÓN DEL REVISOR DE TESIS

Nombre completo	
Institución de afiliación	
Correo electrónico	

INFORMACIÓN DE LA TESIS

Autor	
Título	
Programa Educativo	

EVALUACIÓN DEL DOCUMENTO DE TESIS

Instrucciones: Lea con atención cada uno de los criterios de evaluación antes de proceder a evaluarlos y utilice la puntuación más alta únicamente en casos que sean sobresalientes. Justifique la puntuación otorgada en el espacio asignado por criterio (escriba al menos 200 caracteres). Cualquier comentario que no disponga de espacio en este formato, puede anexarlo en una hoja adicional debidamente firmada.

Escala de evaluación:

- 4-Excelente
- 3-Bueno
- 2-Suficiente
- 1-No aceptable

Para autorizar la aceptación para su defensa, es necesaria una calificación promedio mayor o igual a 2.

¹Utilice Adobe Acrobat reader para llenarlo. Si no lo tiene, puede descargarlo de la página de Adobe <https://get.adobe.com/reader/otherversions/>





Elementos evaluados en el documento	Evaluación (1-4)
<p>Hipótesis de la investigación. Existe congruencia entre la hipótesis y los objetivos generales y particulares. La hipótesis está respaldada con el marco teórico y antecedentes. La experimentación realizada fue encaminada a la validación de ésta y los resultados obtenidos la responden.</p>	
<p>Metodología. Es adecuada para que los resultados contribuyan al alcance de los objetivos y la validación de la hipótesis. La metodología presenta de forma detallada las consideraciones teóricas (por ejemplo, suposiciones, simplificaciones, etc.), los diseños, las variables, las muestras, los equipos, los procedimientos de recolección de datos y las técnicas de análisis de datos utilizados. Los procedimientos son replicables.</p>	
<p>Análisis de resultados. Se realizó un análisis e interpretación de resultados claro y bien estructurado; buen uso de gráficos, tablas y otros medios de presentación. Se relacionan los resultados obtenidos con los de trabajos previos, explicando su importancia y sentido físico o práctico. Existe coherencia entre los resultados y el marco teórico desarrollado en la tesis.</p>	
<p>Conclusiones. Se fundamentan en el análisis de los resultados y en general muestran el alcance de los objetivos.</p>	



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

IT-8-SPG-05-R06



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Aporte y originalidad. Justifica claramente cómo se superan las limitaciones o desventajas de los enfoques previos para tratar con el problema relacionado. Se especifica detalladamente la generación de nuevo conocimiento o su contribución al desarrollo tecnológico.	
Impacto, pertinencia y relevancia. La investigación realizada es pertinente en el contexto actual y responde a requerimientos o demandas de los sectores: académico, social y/o productivo.	
Productos generados. Los resultados se han publicado en revistas arbitradas y/o han sido presentados en foros científicos. Han dado lugar a transferencia tecnológica o han sido sujeto de protección de propiedad industrial (patentes, diseños industriales, etc).	
Presentación y organización del documento. Está estructurado de acuerdo con los estándares de un reporte de investigación. Se presenta un estilo coherente a lo largo del documento. Éste es claro, conciso y está escrito con ortografía y gramática correctas. Se hace uso adecuado de citas y referencias a tablas y figuras. Los gráficos y tablas son legibles. Las referencias bibliográficas son recientes y adecuadas.	
Calificación promedio	

Por lo anterior, considero que ___ cuenta con el nivel para la obtención del grado correspondiente y recomiendo que sea _____ para su defensa.

Nombre y firma: _____

Fecha: _____



Revisión 2
Vigente a partir de: 1 de agosto de 2021

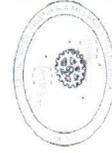
Ciudad Universitaria Pedro de Alba s/n, C.P. 66455. A.P. 076 Suc. "F"
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tels: (81) 8332 0903 /
Conm.: 8329 4020 / Fax: (81) 8332 0904



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

IT-8-SPG-05-R06



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

INFORME DE EVALUACIÓN DE TESIS¹

IDENTIFICACIÓN DEL REVISOR DE TESIS

Nombre completo	M.C., Miguel García Yera
Institución de afiliación	FIME
Correo electrónico	miguel.garciayr@uanl.edu.mx

INFORMACIÓN DE LA TESIS

Autor	Francisco Javier Salas Montaña
Título	Caracterización experimental de la emisión del número de nanopartículas durante el proceso de combustión MEP con gasolinas mexicanas, alcoholes puros y mezclas oxigenadas
Programa Educativo	Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Energías Térmica y Renovable

EVALUACIÓN DEL DOCUMENTO DE TESIS

Instrucciones: Lea con atención cada uno de los criterios de evaluación antes de proceder a evaluarlos y utilice la puntuación más alta únicamente en casos que sean sobresalientes. Justifique la puntuación otorgada en el espacio asignado por criterio (escriba al menos 200 caracteres). Cualquier comentario que no disponga de espacio en este formato, puede anexarlo en una hoja adicional debidamente firmada.

Escala de evaluación:

- 4-Excelente
- 3-Bueno
- 2-Suficiente
- 1-No aceptable

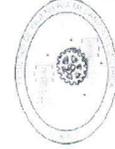
Para autorizar la aceptación para su defensa, es necesaria una calificación promedio mayor o igual a 2.

¹Utilice Adobe Acrobat reader para llenarlo. Si no lo tiene, puede descargarlo de la página de Adobe <https://get.adobe.com/reader/otherversions/>



Revisión: 2
Vigente a partir de: 1 de agosto 2021

Ciudad Universitaria Pedro de Alba s/n, C.P. 66455. A.P. 076 Suc. "F"
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tels: (81) 8332 0903 /
Conm.: 8329 4020 / Fax: (81) 8332 0904



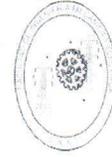
Elementos evaluados en el documento	Evaluación (1-4)
<p>Hipótesis de la investigación. Existe congruencia entre la hipótesis y los objetivos generales y particulares. La hipótesis está respaldada con el marco teórico y antecedentes. La experimentación realizada fue encaminada a la validación de ésta y los resultados obtenidos la responden.</p> <p>La hipótesis es congruente con los objetivos de la tesis en la cual se pretende demostrar que existe una relación proporcional entre la concentración del número de nanopartículas emitidas durante el proceso de combustión y el aumento en la relación de compresión de un motor de encendido provocado.</p>	<p>4</p> <p>254 caracteres.</p>
<p>Metodología. Es adecuada para que los resultados contribuyan al alcance de los objetivos y la validación de la hipótesis. La metodología presenta de forma detallada las consideraciones teóricas (por ejemplo, suposiciones, simplificaciones, etc.), los diseños, las variables, las muestras, los equipos, los procedimientos de recolección de datos y las técnicas de análisis de datos utilizados. Los procedimientos son replicables.</p> <p>La tesis presenta la metodología realizando pimeramente la descripción de la instalación experimental y los equipos a utilizar; posteriormente se presentan las técnicas, procedimientos y la matriz experimental, así como los parámetros a establecer.</p>	<p>3</p> <p>215 caracteres.</p>
<p>Análisis de resultados. Se realizó un análisis e interpretación de resultados claro y bien estructurado; buen uso de gráficos, tablas y otros medios de presentación. Se relacionan los resultados obtenidos con los de trabajos previos, explicando su importancia y sentido físico o práctico. Existe coherencia entre los resultados y el marco teórico desarrollado en la tesis.</p> <p>Se presenta el análisis de resultado mediante una discusión de los parámetros más relevantes realizados durante el trabajo explicando la importancia de los mismos y su sentido físico, estos son coherentes con el marco teórico y los objetivos presentados.</p>	<p>3</p> <p>216 caracteres.</p>
<p>Conclusiones. Se fundamentan en el análisis de los resultados y en general muestran el alcance de los objetivos.</p> <p>La tesis cumple con la fundamentación de los resultados presentados mediante el análisis para cada elemento de la matriz por medio de gráficos de cajas y bigote que describen los resultados obtenidos a partir del analizador de nanopartículas.</p>	<p>3</p> <p>207 caracteres.</p>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

IT-8-SPG-05-R06



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Aporte y originalidad. Justifica claramente cómo se superan las limitaciones o desventajas de los enfoques previos para tratar con el problema relacionado. Se especifica detalladamente la generación de nuevo conocimiento o su contribución al desarrollo tecnológico.	3
En la tesis se detalla la generación de nuevo conocimiento relacionado con la emisión de nanopartículas detalladas para las diferentes mezclas de combustibles analizados y para los diversos parámetros de operación del motor de encendido provocado.	212 caracteres.
Impacto, pertinencia y relevancia. La investigación realizada es pertinente en el contexto actual y responde a requerimientos o demandas de los sectores: académico, social y/o productivo.	3
La investigación realizada es pertinente con el contexto actual del mundo global en el cual se busca disminuir la emisiones contaminantes de los vehículos, respondiendo a las demandas de la academia, industrias y los estados en la búsqueda de nuevas tecnologías.	221 caracteres.
Productos generados. Los resultados se han publicado en revistas arbitradas y/o han sido presentados en foros científicos. Han dado lugar a transferencia tecnológica o han sido sujeto de protección de propiedad industrial (patentes, diseños industriales, etc).	2
Los resultado se publicaron las memorias de divulgación científica y tecnológica de la ingeniería mecánica en México, XXVII Congreso Internacional Anual se la SOMIM.	142 caracteres.
Presentación y organización del documento. Está estructurado de acuerdo con los estándares de un reporte de investigación. Se presenta un estilo coherente a lo largo del documento. Éste es claro, conciso y está escrito con ortografía y gramática correctas. Se hace uso adecuado de citas y referencias a tablas y figuras. Los gráficos y tablas son legibles. Las referencias bibliográficas son recientes y adecuadas.	3
La tesis está estructurada de manera correcta de acuerdo a los estándares establecidos por la institución académica, el documento es claro y conciso en sus argumentos, la ortografía y la gramática son correctas, y se hace un uso adecuado de las referencias y citas bibliográficas.	236 caracteres.
Calificación promedio	3.00

Por lo anterior, considero que Sí cuenta con el nivel para la obtención del grado correspondiente y recomiendo que sea Aceptada para su defensa.

Nombre y firma: M.C. Miguel García Yera

Fecha: 1/6/23



Revisión 2
Vigente a partir de: 1 de agosto de 2021

Ciudad Universitaria Pedro de Alba s/n, C.P. 66455. A.P. 076 Suc. "F"
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tels: (81) 8332 0903 /
Conm.: 8329 4020 / Fax: (81) 8332 0904



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

IT-8-SPG-05-R06



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

INFORME DE EVALUACIÓN DE TESIS¹

IDENTIFICACIÓN DEL REVISOR DE TESIS

Nombre completo	Dr. Pedro López Cruz
Institución de afiliación	FIME-UANL
Correo electrónico	pedro.lopezcr@uanl.edu.mx

INFORMACIÓN DE LA TESIS

Autor	Francisco Javier Salas Montaña
Título	Caracterización experimental de la emisión del número de nanopartículas durante el proceso de combustión MEP con gasolinas mexicanas, acoholes puros y mezclas oxigenadas
Programa Educativo	Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Energías Térmica y Renovable

EVALUACIÓN DEL DOCUMENTO DE TESIS

Instrucciones: Lea con atención cada uno de los criterios de evaluación antes de proceder a evaluarlos y utilice la puntuación más alta únicamente en casos que sean sobresalientes. Justifique la puntuación otorgada en el espacio asignado por criterio (escriba al menos 200 caracteres). Cualquier comentario que no disponga de espacio en este formato, puede anexarlo en una hoja adicional debidamente firmada.

Escala de evaluación:

- 4-Excelente
- 3-Bueno
- 2-Suficiente
- 1-No aceptable

Para autorizar la aceptación para su defensa, es necesaria una calificación promedio mayor o igual a 2.

¹Utilice Adobe Acrobat reader para llenarlo. Si no lo tiene, puede descargarlo de la página de Adobe <https://get.adobe.com/reader/otherversions/>



Revisión: 2
Vigente a partir de: 1 de agosto 2021

Ciudad Universitaria Pedro de Alba s/n, C.P. 66455. A.P. 076 Suc. "F"
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tels: (81) 8332 0903 /
Conm.: 8329 4020 / Fax: (81) 8332 0904

EDUCACIÓN DE CALIDAD PARA TRANSFORMAR Y
TRANSCENDER EN BENEFICIO DE LA HUMANIDAD



Elementos evaluados en el documento	Evaluación (1-4)
<p>Hipótesis de la investigación. Existe congruencia entre la hipótesis y los objetivos generales y particulares. La hipótesis está respaldada con el marco teórico y antecedentes. La experimentación realizada fue encaminada a la validación de ésta y los resultados obtenidos la responden.</p>	4
<p>La hipótesis y los objetivos son congruentes. Adicionalmente, el marco teórico y los antecedentes son congruentes para un respaldo adecuado de la hipótesis y objetivos. La experimentación es muy exhaustiva para poder validar lo anterior. Los resultados y conclusiones validan las hipótesis con coherencia.</p>	261 caracteres.
<p>Metodología. Es adecuada para que los resultados contribuyan al alcance de los objetivos y la validación de la hipótesis. La metodología presenta de forma detallada las consideraciones teóricas (por ejemplo, suposiciones, simplificaciones, etc.), los diseños, las variables, las muestras, los equipos, los procedimientos de recolección de datos y las técnicas de análisis de datos utilizados. Los procedimientos son replicables.</p>	4
<p>El documento presenta un planteamiento adecuado de las teorías aplicables, incluyendo formulaciones matemáticas y suposiciones adecuadas. La experimentación fue planeada muy meticulosamente para poder validar la hipótesis y llevada a cabo de manera muy exhaustiva y tratada con equipo de medición adecuado.</p>	265 caracteres.
<p>Análisis de resultados. Se realizó un análisis e interpretación de resultados claro y bien estructurado; buen uso de gráficos, tablas y otros medios de presentación. Se relacionan los resultados obtenidos con los de trabajos previos, explicando su importancia y sentido físico o práctico. Existe coherencia entre los resultados y el marco teórico desarrollado en la tesis.</p>	4
<p>La calidad del tratamiento estadístico de los datos recolectados es notoria y de muy buena calidad. Presenta un detalle teórico exhaustivo de las técnicas estadísticas y las gráficas de resultados indican el tratamiento propuesto. Toda la información es coherente con el marco teórico y objetivos propuestos.</p>	263 caracteres.
<p>Conclusiones. Se fundamentan en el análisis de los resultados y en general muestran el alcance de los objetivos.</p>	4
<p>En general, los resultados validan el propósito general y están alineados entre objetivos, marco teórico, experimentación, análisis de resultados y conclusiones. No hay desvíos de los planteamientos iniciales y metas. Las conclusiones se presentan alineadas los objetivos específicos.</p>	247 caracteres.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

IT-8-SPG-05-R06



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Aporte y originalidad. Justifica claramente cómo se superan las limitaciones o desventajas de los enfoques previos para tratar con el problema relacionado. Se especifica detalladamente la generación de nuevo conocimiento o su contribución al desarrollo tecnológico.	4
Se define claramente en el objetivo el ampliar la información referente a motores CRF en cuanto a la emisión de nanopartículas considerando diferentes mezclas de combustible. Esto contribuye a nueva información tecnología del funcionamiento de este tipo de dispositivos.	233 caracteres.
Impacto, pertinencia y relevancia. La investigación realizada es pertinente en el contexto actual y responde a requerimientos o demandas de los sectores: académico, social y/o productivo.	4
Este trabajo de tesis es relevante en todos los contextos. En lo académico contribuye en la formación de capital humano especializado. En lo social, se plantea la importancia de controlar las emisiones de combustibles para una mejor sustentabilidad ambiental. Y en lo productivo, puesto que este conocimiento es aplicable al correcto funcionamiento de motores de combustión.	319 caracteres.
Productos generados. Los resultados se han publicado en revistas arbitradas y/o han sido presentados en foros científicos. Han dado lugar a transferencia tecnológica o han sido sujeto de protección de propiedad industrial (patentes, diseños industriales, etc).	3
Parte de los resultados del presente trabajo se han presentado en el XXVIII congreso internacional de SOMIM, donde se presentaron dos trabajos con memorias en extenso y donde el autor de la tesis es primer autor en uno de ellos y colaborador en el segundo.	212 caracteres.
Presentación y organización del documento. Está estructurado de acuerdo con los estándares de un reporte de investigación. Se presenta un estilo coherente a lo largo del documento. Éste es claro, conciso y está escrito con ortografía y gramática correctas. Se hace uso adecuado de citas y referencias a tablas y figuras. Los gráficos y tablas son legibles. Las referencias bibliográficas son recientes y adecuadas.	4
El documento se presenta en forma coherente, tal como debe ser una tesis de posgrado. El formato del documento en general, el estilo de redacción, el tratamiento de imágenes, índices y tablas en congruente y entendible. De igual manera, las referencias bibliográfica son adecuadas	237 caracteres.
Calificación promedio	3.88

Por lo anterior, considero que Sí cuenta con el nivel para la obtención del grado correspondiente y recomiendo que sea Aceptada para su defensa.

Nombre y firma: Dr. Pedro López Cruz

Fecha: 5/12/23



Revisión 2
Vigente a partir de: 1 de agosto de 2021

Ciudad Universitaria Pedro de Alba s/n, C.P. 66455. A.P. 076 Suc. "F"
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tels: (81) 8332 0903 /
Conm.: 8329 4020 / Fax: (81) 8332 0904