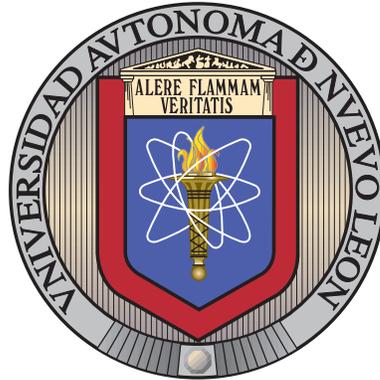


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
DE LA INFLUENCIA DEL HHO EN LAS
EMISIONES DE ESCAPE DE UN MOTOR
CFR USANDO UNA CELDA
ELECTROLÍTICA

POR

ING. LILIA LOURDES CABRAL MACHUCA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

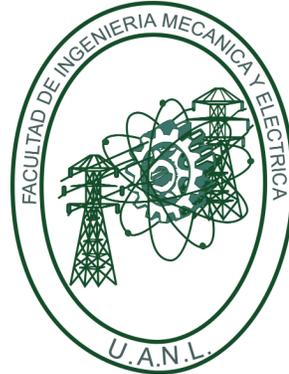
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

JULIO 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
DE LA INFLUENCIA DEL HHO EN LAS
EMISIONES DE ESCAPE DE UN MOTOR
CFR USANDO UNA CELDA
ELECTROLÍTICA

POR

ING. LILIA LOURDES CABRAL MACHUCA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

JULIO 2024

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 influencia del HHO en las emisiones de escape de un motor CFR usando una celda electrolítica”, realizada por la estudiante Lilia Lourdes Cabral Machuca, con número de matrícula 2172449, 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. Daniel de la Rosa Urbalejo
Director

Dr. Simón Martínez Martínez
Co-Director

Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León
Revisor

M.C. Miguel García Yera
Revisor

M.C. María José Carbajal Pérez
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 507507

Acta Núm. 4443

Ciudad Universitaria, a 14 de noviembre de 2024.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XIII
Resumen	XV
1. Introducción	1
1.1. Motivación.	2
1.2. Estado actual del conocimiento.	8
1.2.1. Comportamiento de las emisiones generadas por el motor utilizando mezclas gasolina-HHO.	8
1.2.2. Desempeño del motor utilizando mezclas gasolina-HHO.	10
1.2.3. Control de la producción de HHO.	11
1.3. Planteamiento del problema.	13
1.4. Hipótesis.	14
1.5. Objetivos.	14
1.5.1. Objetivo general.	14
1.5.2. Objetivos específicos.	15

1.6. Alcance.	16
2. Marco teórico	17
2.1. La combustión en los motores de encendido provocado.	18
2.1.1. Relación de compresión en los motores.	20
2.1.2. Presión dentro del cilindro.	21
2.1.3. Tiempo de descarga de la bujía.	22
2.1.4. Etapas de la combustión.	22
2.2. Motor de relación de compresión variable tipo CFR.	25
2.3. La autoignición en los motores de encendido provocado.	25
2.4. Emisiones contaminantes en los motores de encendido provocado. . .	27
2.4.1. Monóxido de carbono.	27
2.4.2. Dióxido de carbono.	28
2.4.3. Hidrocarburos sin quemar.	28
2.4.4. Material particulado.	29
2.4.5. Óxidos de nitrógeno.	30
2.5. La producción de HHO y su impacto en los motores de combustión. .	31
2.5.1. Sistemas de inyección.	33
3. Metodología	37
3.1. Caracterización de los combustibles.	38
3.2. Descripción de la instalación experimental.	39

3.2.1. Motor de compresión variable CFR F1/F2.	40
3.2.2. Sistema de producción de HHO.	43
3.2.3. Sensor de flujo másico Alicat M-500SCCM-S/5M.	45
3.2.4. Analizador de los gases de escape MAHA MET 6.3.	46
3.2.5. Adquisición de datos de la señal de presión en cámara.	48
3.3. Matriz experimental.	49
3.3.1. Parámetros del motor CFR.	50
3.3.2. Gas HHO. Caracterización de la celda electrolítica.	51
3.3.3. Matriz experimental y condiciones de operación.	52
3.4. Tratamiento de datos.	54
3.4.1. Determinación de intensidad y probabilidad de aparición del knock.	54
3.4.2. Análisis de los gases de escape.	58
4. Resultados del efecto del HHO en la combustión del motor CFR	63
4.1. Resultados de la caracterización de la celda electrolítica.	64
4.2. Curvas de presión en la cámara de combustión.	65
4.3. Intensidad y frecuencia del knock.	68
4.4. Duración de la primera fase de la combustión.	71
4.5. Análisis de los gases de escape.	72
4.5.1. Emisiones del Material Particulado.	72

4.5.2. Emisiones de Monóxido de Carbono y Dióxido de Carbono.	74
4.5.3. Emisiones de Oxígeno.	76
4.5.4. Emisiones de los Hidrocarburos sin Quemar.	78
4.5.5. Emisiones de los Óxidos de Nitrógeno.	80
5. Conclusiones y trabajos futuros.	83
5.1. Caracterización de la celda electrolítica.	84
5.2. Presión en la cámara de combustión.	85
5.3. Duración de la primera fase de la combustión.	85
5.4. Presencia e intensidad del knock.	86
5.5. Gases de escape.	87
5.6. Trabajos futuros.	90
A. Resultados de la caracterización de la celda de HHO.	92
A.1. Resultados teóricos de la producción de HHO.	92
A.2. Resultados experimentales de la producción de HHO.	94
B. Gráficas de presión.	95
B.1. Curvas de presión en cámara.	95
B.2. Gráficas de presión máxima en cámara.	97
B.3. Gráficas de intensidad de autoignición máxima.	98
C. Tablas de resultados numéricos.	100

C.1. Valores de presión en cámara.	100
C.2. Valores de las emisiones de escape.	102

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Clasificación de los Motores de Combustión Interna. Figura basada en la información de Heywood, 1998.	18
2.2. Representación del ciclo de 4 tiempos de un motor de encendido provocado.	19
2.3. Relación de compresión de un motor.	20
2.4. Curvas de presión en el cilindro de un MEP.	22
2.5. Ubicación de las tres fases de la combustión en la curva FMCQ con respecto al ángulo de cigüeñal.	23
2.6. Celda de electrólisis.	32
2.7. Método de inducción del carburador.	34
2.8. Inyección del combustible en el puerto de admisión.	35
2.9. Inyección directa.	35
3.1. Fotografía de la instalación experimental.	39
3.2. Diagrama general de la instalación experimental.	40
3.3. Diagrama de conexión de la celda acoplada a un motor.	44
3.4. Diagrama del sistema de producción de <i>HHO</i>	44

3.5. Equipo medidor de flujo másico Alicat M-500SCCM-S/5M.	45
3.6. Equipo analizador de gases de escape MAHA MET 6.3.	47
3.7. Equipo osciloscopio ScopeCorder Yokogawa DL850E.	48
3.8. Señal de presión en cámara para un ciclo de combustión con autoig- nición.	49
3.9. Celda electrolítica Hydrocell para 4 cilindros.	51
3.10. Workspace de Matlab con el código precargado.	57
3.11. Interfaz del programa Análisis de la Combustión.	57
3.12. Carga de los archivos de datos de presión.	57
3.13. Programa Análisis de la Combustión con datos cargados correctamente.	58
3.14. Posiciones de la válvula del motor para el analizador MAHA.	61
4.1. Curvas de presión para el combustible G100 y GHHO para una $RC=7.36$, a) $38^{\circ}C$ y b) $68^{\circ}C$	67
4.2. Comparación de la presión máxima promedio para los combustibles estudiados.	68
4.3. Comparación de la IA para los distintos combustibles y RC.	69
4.4. Comparación de la probabilidad de aparición de knock para las dis- tintas mezclas y RC.	70
4.5. DPFC para los combustibles estudiados.	72
4.6. Niveles de emisión de PM para las distintas RC.	74
4.7. Niveles de emisión de CO para las distintas RC.	75

4.8. Niveles de emisión de CO_2 para las distintas RC.	76
4.9. Niveles de emisión de O_2 para las distintas RC.	77
4.10. Niveles de emisión de HC para las distintas RC.	79
4.11. Niveles de emisión de NOx para las distintas RC.	82
B.1. Curvas de presión de cada combustible a $RC=7.86$ y $T_{adm}=38^\circ C$. . .	95
B.2. Curvas de presión de cada combustible a $RC=7.86$ y $T_{adm}=68^\circ C$. . .	96
B.3. Curvas de presión de cada combustible a $RC=8.45$ y $T_{adm}=38^\circ C$. . .	96
B.4. Curvas de presión de cada combustible a $RC=8.45$ y $T_{adm}=68^\circ C$. . .	97
B.5. Presión máxima en cámara; $T_{adm}=38^\circ C$	97
B.6. Presión máxima en cámara; $T_{adm}=68^\circ C$	98
B.7. Intensidad de autoignición máxima en cámara; $T_{adm}=38^\circ C$	98
B.8. Intensidad de autoignición máxima en cámara; $T_{adm}=68^\circ C$	99

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Información fisicoquímica del hidrógeno (H_2).	7
3.1. Propiedades de los combustibles puros utilizados en la investigación. .	38
3.2. Especificaciones del motor CFR.	41
3.3. Características técnicas del sensor Alicat M-500SCCM-S/5M.	46
3.4. Especificaciones técnicas del analizador de gases MAHA MET 6.3. . .	47
3.5. Condiciones de operación del motor CFR.	50
3.6. Matriz experimental diseñada.	53
4.1. Resultados numéricos de los caudales de HHO teórico y experimental.	64
4.2. Propiedades del gas HHO registradas por el sensor Alicat M-500SCCM- S/5M.	64
4.3. Condiciones de operación del motor para G100.	65
4.4. Condiciones de operación del motor para GHHO.	66
A.1. Valores estadísticos de la producción de HHO	94
A.2. Valores estadísticos de temperatura y presión registrada por el sensor	94

C.1. Valores de presión para G100 a 38°C	100
C.2. Valores de presión para G100 a 68°C	101
C.3. Valores de presión para GHHO a 38°C	101
C.4. Valores de presión para GHHO a 68°C	102
C.5. Medias armónicas de λ para las mezclas usadas	102
C.6. Medias armónicas de PM para las mezclas usadas	103
C.7. Medias armónicas de CO para las mezclas usadas	103
C.8. Medias armónicas de CO_2 para las mezclas usadas	104
C.9. Medias armónicas de O_2 para las mezclas usadas	104
C.10. Medias armónicas de HC para las mezclas usadas	105
C.11. Medias armónicas de NOx para las mezclas usadas	105

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi padre y madre, por ser los pilares más fuertes en mi vida, permitiéndome crecer profesional y espiritualmente, por ser mi más grande ejemplo a seguir para ser un miembro útil en la sociedad, dándome la oportunidad de crecer como una mujer fuerte e independiente. Al igual que mis hermanos, son mi fortaleza para buscar mi propósito en la vida y seguir creciendo como persona.

A toda mi familia en general, a mis hermanos, abuelos, tíos y primos, por todo el cariño, el apoyo y la confianza que han otorgado en mi persona. Así como a la Dr. María de los Ángeles Solórzano Murillo por alentarme en el estudio de las ciencias, motivarme hacia el crecimiento profesional considerando siempre el aporte hacia la sociedad y el mundo.

A mi director, el Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo por su apoyo y acompañamiento durante mi estancia en la maestría, además del asesoramiento proporcionado en cada etapa de la presente investigación. A mi codirector el Dr. Simón Martínez Martínez por compartir su conocimiento y experiencia, además de facilitar la realización de esta investigación a través del laboratorio Físicoquímica de la Combustión.

Agradezco a mis amigos y compañeros, por su disposición y acompañamiento para ayudar en los distintos inconvenientes presentados día con día. Por sus palabras de apoyo, por las convivencias y anécdotas compartidas. Por hacer de mi estancia lejos de casa sea más llevadero.

A todos los maestros del programa por sus lecciones, su disposición y su paciencia, por las experiencias brindadas, que sin duda han sido las mejores.

Quiero agradecer al M.C. Luis Fernando Rúa Mojica, por colaborar en cada etapa de la investigación, por su asesoramiento y capacitación en el uso de la instalación experimental, así como las lecciones de ingeniería brindadas desde mi ingreso a la maestría.

Al Grupo de Energías Térmica y Renovable, por aceptarme y permitirme formar parte de los proyectos de investigación, dándome la oportunidad de crecer de forma profesional y así cumplir las metas planteadas por mi persona desde el momento en que decidí aplicar al posgrado.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) del Gobierno de México, por el financiamiento de este trabajo a través de la beca asociada al CVU 1238952.

RESUMEN

Ing. Lilia Lourdes Cabral Machuca.

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 INFLUENCIA DEL HHO EN LAS EMISIONES DE ESCAPE DE UN MOTOR CFR USANDO UNA CELDA ELECTROLÍTICA.

Número de páginas: 115.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo principal de esta investigación es caracterizar experimentalmente la influencia del *HHO* en la mezcla de combustible en la disminución de las emisiones *CO*, *HC*, *PM* y *NO_x*, a través de la implementación de una celda de electrólisis en un motor de relación variable tipo CFR.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Mediante la investigación realizada se caracterizó el comportamiento de las curvas de presión y emisiones con el uso del *HHO* como aditivo en un motor de encendido provocado tipo CFR al cambiar las relaciones de compresión y variar la temperatura del aire de admisión en gasolina magna. Se percibió una dependencia de la temperatura del aire de admisión y el manejo del valor lambda (λ) sobre las emisiones contaminantes, así como una liberación de energía mayor a altas relaciones de compresión en la mezcla gasolina-*HHO* en comparación a la gasolina magna.

Firma del director: _____
Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la motivación que guía el presente trabajo, con relación al uso del HHO como aditivo de la gasolina en fuentes móviles. Posteriormente, se describen las investigaciones y estudios recientes relacionados a la combustión del HHO en los MEP. Finalmente, se muestra el planteamiento de la investigación, definiendo la hipótesis que se pretende validar, así como los objetivos general y específicos para la realización de la tesis.

1.1 MOTIVACIÓN.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) [1], publicó un comunicado reportando que en el 2012 se registraron 7 millones de muertes causadas por la exposición a la contaminación atmosférica en el mundo. Además, advierte sobre los daños que provoca el material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ sobre los sistemas cardiovascular y respiratorio. Estos componentes son productos de la quema de combustibles fósiles usados mayormente en los sectores: transporte, energía, industria pesada y manejo de desechos.

El exceso de contaminación atmosférica es consecuencia de políticas no sostenibles. Ante esto, la OMS declara que a largo plazo será de suma importancia desarrollar y aplicar estrategias cuya prioridad sea el sector salud; considerando que se tendría un impacto social, ambiental y económico. Considerando esta situación, se desarrolló el reporte *Climate Emergency, Urban Opportunity*, en el que expone que una transición hacia ciudades sin carbono aseguraría la prosperidad económica nacional y mejoraría la calidad de vida mientras se combate el cambio climático. Para el 2050 se estima una reducción de hasta un 90 % en los gases de efecto invernadero (GEI), esto mediante la aplicación de estrategias de mitigación disponibles y viables en cada nación. El 58 % de estas emisiones procederían del sector de construcción, el 21 % correspondería al sector del transporte, 16 % de la eficiencia de los materiales y finalmente el 5 % del sector de los residuos [2].

En 2018, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) emitió un boletín en el cual define como fuente contaminante a toda actividad u operación que pueda producir contaminantes hacia la atmósfera. Así mismo, expone la clasificación de los contaminantes; ya sea por el origen del contaminante (contaminantes primarios o secundarios), o por el tipo de fuente (fijas, de área, móviles, naturales). Debido a la creciente necesidad de combatir el cambio climático, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) desarrolló un inventario

nacional de emisiones con la finalidad de gestionar la calidad del aire y registrar las emisiones de contaminantes generadas en México. De acuerdo con lo registrado en el 2019, las emisiones de GEI ascendieron a 736.6 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente ($MtCO_2e$). De esta cifra un 23.3 % corresponde a las actividades de generación de energía eléctrica, 18.5 % se debe a las emisiones del autotransporte y el 13.2 % a la ganadería de bovinos. A su vez, se observó que el principal GEI es el dióxido de carbono (CO_2) con 67 %, seguido por el metano (CH_4) con 24 % y el óxido nitroso (NO) con 6 %. Donde la la generación de CO_2 se deriva por la demanda de energía a nivel nacional y el autotransporte [3, 4, 5, 6].

Dirigiendo la investigación sobre el sector de transporte, diversos autores han realizado estudios sobre el uso de nuevas tecnologías y combustibles en motores de gasolina y diésel, proponiendo el uso de mezclas y aditivos que permitan la reducción de las emisiones debido a las propiedades que ofrecen. Entre estas propiedades destaca la calidad del combustible; acorde a lo descrito por Wei Z. et al. [7], un combustible de mala calidad puede contribuir a la formación de corrosión por picaduras (por sus siglas en inglés *pitting*) en el cilindro, pistón, válvulas e incluso el escape del motor, mostrando un impacto sobre las emisiones de escape y el rendimiento del motor. Entre las investigaciones realizadas sobre los combustibles alternativos, se encuentra el de Goñi Delión et al. [8], quienes analizaron mezclas gasolina-alcohol y diésel-biodiésel en motores de Ciclo Otto y Ciclo Diésel, donde se midió el comportamiento en el consumo de combustible con relación al torque y la potencia, y la variación de la eficiencia con respecto al consumo de combustible, torque y la potencia de cada motor. Al finalizar el estudio, encontraron que cuando la concentración de biocombustible es de 10 % para gasolina y 12 % para diésel. Por otra parte, Montes et al. [9] contrastaron diferentes combustibles alternativos para motores de gasolina, haciendo un análisis con respecto al impacto ambiental y la factibilidad económica de cada uno de estos combustibles. Evaluaron el diésel, GLP, GNL, metanol, etanol, gasolina reformulada e hidrógeno. Donde este último mostró una combustión más completa y limpia, sin embargo, cuando la temperatura alcanza niveles superiores a

los 1 500 °C los óxidos de nitrógeno (NO_x) aumentan exponencialmente. En su trabajo sugiere controlar la temperatura introduciendo agua a la mezcla hidrógeno/aire o trabajando con exceso de aire, de igual manera se menciona que el hidrógeno es muy inflamable incluso en mezclas diluidas.

Aunado a los estudios anteriores, la United States Environmental Protection Agency (US EPA) define como combustible alternativo aquel que se deriva de fuentes diferentes del petróleo y generalmente genera menos emisiones contaminantes que la gasolina y el diésel. Menciona que los principales combustibles alternativos en Estados Unidos son el etanol, la electricidad, el biodiésel, el gas propano, el gas natural y el hidrógeno; donde los vehículos que funcionan con este último no emiten contaminantes. Sin embargo, el uso del hidrógeno enfrenta retos importantes como la poca disponibilidad de estaciones públicas, costos elevados de los vehículos que usan este combustible, además de que es difícil de almacenar debido a que contiene menor energía en relación con su volumen [10].

En los últimos años el uso del automóvil ha crecido aunado al aumento en la producción vehicular en México. De acuerdo con los registros del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el 2021 se registraron 53 115 396 vehículos de motor en circulación. Considerando dicha cifra, la Secretaría de Energía en México (SENER) clasificó en el *Sistema de Información Energética* el parque vehicular por tipo de combustible, donde en el 2023 se registraron aproximadamente 42 262 000 unidades que utilizan gasolina como combustible [11, 12]. Estas cifras implican un crecimiento considerable en la demanda de combustibles fósiles, dando paso al incremento de emisiones contaminantes, cuyo impacto no es sólo ambiental, sino que también, como se mencionó con anterioridad, se percibe un efecto dañino a la salud.

Considerando los puntos anteriores, las organizaciones y gobiernos actuales han optado por la implementación de normas, regulaciones y programas que ayuden a controlar las emisiones de gases y a su vez disminuirlas, de tal modo que se logre cumplir con las metas establecidas para un tiempo determinado. El artículo 8 del

Acuerdo de París [13, 14] menciona la importancia de enfrentar las consecuencias y daños relacionados con los efectos del cambio climático. Se debe fortalecer el entendimiento y el apoyo; mediante el mecanismo internacional de Varsovia para las pérdidas y daños, con respecto a los percances provocados por el cambio climático. México destaca porque contribuye con un 8% de las emisiones de GEI, y se estima que el 14.23% corresponde a la parte automotriz. En México las normativas mencionan la regulación de ciertos componentes considerados como tóxicos para los seres vivos, principalmente hidrocarburos sin quemar (HC), material particulado (PM), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO) [15, 16]. De acuerdo con estudios realizados sobre la materia, existen diversos motivos por los cuales se pueden concentrar los componentes ya mencionados, se ha hecho uso de la simulación y la experimentación para probar el comportamiento de estos gases expuestos a diversas circunstancias similares a un ambiente real [17].

Entre las diversas alternativas estudiadas por los investigadores, se tiene un especial inclinación por la mejora de combustibles para la reducción de la quema de los combustibles fósiles, proyectando este objetivo a la sustitución total de dichos combustibles. Actualmente el uso del hidrógeno como aditivo para el combustible es una solución posible que ha sido estudiada por décadas. El motivo principal de la relevancia de este aditivo es debido a su abundancia en el planeta, la eficiencia que ofrece durante la combustión, aunado al hecho de que su combustión genera vapor de agua. Por estas razones se han desarrollado dispositivos que permitan generar hidrógeno e inyectarlo en el motor como un aditivo para el combustible convencional [18].

El uso del hidrógeno como aditivo ha sido investigado intensamente como una alternativa mucho más amistosa con el medio ambiente, en comparación con la gasolina y el diésel, además, ya se están produciendo automóviles impulsados por hidrógeno que no emiten emisiones contaminantes, aunque las ventas siguen siendo limitadas [19].

El hidrógeno se produce a través de celdas electrolíticas, las cuales se pueden clasificar como celdas húmedas y celdas secas, sin embargo, el principio que las rige para la producción de hidrógeno es el mismo [20]. El proceso de electrólisis consiste en separar molecularmente un electrolito mediante una corriente que fluye a través de la celda, produciéndose una oxidación en el ánodo y una reducción en el cátodo. De esta manera, la molécula del agua (H_2O) se divide en sus elementos; donde los átomos de hidrógeno (H_2) se concentran en el cátodo, mientras que el oxígeno (O) se concentra en el ánodo. Finalmente, la mezcla de estos gases se conoce como oxihidrógeno (HHO).

Es importante mencionar que la electrólisis no es un tema nuevo. Se han realizado estudios sobre las celdas electrolíticas y las configuraciones que pueden mejorar la producción del gas, de tal modo que la electrólisis adquiere mayor rentabilidad. Por ejemplo; Al-Rousan [21] desarrolló y evaluó la generación del gas oxihidrógeno (HHO) de dos prototipos de celdas electrolíticas de distinto tamaño y número de placas, e introdujo dicho gas a un motor de encendido provocado. Al finalizar su estudio demostró que el HHO mejora la eficiencia de la combustión, reduce los niveles de emisiones contaminantes y el consumo de combustible.

Otro caso de estudio fue presentado por Arjun et al. [22], en su investigación realizaron un análisis del desempeño de las celdas de electrólisis en la última década, donde destacan que el uso de nuevas configuraciones de las celdas en conjunto con circuitos modernos permite una producción de gas más eficiente. EL-Kassaby et al. [23] estudiaron los niveles de producción de HHO de una celda electrolítica variando las proporciones del hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de sodio ($NaOH$). Los resultados obtenidos mostraron que el KOH es más factible que el $NaOH$ para la producción de HHO , y que su uso en un motor de combustión ayuda a reducir las emisiones de CO , NOx y HC . Musmar et al. [24] estudiaron experimentalmente el efecto del gas HHO en un motor de encendido provocado variando las velocidades de trabajo. Al finalizar el estudio se comprobó que el HHO redujo el gasto de combustible, se apreció una mejora en la eficiencia de la combustión

y una disminución en las emisiones de HC , O_2 , CO , CO_2 , NO y NO_x . Asimismo, destaca que para las emisiones de HC , la velocidad del motor y la presencia del HHO en la mezcla aire/combustible (A/F) influyen de forma importante sobre los niveles de emisión registrados.

Se ha hablado acerca del uso de las celdas electrolíticas y su desempeño en los últimos años, sin embargo es primordial aclarar el interés de esta investigación sobre la aplicación del producto de la electrólisis, el gas HHO . De acuerdo con la Organización Internacional del Trabajo (por sus siglas en inglés ILO) [25], en su base de datos sobre las Fichas Internacionales de Seguridad Química, el hidrógeno puro tiene las características químicas presentadas en la Tabla 1.1.

TABLA 1.1: Información fisicoquímica del hidrógeno (H_2).

Fórmula	H_2
Masa molecular [g/mol]	2.0
Punto de ebullición [$^{\circ}C$]	-253
Punto de fusión [$^{\circ}C$]	-259
Densidad [kg/m^3]	0.0838 [26]
Punto de inflamación [$^{\circ}C$]	<-253 (gas inflamable) [26]
Temperatura de autoignición [$^{\circ}C$]	560
Límites de explosividad [% en volumen en el aire]	4-75
Presión de vapor [Pa a $23K$]	209
Solubilidad en agua [mg/l a $21^{\circ}C$]	1.62 (muy escasa)
Velocidad máxima de flama en el aire [m/s]	1.83 [26]
Poder calorífico [MJ/kg]	120-142 [27, 28]
Poder calorífico [MJ/m^3]	10.8-12.7 [27, 28]

Complementando la tabla anterior con los trabajos mencionados, se comprueba que el H_2 no es corrosivo y puede usarse en motores de encendido provocado sin efectos tóxicos a la salud de los seres vivos. Además de tener un alto poder calorífico,

su adición a la mezcla A/F aumenta inmediatamente el nivel de octano de cualquier combustible. De igual forma, la presencia del O en el HHO beneficia al proceso de combustión, siendo esta última más eficiente.

1.2 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO.

Durante décadas se han utilizado diversas mezclas y aditivos para el combustible en los MEP. No obstante, la aplicación del hidrógeno como combustible alternativo aún es limitado debido a la complejidad de producción y almacenamiento del gas. En la literatura consultada se pueden encontrar diversas investigaciones sobre las aplicaciones del HHO generado por celdas electrolíticas, tanto en fuentes móviles como en fuentes fijas; análisis de los gases de escape generados en los motores de combustión utilizando HHO , análisis para establecer el desempeño del motor cuando se añade HHO a una mezcla de combustible y métodos para la producción de HHO variando parámetros geométricos en la celda de electrólisis y parámetros en las condiciones de operación de la celda.

1.2.1 COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES GENERADAS POR EL MOTOR UTILIZANDO MEZCLAS GASOLINA- HHO .

Centrando la investigación en las aplicaciones del HHO en motores de combustión interna de encendido provocado, puede usarse el gas solo o como aditivo en la gasolina. Esto se debe a las propiedades del HHO que permiten que el motor funcione con una alta eficiencia de temperatura de frenado, menor consumo de combustible para una mejor y rápida combustión y a su vez se reducen las emisiones contaminantes [29].

González et al. [30] evaluaron el desempeño de un motor cuando funciona con gasolina y una mezcla de gasolina- HHO , las variables de estudio fueron el gasto de

combustible, la eficiencia mecánica del motor y el comportamiento de las emisiones. Al finalizar el estudio se obtuvo un incremento en el tiempo de consumo de 10 *ml* de gasolina cuando se añade el *HHO*, también se registró un decremento en la eficiencia del motor tras la adición del *HHO* a la mezcla A/F. Y en la prueba de los gases contaminantes se encontró una disminución en el *CO* del 13-18%, el *O₂* disminuyó en un 20%, los *HC* decrementaron en un rango de 30-54% y para el *CO₂* se registró un incremento del 5-9%. Por otra parte, en el trabajo de Beccari et al. [31], se evaluó la resistencia a la autoingición y el comportamiento de los *NO_x* en un motor tipo CFR cuando se utiliza hidrógeno como combustible en comparación con el uso de la gasolina. Mediante un sistema de inyección electrónico se controló la masa de combustible suministrado, obteniendo mezclas de diferentes relaciones de A/F. Se realizaron pruebas de hidrógeno y aire con un A/F de 1.5 a 2.5, y se descubrió que los niveles de *NO_x* registrados son más bajos para una relación de $A/F > 1.4$ en comparación con los emitidos por la gasolina, presentando una diferencia de alrededor del 30%. Finalmente con un $A/F=9$ los *NO_x* están muy cerca del cero (30-40 *ppm*).

En el estudio dirigido por Shivaprasad et al. [32] se analizaron las características de las emisiones y el rendimiento de un motor de gasolina utilizando varias mezclas de hidrógeno y gasolina. Los parámetros controlados fueron la variación de las velocidades y la sincronización de la chispa de la bujía. Los resultados mostraron que la eficiencia térmica del freno del motor y la presión de frenado media efectiva primero asciende y luego desciende con al aumentar la velocidad del motor en todos los tiempos de chispa experimentados. Se observó que la cantidad mínima de consumo de energía específico del freno fue a las 3 000 *RPM*, con el 20% de *H₂* en la mezcla de combustible y un ángulo de cigüeñal de 14° antes de la sincronización de la chispa en el punto muerto superior (PMS). Respecto a las emisiones, la concentración de *HC* y *CO* disminuyeron cuando el tiempo de descarga de la bujía se retrasó con respecto al PMS, mientras que los *NO_x* se incrementaron con la adición del hidrógeno.

El trabajo de investigación realizado por Juma Yar et al. [33] consistió en el

diseño, desarrollo y manufactura de una celda de *HHO*, el cual fue inyectado en un MEP. El objetivo fue comprobar los efectos del *HHO* en los parámetros del motor, realizaron pruebas de rendimiento del combustible, potencia, torque y una prueba de emisiones. Al concluir el estudio, se observó que la potencia máxima del motor aumentó en un 15.14 % con la mezcla gasolina-*HHO*, a su vez el torque máximo se redujo en un 4.91 %. Con respecto al consumo de combustible, se registró un ahorro del 7.53 %. Adicionalmente, destaca que el uso de *HHO* mejora la combustión y se disminuye el porcentaje de emisiones de *CO* (20.51 %), *HC* (48 %), y *CO₂* (5.52 %).

1.2.2 DESEMPEÑO DEL MOTOR UTILIZANDO MEZCLAS GASOLINA-*HHO*.

En el estudio experimental realizado por Sharma et al. [34] se fabricó una celda de electrólisis y el gas producido se introdujo a través del colector de admisión de un motor a gasolina. Los parámetros que se estudiaron fueron la potencia de frenado, el rendimiento del combustible, la eficiencia y temperatura de frenado. Los resultados obtenidos muestran que la potencia de frenado incrementó un 11.5 % con la adición del *HHO*, mientras que el consumo de combustible se redujo en un 6.35 %, a su vez la eficiencia térmica de frenado aumentó en promedio un 10.26 %, a su vez la temperatura de los gases de escape disminuyeron en un 4 %. Por otro lado, el trabajo realizado por Wang et al. [35] se centra en la evolución de la investigación y desarrollo de los motores de hidrógeno en China. Al final concluyeron que el hidrógeno es un combustible beneficioso para los motores térmicos debido al amplio rango de ignición y rápida velocidad de combustión, mejorando significativamente las características de combustión y emisión del motor.

El trabajo realizado por Tamayo et al. [36] se orienta al funcionamiento de un MEP con una mezcla de hidrógeno y gasolina. En su investigación resalta que la mezcla de gasolina-hidrógeno presenta una potencia diferente con respecto a la

mezcla gasolina-aire. Al finalizar la investigación se encontró que con el hidrógeno se presenta mayor potencia y el consumo específico de combustible es menor; adicional a estos resultados, la potencia real respecto a la nominal aumenta en un 16.7%, siendo un incremento significativo porque mejora el rendimiento del motor y a su vez reduce las emisiones. Zhao et al. [37] realizaron pruebas a un motor de combustión alimentado con diferentes porciones de gasolina, butanol e hidrógeno; durante las pruebas se midieron parámetros de rendimiento del motor como potencia, eficiencia térmica y la presión del cilindro, así como análisis de gases NO_x , HC y CO . Al final, se encontró que el HHO mejora la eficiencia volumétrica indicada del motor, especialmente cuando se utiliza una alta proporción de butanol. Se redujo el ángulo de la chispa y las emisiones de CO y HC , sin embargo los NO_x aumentaron.

Alm ElDin et al. [38] desarrollaron e implementaron su propia celda en un motor de gasolina, evaluaron el funcionamiento del motor y las concentraciones de gases de escape usando tasas de flujo de 5, 10 y 15 l/min de HHO . Una vez finalizada su experimentación, descubrieron que con el HHO la eficiencia térmica del motor se incrementó en un 10%, resultando en una mejora en el rendimiento del combustible (reducción del 34%). Además de que la concentración de NO_x se redujo a diferentes porcentajes de HHO en un 15%, 18% y 14%. Por otra parte, las emisiones de CO , CO_2 y HC decrecieron, lo cual sugiere que la combustión es más completa. Los autores resaltan el KOH es el mejor electrolito para la formación de HHO , con una concentración media de 6 g/l .

1.2.3 CONTROL DE LA PRODUCCIÓN DE HHO .

Kandah [39] en su investigación comparó diferentes configuraciones de celdas electrolíticas (celdas de placas rectangulares y celdas cilíndricas), con diferentes parámetros geométricos, diferentes concentraciones de electrolitos y flujos de corriente para encontrar el diseño que otorgue mayor eficiencia. Al final encontró que la celda de 22 placas (4 ánodos, 4 cátodos y 14 neutros) con área de $17 \times 15 \text{ cm}^2$ conec-

tados en paralelo e inmersos en 20 g/l de KOH , a una corriente de 20 A, produce 740 ml/min de HHO con una eficiencia del 62.92%. Por otra parte, Salek et al. [40] demostraron que la configuración de celda de placa plana con electrodos a 2 mm de distancia, junto con la aplicación de potencia pulsada de corriente continua a 300 kHz, es altamente efectiva para maximizar la producción de HHO y minimizar la intensidad energética. Sin embargo, recomienda la realización de un análisis de costo-eficiencia para seleccionar la mejor opción de celda electrolítica, considerando los diferentes aspectos técnicos y económicos de cada método de mejora evaluado.

En el estudio realizado por El Kady et al. [41] rediseñaron y fabricaron una celda seca hidroxí (HHO) para producir el máximo caudal de gas y mejorar la eficiencia del electrolizador. El HHO se produjo por electrólisis de agua en placas paralelas de acero inoxidable de 316 l (130 × 105 mm), juntas de 3 mm de espesor utilizando diferentes concentraciones de $NaOH$ y KOH . Se estudiaron los efectos de la corriente de flujo, el voltaje, la concentración de electrolitos, la temperatura, el tiempo de funcionamiento y los tipos de electrolitos en el caudal de HHO . El aumento de 2 a 4 VDC (voltaje de corriente directa) llevó a que la eficiencia del electrolizador aumentara a 51.12%, pero después de eso disminuyó. El aumento de voltaje aplicado de 2 a 11 VDC aumentó el caudal de HHO de 110 a 450 ml/min. Con el aumento de 6 a 14 A, se produjo la eficiencia del electrolizador del 72.9% y posteriormente disminuyó, mientras que con el aumento de 6 a 42 A, el caudal real incrementó de 137 a 654 ml/min. Después de un período de funcionamiento de 30 minutos, el caudal de HHO alcanzó los valores estables más altos de 866, 985, 1 040 y 1 090 ml/min a concentraciones de $NaOH$ de 5, 10, 15 y 20 g, respectivamente. Las temperaturas se incrementaron a 32, 38, 44 y 52 °C a concentraciones de $NaOH$ de 5, 10, 15 y 20 g, respectivamente, y se mantuvieron constantes. La concentración de 5 g de $NaOH$ en la configuración de celda (4C3A19N) y la corriente suministrada de 14 A condujeron a la mayor productividad de HHO de 866 ml/min y la eficiencia del electrolizador del 72.1%.

Rosero et al. [42] en su trabajo experimentaron con una celda húmeda y una

celda seca, donde utilizaron 1 l de agua con 0.3 M (masa molar) de $NaOH$ para la celda húmeda y 1 M para la celda seca. Cuantificaron el volumen de HHO producido, analizaron la composición del gas, probaron la explosividad de este, así como el deterioro en los electrodos; además se registraron las variaciones en la intensidad de corriente y la temperatura externa de las celdas. Al concluir el estudio, la celda seca produjo 1.24 l/min de HHO , se comprobó que la tasa de producción fue 2:1 H_2/O_2 . Resaltan que una limitación es el aumento de la temperatura que fue de máximo $62^\circ C$ durante todo el proceso. A su vez, Juárez et al. [43] investigaron el método más óptimo para producir HHO , experimentaron con diferentes concentraciones de KOH , la producción óptima fue determinada en función del amperaje, el voltaje, el tiempo y temperatura de operación. Al finalizar el estudio, se concluyó que la mayor cantidad de HHO producida en poco tiempo se obtiene con una alta concentración de KOH , misma que es proporcional al amperaje suministrado. Descubrieron que la concentración de mayor eficiencia son 15 g de KOH por 0.5 litros de agua. Además, destacan que las concentraciones de KOH de 17, 19 y 21 g generan más gas, pero consumen la carga de la batería de forma prematura.

Essuman et al. [44] estudiaron la generación de HHO en relación con la concentración y el hidróxido utilizado en el electrolito, la configuración de las placas en la celda, el voltaje suministrado, el efecto de la temperatura y la morfología de la superficie de las placas. Al finalizar el estudio se encontró que, con el aumento de la concentración, el voltaje y el tiempo de operación; incrementa el volumen de HHO producido. Concluyendo que cuando la celda funcionó a 13 V con 0.025 M de KOH , se obtuvo una producción de 2.27 ml/s, siendo esta la producción óptima en el trabajo realizado.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

A la luz de la literatura mostrada en la sección anterior, y con el objeto de aclarar las incógnitas surgidas a partir del uso del gas HHO en motores de encendido

provocado (MEP), se plantea esta investigación. Se pretende montar un sistema de producción y medición de HHO en un MEP para estudiar el comportamiento de las emisiones contaminantes, mediante la variación de la relación de compresión y modificación del tiempo de encendido de la bujía. Se busca relacionar los cambios en los niveles de PM , HC , NOx , CO y CO_2 con el uso de gasolina- HHO dentro de la cámara de combustión y el nivel de knock presentado. Para esto, se hará uso de un banco de pruebas que comprende un motor CFR con sistema de producción y medición de gas HHO , además se utilizará un analizador de gases con el cual se tendrán resultados precisos sobre las variaciones de CO , CO_2 , HC , PM y NOx .

1.4 HIPÓTESIS.

Acorde a lo expuesto con anterioridad, se expone la siguiente hipótesis de investigación:

Es posible incrementar la relación de compresión y disminuir las emisiones de PM , HC , NOx , CO y CO_2 al enriquecer la mezcla de combustible en los motores a gasolina con la adición de HHO mediante el uso de una celda de electrólisis acoplada a un motor CFR de relación de compresión variable.

1.5 OBJETIVOS.

1.5.1 OBJETIVO GENERAL.

Caracterizar experimentalmente la influencia del HHO en la mezcla de combustible en la disminución de las emisiones CO , HC , PM y NOx , a través de la implementación de una celda de electrólisis en un motor de relación variable tipo CFR.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Para lograr el cumplimiento del objetivo general, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar la producción de gas *HHO* producido por una celda de electrólisis para determinar la cantidad de gas *HHO* que ingresa en la cámara de combustión.
- Diseñar la matriz experimental a través del establecimiento de los parámetros: relación de compresión, flujo volumétrico de *HHO* y temperatura del aire de admisión.
- Adaptar el sistema de inyección del banco de pruebas para el acoplamiento de una celda de electrólisis, utilizando una base desmontable que contenga el sistema de producción de gas *HHO*.
- Determinar experimentalmente los niveles de emisión *CO*, *CO₂*, *HC*, *PM* y *NO_x* para cada mezcla de gasolina-*HHO*.
- Analizar los resultados obtenidos de *CO*, *CO₂*, *HC*, *PM* y *NO_x* para establecer la relación que tiene con el cambio de la relación de compresión.
- Determinar la intensidad de autoignición a través del análisis de la presión al interior del cilindro para establecer los límites de utilización de *HHO*.
- Proponer una discusión sobre los resultados analizados, comparando los comportamientos de la celda de electrólisis y los niveles de *CO*, *CO₂*, *HC*, *PM* y *NO_x* encontrados en la literatura.
- Concluir el trabajo de investigación resaltando los resultados procesados e indicando las fuentes de oportunidad para posibles trabajos futuros.

1.6 ALCANCE.

La presente investigación se enfoca en la inyección de HHO producido por una celda electrolítica dentro del puerto de admisión de un motor de relación variable tipo CFR. La finalidad es comparar y verificar los niveles de algunos componentes de emisiones y la intensidad de autoignición presentada durante la combustión frente a la literatura consultada.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Este capítulo aborda los conceptos más relevantes para la realización de la presente investigación. Primero se explica todo lo relacionado al proceso de combustión en los MEP, así como las características del motor tipo CFR, el cual es el utilizado en los experimentos. Seguidamente, se explica el fenómeno de autoignición y la formación de emisiones. Finalmente, se exponen los conceptos básicos acerca del HHO y su impacto en las emisiones.

2.1 LA COMBUSTIÓN EN LOS MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO.

En un **motor de combustión interna**, cuando un determinado combustible se quema u oxida, la energía existente en los enlaces químicos del mismo se convierte en energía térmica, posteriormente esta energía se convierte en trabajo mecánico por medio de la expansión y compresión del fluido de trabajo [45]. Como se aprecia en la Figura 2.1, existen diversas formas de clasificación para los motores térmicos.

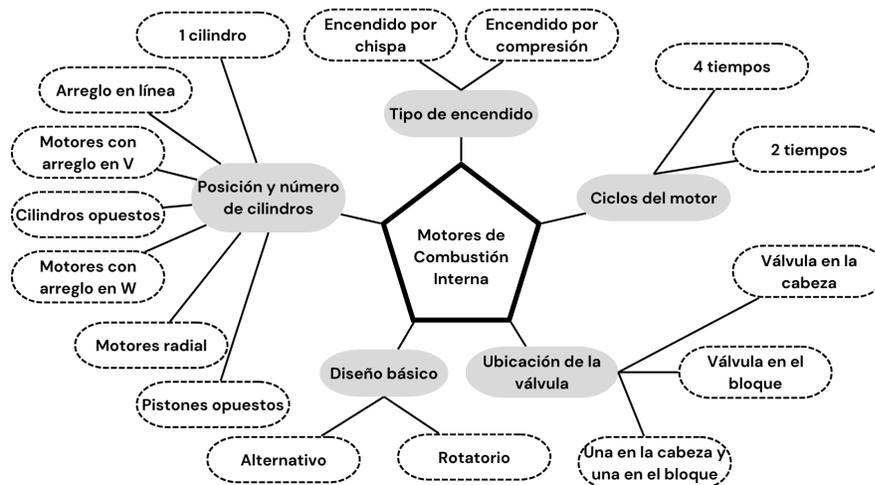


FIGURA 2.1: Clasificación de los Motores de Combustión Interna. Figura basada en la información de Heywood, 1998.

En el caso de los **motores de encendido por chispa**, también conocidos como motores de encendido provocado (MEP); la masa de combustible se mezcla con el aire del ambiente a través del sistema de admisión, seguidamente esta entra en el cilindro mediante la válvula de admisión donde la ignición es generada por los electrodos de la bujía dando inicio a la combustión. En una combustión normal, la descarga de la bujía se produce antes de que el pistón se posicione en el punto muerto superior (PMS) del cilindro. La combustión se puede dividir en 3 etapas después del encendido de la bujía: desarrollo de la llama, combustión rápida y etapa final [46].

Hoy en día, gran parte de los vehículos orientados al sector transporte utilizan motores de encendido provocado de 4 tiempos. Tal como se aprecia en la Figura 2.2, el ciclo se compone de las siguientes 4 fases [47]:

- **Admisión:** el pistón desciende, llenando de aire y combustible el cilindro.
- **Compresión:** la mezcla de aire-combustible (A/F) se comprime hasta que el pistón alcanza el PMS.
- **Expansión:** después de la descarga de la bujía, se produce una explosión que mueve el pistón hacia el punto muerto inferior (PMI).
- **Escape:** el gas producido por la combustión (**end gas**) es expulsado del cilindro.

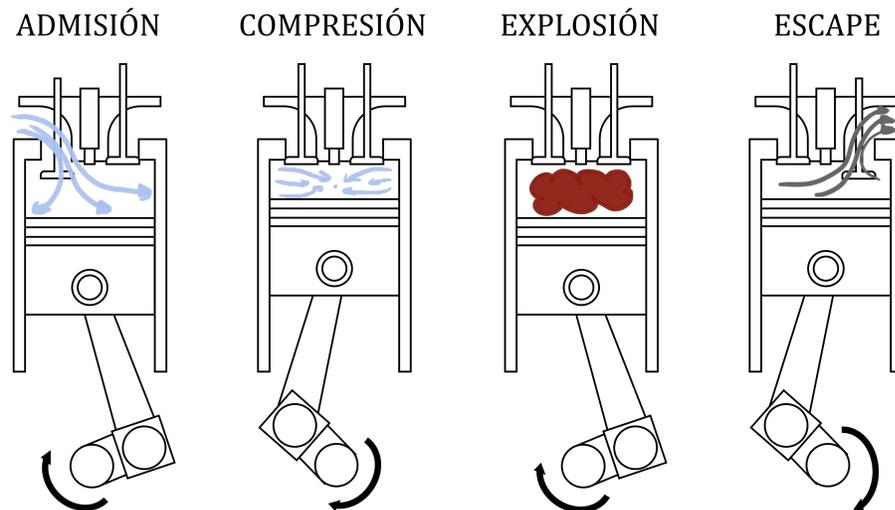


FIGURA 2.2: Representación del ciclo de 4 tiempos de un motor de encendido provocado.

2.1.1 RELACIÓN DE COMPRESIÓN EN LOS MOTORES.

La **relación de compresión** de un motor puede expresarse a través de la Ecuación (2.1) [48].

$$RC = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_D + V_c}{V_c} \quad (2.1)$$

Donde RC es la relación del volumen del cilindro cuando el pistón se encuentra en el PMI (V_{max}) entre el volumen del cilindro cuando el pistón se encuentra en el PMS (V_{min}); siendo expresado también como la suma del volumen de la carrera del pistón (V_D) y el volumen de la cámara de combustión (V_c) dividido entre el volumen de la cámara de combustión. Para un mejor entendimiento de la relación de compresión, se presenta la Figura 2.3.

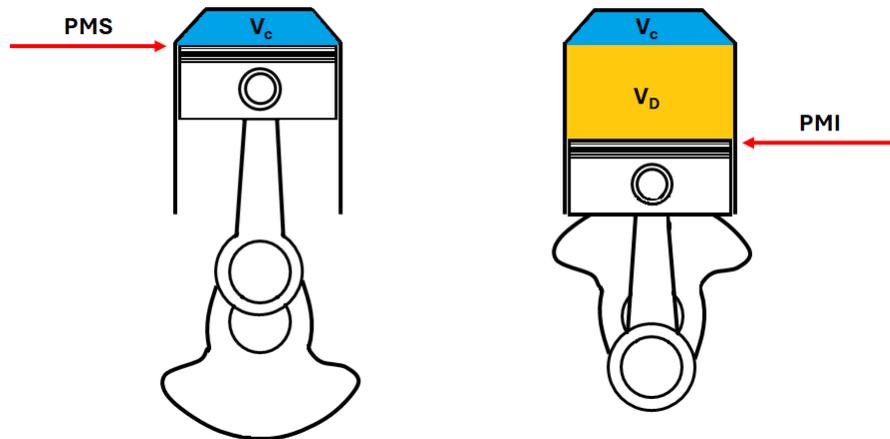


FIGURA 2.3: Relación de compresión de un motor.

El valor de la relación de compresión se ve influenciado por el tipo de combustión, por ello los motores MEP tienden a utilizar valores bajos con la finalidad de evitar la autoignición del combustible; mientras que en un motor de encendido por compresión (MEC) la relación de compresión debe ser lo suficientemente alta para el desarrollo de la autoignición. Por otra parte, la RC influye fuertemente sobre la

duración de la primera fase de la combustión (DPFC), donde esta última tiende a disminuir con el aumento de la RC [46, 49].

2.1.2 PRESIÓN DENTRO DEL CILINDRO.

Cuando la bujía produce la ignición, inmediatamente se produce una flama que se propaga por el cilindro. Al inicio de la propagación, no se aprecia una diferencia notable en la presión dentro del cilindro en comparación con la presión registrada cuando no hay combustión. Durante la propagación de la flama, la presión dentro del cilindro crece establemente, alcanzando un valor máximo justo después de que el pistón alcanza el PMS; en esta presión máxima la masa de combustible aún no se quema en su totalidad. Después del PMS, la presión en cámara decrece mientras el pistón regresa al PMI [46].

Tal como se aprecia en la Figura 2.4, la curva de presión no es constante entre ciclo y ciclo. Estas variaciones se deben a las características locales de la carga dentro del cilindro, las cuales influyen sobre el crecimiento de la llama, especialmente en la zona cercana a la bujía.

Para la caracterización del efecto knock, existe un método que utiliza un transductor de presión en el interior del cilindro. Estas mediciones se rigen por el alcance de las oscilaciones producidas sobre la señal de presión en el cilindro cuando ocurre la autoignición. Como las oscilaciones tienen una frecuencia elevada, es usual utilizar un filtro de paso-banda a la señal recibida por el transductor con la finalidad de aislar la frecuencia causada por la autoignición [50]. El filtro de la señal establece un rango de frecuencia de 4-20 kHz y la amplitud máxima se considera como la magnitud de la intensidad de autoignición [51, 52, 53, 54].

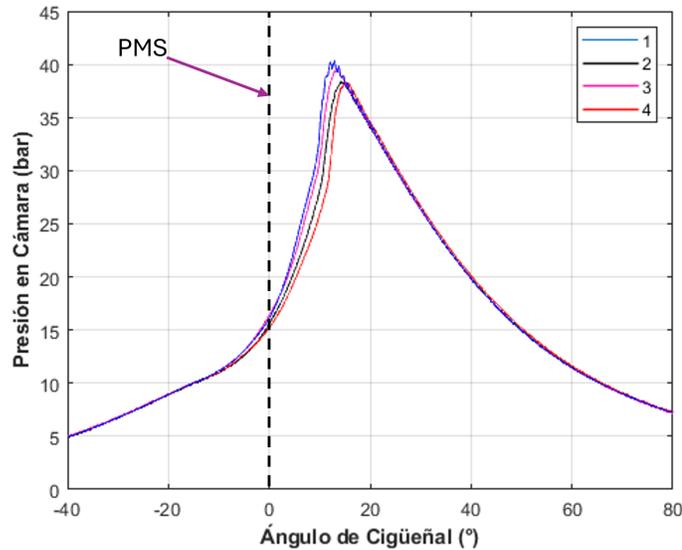


FIGURA 2.4: Curvas de presión en el cilindro de un MEP.

2.1.3 TIEMPO DE DESCARGA DE LA BUJÍA.

Como se mencionó en secciones anteriores, en los MEP la combustión inicia por la descarga de la bujía antes del PMS. Sin embargo, cuando la descarga se adelanta muy por delante del PMS, la presión en el cilindro aumenta durante la compresión al igual que el trabajo a realizar sobre los gases. En caso contrario, cuando la descarga se retrasa, el pico de presión se presenta durante la expansión, con un volumen mayor de la cámara y reduciendo su magnitud. Por lo tanto, los efectos anteriores se compensan cuando la descarga ocurre en el tiempo óptimo, logrando a su vez el máximo par de motor; cualquier variación en este tiempo significa la reducción del trabajo de los gases transferidos al pistón.

2.1.4 ETAPAS DE LA COMBUSTIÓN.

La *fracción másica de combustible quemado (FMCQ)*, se define como la porción de combustible inyectado en el cilindro que ha sido quemado. La FMCQ puede

expresarse mediante la *ley de Wiebe* descrita en la Ecuación (2.2) [55, 56].

$$x_b = 1 - \exp \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m+1} \right] \quad (2.2)$$

Donde x_b representa la FMCQ, θ es el tiempo expresado en grados de ángulo de cigüeñal, θ_0 es el ángulo en el que comienza la combustión, $\Delta\theta$ representa la duración en ángulos de cigüeñal del proceso de combustión. A su vez, a constituye la fracción máxima de energía dispuesta y m define la manera en que la energía se libera; estos parámetros son constantes que determinan la forma de las curvas del proceso de combustión.

La curva FMCQ muestra el índice de liberación de energía durante la combustión, por ello es común caracterizar las etapas de la combustión con base en las zonas de esta curva [48]. La Figura 2.5 muestra las etapas de la combustión.

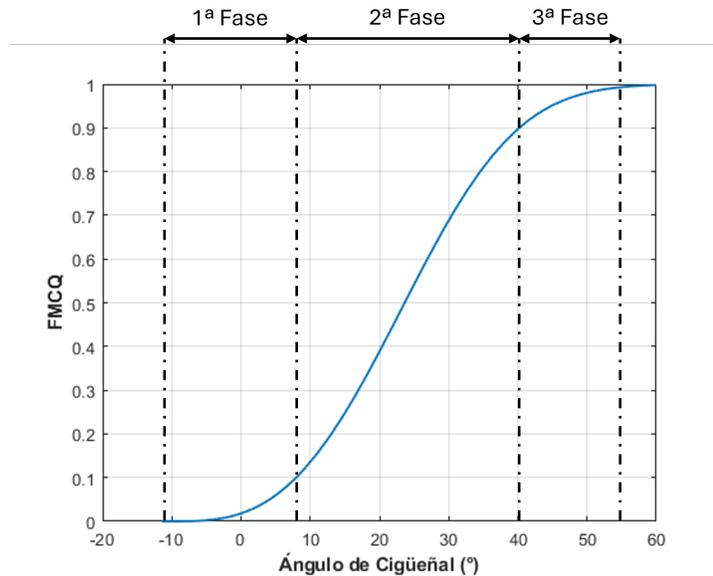


FIGURA 2.5: Ubicación de las tres fases de la combustión en la curva FMCQ con respecto al ángulo de cigüeñal.

Tal como se observa, el proceso de combustión se divide en las 3 fases descritas a continuación.

- **Primera etapa. Desarrollo de la flama.**

Consiste en el tiempo transcurrido desde el disparo de la bujía hasta que el valor FMCQ es medible. En esta fase influye el estado, el movimiento en las zonas cercanas a la bujía, y la composición de la mezcla, además del tipo de combustible.

La extensión de la primera etapa de la combustión influye en gran medida sobre la etapa siguiente y sobre el desarrollo de la presión en cámara. El cambio de presión entre la primera y segunda etapa se debe especialmente al cambio de volumen en el cilindro y a la combustión de la masa de combustible inyectada; existen elementos adicionales que también influyen en los cambios de presión, sin embargo intervienen en una menor medida. Como la influencia del volumen puede determinarse con facilidad, es posible conocer sobre la tasa de combustión de la masa de combustible a partir de los valores de presión registrados dentro de la cámara de combustión.

- **Segunda etapa. Combustión rápida.**

Consiste en el ángulo de cigüeñal requerido para aumentar el valor FMCQ del 10 % al 90 %. En esta etapa influyen las propiedades de la carga en cámara. La presión en la cámara crece de manera sensible a causa de una mayor superficie del frente de flama, mayor temperatura de la mezcla no quemada y el aumento de la velocidad de combustión.

- **Tercera etapa. Etapa final.**

Esta etapa inicia cuando el frente de flama se acerca a la pared del cilindro, quemando el resto de la carga de combustible y desarrollándose hasta que el proceso finaliza por completo.

2.2 MOTOR DE RELACIÓN DE COMPRESIÓN VARIABLE TIPO CFR.

En 1929, la compañía Waukesha Motor Company diseñó el motor de compresión variable Cooperative Fuel Research (CFR) con la finalidad de estandarizar las pruebas de resistencia a la autoignición de los combustibles de la época. Considerando que dicho fenómeno dependía en gran parte de la calidad del combustible, el resultado fue un motor de relación de compresión variable que operaba con un único cilindro a un ciclo de 4 tiempos; y adicionalmente tenía incorporado un medidor de *knock*, cuya finalidad era determinar objetivamente la intensidad de autoignición [57].

2.3 LA AUTOIGNICIÓN EN LOS MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO.

Se conoce como **autoignición** a la ignición espontánea de la masa de combustible dentro del cilindro sin la acción de una fuente externa. Esta combustión anormal se desarrolla cuando la mezcla del cilindro se comprime a una temperatura y presión convenientemente alta, produciendo una reacción de oxidación del combustible sin la chispa de la bujía; la energía química se libera rápidamente propagándose a través de la masa restante de combustible sin quemar, causando un aumento súbito de la presión en los puntos donde se produjo el fenómeno [46]. El aumento de la presión genera una onda expansiva, la cual golpea las paredes del cilindro haciéndolo vibrar y generando un sonido metálico típico de la autoignición conocido como *knock*. Este fenómeno es indeseable en la combustión, debido a que limita el rendimiento del motor y causa un daño irreversible si se presenta con frecuencia [58, 59].

Los factores promotores de la autoignición son los siguientes [59]:

- Ignición demasiado adelantada: conforme se produce la compresión de la mezcla, la temperatura y la presión dentro del cilindro aumentan.
- La densidad de la carga dentro del cilindro es alta: en general, la densidad de la carga se aumenta como consecuencia de una exigencia de carga del motor. Al aumentar la densidad, la temperatura también aumentará.
- Bajo octanaje del combustible: el número de octanaje en un combustible define su capacidad de resistencia a la autoignición. Los combustibles con un bajo octanaje tienden a presentar más autoignición.
- La RC del motor es alta: cuando la compresión de la mezcla es sometida a una presión mayor, la temperatura dentro del cilindro incrementa.
- Existe una mala refrigeración del motor: la culata del motor se sobrecalienta provocando que los gases de la cámara de combustión se calienten excesivamente.
- La geometría del motor: dado que la geometría del motor tiene impacto sobre la turbulencia de la mezcla dentro del cilindro, la aparición de la autoignición se ve afectada.

Existen diferentes métodos para la determinación de la intensidad de autoignición en forma cuantificable. Sin embargo, los métodos más aceptados son los propuestos por el *Cooperative Fuel Research Committee* (CFR) y la *American Society for Testing and Methods* (ASTM) para la determinación del número de octano de los combustibles, estos son descritos mediante las normas ASTM-D2699 [60] y la ASTM-D2700 [61].

2.4 EMISIONES CONTAMINANTES EN LOS MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO.

Todo proceso de combustión lleva consigo un problema de contaminación ambiental; en un inicio se denominó como *smog gris* a la neblina tóxica que se formó a partir de la humedad del ambiente y el humo procedente de las chimeneas de carbón. Posterior a este hecho, se incentivó a la eliminación del carbón como combustible. Sin embargo, el aumento del parque vehicular en las ciudades generó un medio contaminado con alto contenido de óxidos de nitrógeno (NOx) e hidrocarburos sin quemar (HC), generados por una combustión incompleta en los motores [48].

En los MEP, el control de las emisiones es un factor importante a considerar cuando se trabaja sobre su diseño. Las emisiones más importantes generadas en los procesos de combustión son los NOx , los HC , el material particulado (PM), el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO_2).

En las siguientes secciones se describen las características principales de las emisiones mencionadas con anterioridad.

2.4.1 MONÓXIDO DE CARBONO.

Las emisiones de CO se generan cuando el motor opera con una relación de equivalencia rica en combustible. Esto conlleva a que no haya el suficiente oxígeno en cámara para convertir todo el carbono del combustible en CO_2 , de tal forma que el carbono no quemado se transforma en CO .

La concentración máxima de CO es generada cuando el motor funciona con una mezcla rica, por ejemplo al arrancar o al acelerar bajo carga. Sin embargo, habrá una producción de CO también cuando se trabaja con una mezcla estequiométrica e incluso una mezcla pobre en el motor. Si un motor MEP se diseña correctamente y

trabaja en las condiciones ideales, puede tener una fracción molar de 10^{-3} de CO en el escape del motor. El CO es una emisión indeseable en la combustión, y representa energía química perdida debido a que no fue utilizada completamente en el motor, es decir, se presentó una combustión incompleta [45].

2.4.2 DIÓXIDO DE CARBONO.

Las emisiones de CO_2 se asocian con una combustión más completa, lo cual hace que sea una emisión preferible sobre otros gases de escape. De esta forma, si el combustible utilizado en un motor no sufre alguna alteración o modificación química, se esperaría que el CO_2 de escape fuera proporcional al consumo de combustible. A pesar de ser un indicador de una buena combustión, es uno de los gases más reconocidos por su impacto en el efecto invernadero, siendo las emisiones producto de los motores de combustión las que tienen una cifra significativa, por lo cual se pretende reducir.

El nivel de CO_2 en los gases de un motor depende de la temperatura, el dosado, la concentración del oxidante en el cilindro, y del combustible usado. La influencia del combustible se presenta por medio de su composición, los combustibles con una concentración baja de carbono; como por ejemplo: los alcoholes, biocombustibles, el hidrógeno; tienden a una menor generación de CO_2 [48].

2.4.3 HIDROCARBUROS SIN QUEMAR.

Cuando los gases de escape salen del motor, alrededor del 1-1.5 % del combustible equivale a hidrocarburos. El 40 % de esta porción corresponde a los componentes de la gasolina que no fueron quemados, mientras que el resto corresponde a los componentes parcialmente quemados. Estos últimos son moléculas en desequilibrio formadas cuando las moléculas grandes de combustible se rompen durante la com-

bustión.

La presencia de los HC es ocasionada por la falta de oxígeno en cámara y es diferente para cada mezcla de gasolina, dependiendo principalmente de sus componentes originales. Otros elementos que impactan en la formación de HC son las condiciones de operación del motor, así como la geometría de la cámara de combustión [45].

Los mecanismos que dan origen a la formación de HC son los siguientes [62]:

- Porciones de aire-vapor de gasolina comprimida en las grietas del cilindro.
- Compuestos de gasolina absorbidos en películas de aceite en el revestimiento del cilindro.
- Porciones de gasolina contenida dentro de depósitos en la cabeza del cilindro y en la corona del pistón.
- Capas de extinción que quedan seguidamente a la extinción de la flama en la pared del cilindro.
- Porciones de aire-vapor de gasolina remanente cuando la flama se apaga antes de llegar a la pared del cilindro.
- Gasolina líquida en el cilindro que no reacciona con suficiente oxígeno durante la combustión.
- Fuga de mezcla sin quemar mediante la válvula de escape.

2.4.4 MATERIAL PARTICULADO.

El PM es una emisión que puede encontrarse en forma de pequeñas gotas o en estado sólido como pequeñas partículas de carbono de tamaño de 10 a 80 nm , las

cuales no se oxidaron durante la combustión. Por lo tanto, se generan principalmente en zonas ricas en combustible.

Generalmente el escape de los motores contiene partículas de hollín, de forma que se considera como humo de escape, siendo una contaminación olorosa indeseable. En la combustión, la mayor concentración de PM se presenta cuando el motor está bajo carga; en esta situación se inyecta la máxima masa de combustible para otorgar la mayor potencia.

Alrededor del 25 % del hollín se genera a partir del aceite lubricante, el cual se vaporiza y posteriormente reacciona en la combustión. Es posible reducir esta producción mediante el diseño y el control del motor. Por ejemplo, extendiendo el tiempo de combustión mediante el diseño de la cámara de combustión y el control de sincronización de la chispa de la bujía, las partículas que se generan originalmente tendrán más tiempo para reaccionar con el oxígeno y convertirse en CO_2 . Por otra parte, una combustión prolongada implica mayor temperatura en el cilindro y por lo tanto una generación mayor de NOx . Ante esto, es necesario llegar a un balance aceptable entre emisiones [45].

2.4.5 ÓXIDOS DE NITRÓGENO.

Se denota como NOx a los compuestos formados mediante la oxidación total o parcial del nitrógeno molecular (N_2). Los derivados más comunes son el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2), el óxido nitroso (N_2O), el trióxido de dinitrógeno (N_2O_3); donde el NO y el NO_2 son los que más destacan. En las temperaturas comunes después de la combustión, la concentración de los NOx se expresa mediante la siguiente relación: $NO > NO_2 > N_2O > NO_3 > N_2O_3$. En los motores de combustión es común encontrar NO , aunque existen casos en los que la formación de NO_2 es considerable a causa de la oxidación de NO a NO_2 en condiciones de bajas temperaturas e importante concentración de O_2 .

La formación química de NOx puede producirse a través de la combustión mediante 3 mecanismos diferentes: NOx térmico, NOx súbito y NOx debido al N_2O intermedio. Donde la formación de NOx térmico es considerado como el principal productor de NOx , generándose cuando la temperatura supera los $1\ 200\ ^\circ C$. Este mecanismo se presenta cuando el O_2 y el N_2 del aire atmosférico reaccionan dentro del cilindro generando NO , y seguidamente una porción de este compuesto se oxida formando NO_2 [48]. Un elemento importante en la formación del NOx térmico, es la temperatura de llama adiabática del combustible que reacciona en la cámara de combustión. Una mayor temperatura de llama adiabática causaría un aumento en la tasa de formación de NOx térmico. Los estudios muestran que el H_2 presenta una temperatura adiabática de llama de $3473\ K$ cuando el oxidante es oxígeno puro y $2483\ K$ cuando el oxidante es aire [63, 64].

2.5 LA PRODUCCIÓN DE HHO Y SU IMPACTO EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN.

La producción bajo demanda del HHO se considera factible debido a su menor costo de capital, simplicidad, bajo mantenimiento y alto poder calorífico. Diferentes investigaciones han mostrado sus prometedores resultados como combustible al aumentar la eficiencia de la combustión y la reducción de los gases contaminantes. Tal como lo expresa Butt et al. [65], el HHO tiene el potencial de reemplazar el combustible fósil para aplicaciones de combustión, ya que tiene un alto poder calorífico. Además, debido a la presencia del oxígeno en el HHO , se logra una combustión cercana a la estequiométrica. Sin embargo, la generación de este gas a raíz de fuentes no renovables tiene graves consecuencias ambientales [66].

Si bien existen diversos procesos para producir hidrógeno, tanto a partir de recursos fósiles como renovables; algunos procesos son especiales para ser usados en los laboratorios, otros para uso comercial y otros para generar hidrógeno con fines

bélicos. De forma general, los métodos de producción de hidrógeno pueden dividirse en dos clases principales: métodos químicos y métodos físicos, adicionalmente existe una clase intermedia donde la producción se divide en 2 etapas, una química y otra física. Cabe mencionar que en la selección del método de generación adecuado depende de las condiciones locales y los requisitos particulares de uso.

Cuando se requiere hidrógeno para uso comercial, el proceso de generación más apropiado es el de la **electrólisis**. Este proceso ocurre cuando una carga eléctrica atraviesa un conductor sólido generando un campo magnético alrededor de este mismo, aumentando su temperatura; cabe destacar que ambos efectos se ven influenciados por la proporción de la corriente suministrada.

Algunos líquidos pueden actuar como conductores; sin embargo, además de la generación del campo magnético y el aumento de temperatura, se presenta un efecto adicional: la descomposición del líquido. En este último efecto, una fracción de la sustancia se divide en dos partes, cada una puede ser un grupo o elemento químico.

Como se ilustra en la Figura 2.6, se tienen dos placas metálicas dentro de un recipiente, una se encuentra unida al polo negativo de la fuente y la otra al positivo; entonces, si se coloca una solución acuosa en el recipiente, se producirá una descomposición del líquido. Las sustancias que se comportan de la manera anterior influidas por una carga eléctrica, se denominan como **electrolitos**.

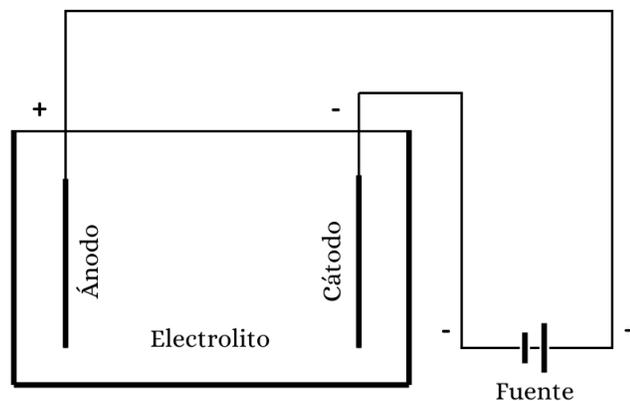


FIGURA 2.6: Celda de electrólisis.

Las leyes que describen esta descomposición del electrolito debido a la corriente eléctrica, son conocidas como las *leyes de Faraday*, y dicen lo siguiente:

- La cantidad de electrolito descompuesto es proporcional a la cantidad de electricidad suministrada.
- La masa de una sustancia liberada por una cantidad de electricidad es proporcional al peso químico de la sustancia.

Entonces, si se conoce el peso de cualquier sustancia liberada por una corriente en un tiempo definidos, se puede calcular el peso teórico de cualquier sustancia liberada.

2.5.1 SISTEMAS DE INYECCIÓN.

Considerando la introducción del *HHO* en el cilindro, los sistemas de inyección pueden clasificarse principalmente en [67]:

- Método de inducción del carburador.
- Inyección de combustible en el puerto de admisión.
- Inyección directa.

En las secciones siguientes se dará una breve descripción de cada uno de los sistemas anteriormente mencionados.

2.5.1.1 MÉTODO DE INDUCCIÓN DEL CARBURADOR.

Por sus siglas en inglés CMI, se considera una técnica antigua y sencilla para introducir el *HHO* al sistema, donde se emplea principalmente la inducción del

carburador. No hace uso de un inyector para suministrar el *HHO*, entonces el combustible líquido se descarga a través del tubo de descarga que se dirige hacia el carburador, donde se atomiza en el aire entrante. Como lo muestra la Figura 2.7, el *HHO* es introducido antes de la válvula del acelerador, mezclándose junto con el aire y el combustible antes de ingresar al colector de admisión [68].

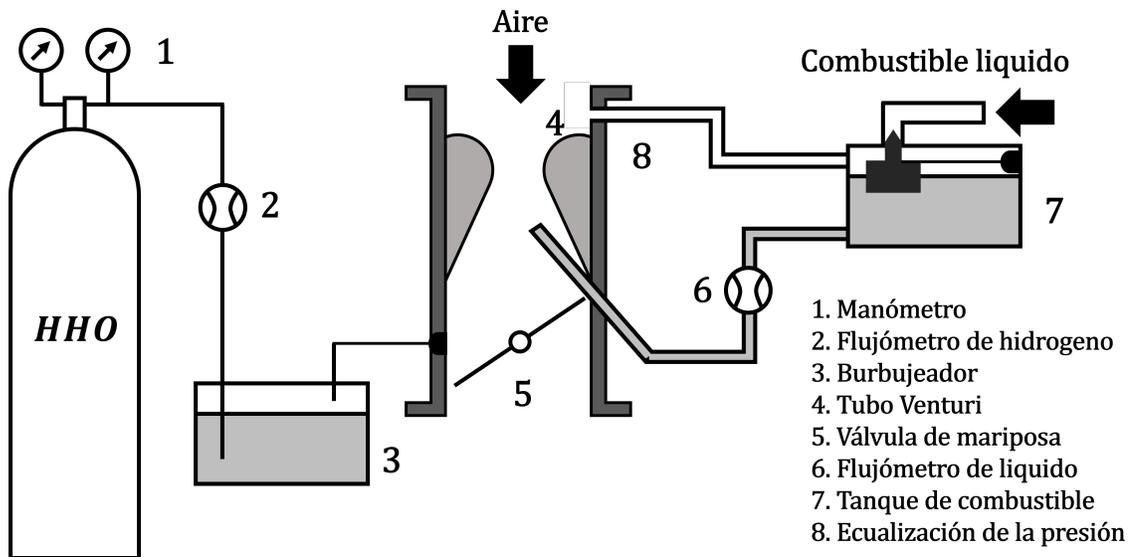


FIGURA 2.7: Método de inducción del carburador.

2.5.1.2 INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE EN EL PUERTO DE ADMISIÓN.

En un sistema PFI (por sus siglas en inglés *Port Fuel Injection*), la boquilla rocía una cantidad necesaria de combustible hacia el colector de admisión, el cual es arrastrado por el aire entrante al cilindro del motor. Típicamente, el combustible se introduce de dos formas: inyección monopunto y multipunto. En el primero, el combustible es inyectado en un punto común en el colector de admisión que sirve a todos los cilindros; en cambio, en la inyección multipunto se introduce una cantidad uniforme de combustible cerca de la válvula de admisión para cada cilindro.

En el PFI, el *HHO* se inyecta en el colector de admisión dirigido hacia la válvula de entrada, mientras que el combustible líquido se introduce en el mismo

colector o mediante inyección directa a la cámara. En la Figura 2.8 se ilustra esta técnica de inyección [69].

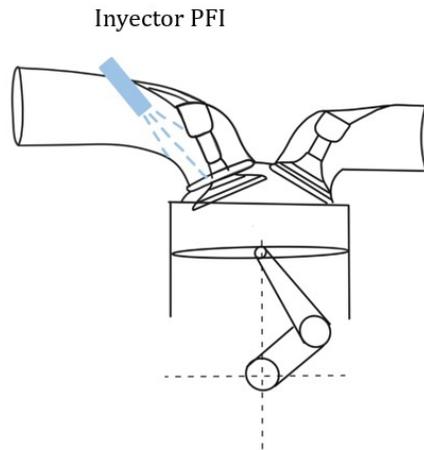


FIGURA 2.8: Inyección del combustible en el puerto de admisión.

2.5.1.3 INYECCIÓN DIRECTA.

En el sistema DI (por sus siglas en inglés *Direct Injection*), el combustible se introduce directamente en la cámara con un inyector a alta presión, así como se muestra en la Figura 2.9.

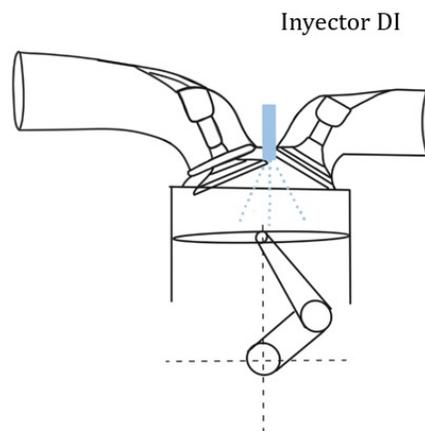


FIGURA 2.9: Inyección directa.

Normalmente, estos sistemas son empleados en función de dos modos de combustión: combustión pobre estratificada y combustión estequiométrica homogénea [70]. En una combustión estequiométrica el combustible se introduce antes de la descarga de la bujía para formar una mezcla homogénea, donde la inyección normalmente ocurre durante la carrera de admisión. Por otra parte, el combustible es inyectado en dos regiones en la combustión pobre estratificada: una mezcla rica cerca de la bujía y una mezcla pobre en otras regiones [69].

En los sistemas DI, el *HHO* se introduce en la cámara de combustión y el combustible líquido a través del el colector de admisión o directamente en la cámara con un inyector secundario.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología seguida para el cumplimiento de los objetivos planteados en secciones anteriores. Inicia con la caracterización de los combustibles que se pretenden estudiar. Seguidamente, se presenta el equipo experimental y las herramientas utilizadas; continuando con la definición de la matriz experimental. Y finalmente, se detalla el procedimiento para el análisis de la intensidad del knock y el análisis de las emisiones contaminantes.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES.

Para la realización de la fase experimental en la presente investigación se empleó gasolina sin plomo tipo Magna, proporcionada por Petróleos Mexicanos (PEMEX), y gas oxihidrógeno (HHO) producido por una celda electrolítica de la marca Hydrocell. La Tabla 3.1 contiene las propiedades de los combustibles puros utilizados en la investigación.

TABLA 3.1: Propiedades de los combustibles puros utilizados en la investigación.

	Gasolina	Hidrógeno
Fórmula Química	$C_nH_{2n+2}^*$	H_2
Poder Calorífico (Min-Máx) [MJ/kg]	44 - 46	120 - 142
Poder Calorífico (Min-Máx) [MJ/m^3]	32 - 34.2	10.8 - 12.7
Temperatura de Autoignición [$^{\circ}C$]	250	560
Peso Molecular [g/mol]	94.135	2.0
Número de Octano	87	RON = 93.7 ($\lambda = 1$)
Relación A/F	14.7	34.1
Densidad@20 $^{\circ}C$ [g/cm^3]	0.7231	0.0838

*Nota: n puede variar entre 4-12.

La temperatura de autoignición y número de octano de la gasolina se obtuvieron de la ficha de seguridad del producto, proporcionada por PEMEX [71]; de igual manera el número de octano del hidrógeno se obtuvo de los resultados reportados por Poursadegh et al. [72]. Las propiedades de densidad@20 $^{\circ}C$ y relación A/F para la gasolina se obtuvieron de los reportes de datos del trabajo de Rubio Gómez [49]. De igual manera, el resto de las propiedades se consultaron en los trabajos publicados de Wade y el Colegio del Desierto [73, 74]. La densidad a 20 $^{\circ}C$ de la gasolina se calcula mediante la Ecuación (3.1).

$$\rho_{20^{\circ}C} = G_{esp20^{\circ}C} \times \rho_{agua20^{\circ}C} \quad (3.1)$$

Donde $\rho_{20^{\circ}C}$ es la densidad de la gasolina a $20^{\circ}C$ en g/cm^3 , $G_{esp20^{\circ}C}$ es la gravedad específica obtenida experimentalmente a través de un densímetro modelo 3510LC070 de la marca Allafrance (cumpliendo con la metodología señalada por la norma ASTM-D4052) y $\rho_{agua20^{\circ}C}$ es la densidad del agua a $20^{\circ}C$.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.

Para llevar a cabo el presente trabajo de investigación, se empleó la instalación experimental mostrada en las Figuras 3.1 y 3.2. Los equipos y herramientas experimentales serán descritos en las siguientes secciones.



FIGURA 3.1: Fotografía de la instalación experimental.

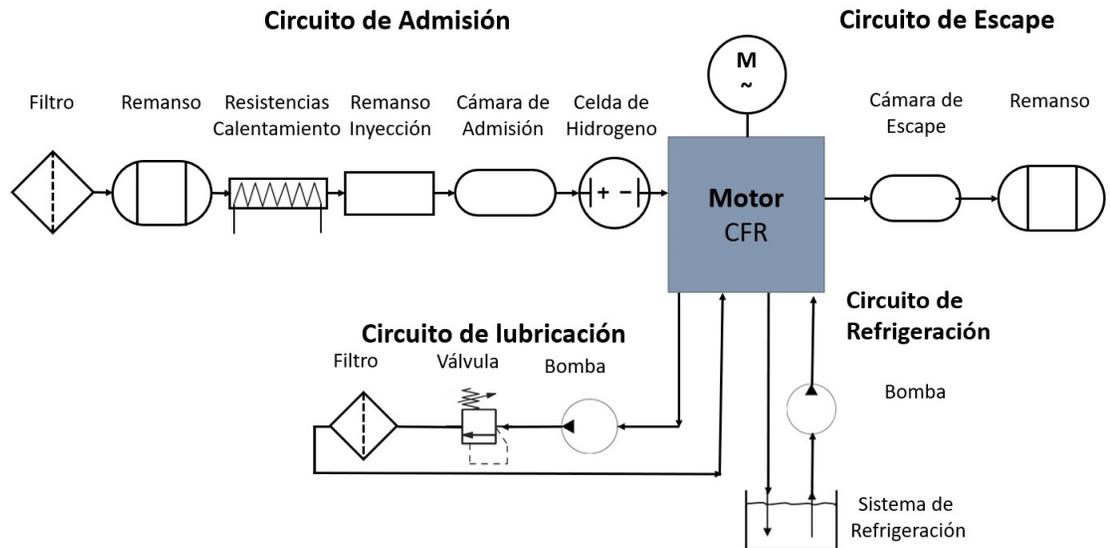


FIGURA 3.2: Diagrama general de la instalación experimental.

3.2.1 MOTOR DE COMPRESIÓN VARIABLE CFR F1/F2.

Tal como se observó en el diagrama general de la instalación, el banco de pruebas experimental está compuesto principalmente por un motor monocilíndrico tipo CFR de encendido provocado y relación de compresión variable. Dicho motor opera a través de diferentes sistemas auxiliares requeridos para el funcionamiento, control y monitorización de las variables de estudio, tomando en cuenta lo estipulado en las normas ASTM-D2699 y ASTM-D2700 [60, 61].

Los procesos de puesta a punto y automatización de la instalación experimental se encuentran con mayor detalle en los trabajos de tesis de Rubio Gómez [49] y Gómez-Gordo Villa [75]; adicionalmente, la Tabla 3.2 detalla las especificaciones técnicas del motor CFR F1/F2.

Como parte del sistema, se cuenta con un motor eléctrico, el cual permite que el motor CFR opere a una velocidad constante de 900 *RPM*, independientemente de la presencia del proceso de combustión en cámara, según lo indicado por las normas ASTM [61]. El objetivo del motor eléctrico es arrastrar el motor térmico y

amortiguar la potencia generada; además, se tiene instalado un sistema de seguridad que detiene el motor si la presión del aceite es inferior a 25 *PSI*.

TABLA 3.2: Especificaciones del motor CFR.

Cilindro	
Relación de compresión	4.46:1 - 16.0:1
Diámetro interno [<i>cm</i>]	8.236
Altura [<i>cm</i>]	20.741
Desplazamiento del cabezal [<i>cm</i>]	2.540
Volumen desplazado [<i>cm</i> ³]	611.729
Pistón	
Altura [<i>cm</i>]	12.021
Diámetro [<i>cm</i>]	8.225
Carrera efectiva [<i>cm</i>]	11.430

3.2.1.1 SISTEMAS QUE COMPONEN LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL MOTOR CFR.

La instalación experimental consta de una variedad de sistemas que permiten mantener el control sobre el proceso de combustión y el correcto funcionamiento del motor CFR, los cuales se describirán brevemente.

Sistema de Relación de Compresión.

Se compone principalmente de un motor eléctrico a pasos con sensores ubicados al inicio y fin de la carrera del pistón. De esta manera, es posible controlar y variar la relación de compresión del motor CFR.

Sistema de Ignición.

Para realizar la descarga en el momento adecuado es importante energizar y sincronizar la bujía de forma adecuada. Los componentes primordiales del sistema son la bujía y la bobina de energización.

Sistema de Inyección.

La finalidad de este sistema es suministrar la cantidad de combustible requerido en el colector de admisión. El sistema consiste principalmente de la línea de alimentación de combustible y el inyector.

Sistema de Control de la Temperatura.

Consiste en un conjunto de 7 termopares y una resistencia de 2 *kW* distribuidos en la instalación. Este sistema permite el control de la temperatura de admisión del aire, la cual es monitorizada a través de una interfaz gráfica en el equipo de cómputo de la instalación.

Sistema de Refrigeración.

Con este sistema se asegura que la temperatura de la culata del motor se mantenga a 70 °C a través de un baño térmico, esta temperatura se establece antes de iniciar los ensayos y permanece constante cuando el motor hace combustión.

Sistema de Adquisición de Datos.

La adquisición de datos se realiza y monitorea en tiempo real. Los equipos que conforman el sistema son el sensor de presión en cámara, el cual capta la señal de alta frecuencia producida por la aparición del knock, el sensor encoder, osciloscopio Yokogawa, un Compact Rio modelo cRio-9038 y la computadora con la interfaz de control del sistema.

3.2.2 SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE HHO.

Además de los sistemas descritos en la sección anterior, se diseñó e instaló un sistema para la producción, control y suministro de gas *HHO*. Este sistema fue situado sobre la estructura que soporta el depósito de combustible. La finalidad de esto es introducir el *HHO* en el conducto de admisión justo antes del inyector de gasolina del motor CFR.

En la Figura 3.3 se presenta el diagrama de conexión de la celda en la instalación experimental. Asimismo, la Figura 3.4 muestra los elementos que componen el sistema de producción de *HHO*, los cuales se describen a continuación:

- Celda de electrólisis conformada por 10 placas, de las cuales 2 actúan como cátodos, 1 como ánodo y 7 como placas neutras.
- Tanque de electrolito con capacidad de 1 litro. El electrolito empleado es hidróxido de potasio (*KOH*) disuelto en agua destilada.
- Sensor de flujo másico Alicat modelo M-500SCCM-D/5M.
- Filtro de humedad de gas *HHO*.
- Sistema de tuberías para suministro de electrolito a la celda y gas *HHO* al motor.
- Válvula antirretorno funcionando también como arrestallamas.
- Sistema de conexión eléctrico para energizar la celda acoplada al motor.
- Fuente de voltaje variable de 12 V.
- Voltímetro y amperímetro para el monitoreo de energía consumida por la celda.

Dado que el control del motor CFR puede realizarse a través de la interfaz de la computadora, fue necesario establecer un control para la producción de *HHO*.

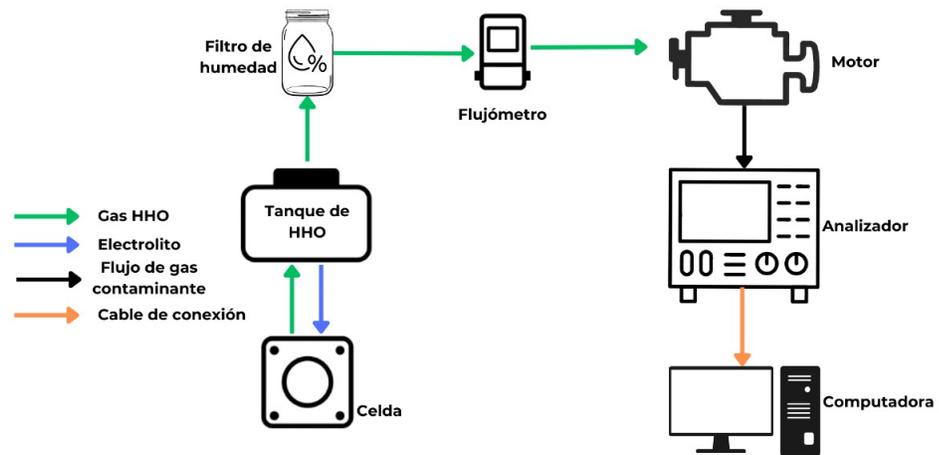


FIGURA 3.3: Diagrama de conexión de la celda acoplada a un motor.

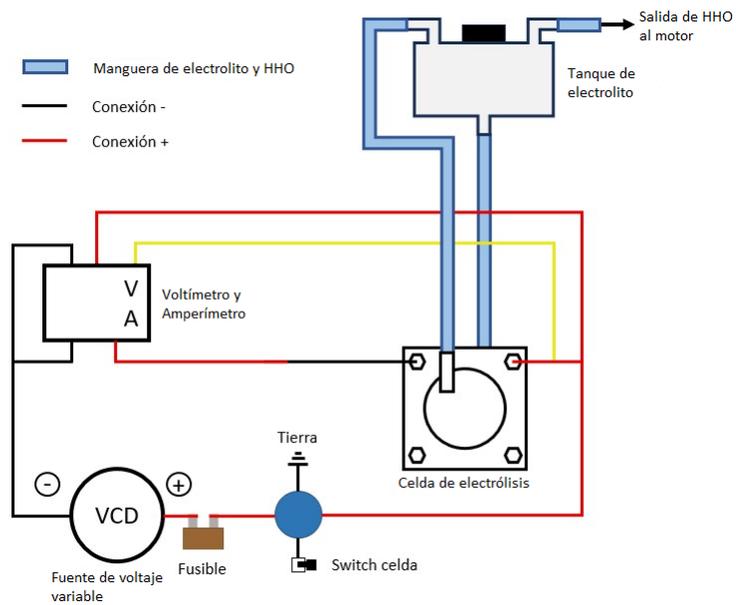


FIGURA 3.4: Diagrama del sistema de producción de *HHO*.

Por lo cual, se procedió a evaluar el funcionamiento de la celda electrolítica con el objetivo de obtener una caracterización de la misma. Dicha caracterización se realizó tanto teórica como experimentalmente y será descrita en las secciones siguientes.

3.2.3 SENSOR DE FLUJO MÁSIKO ALICAT M-500SCCM-S/5M.

Para el monitoreo de la producción de HHO se utilizó un medidor de flujo másico versátil de la marca Alicat modelo M-500SCCM-S/5M (Figura 3.5), el cual es independiente de otros sistemas de la instalación experimental y puede ser integrado con facilidad como una herramienta multipropósito. Cuenta con una pantalla digital que muestra las salidas multivariantes de: flujo másico, flujo volumétrico, presión absoluta y temperatura. Las características técnicas del flujómetro se encuentran en la Tabla 3.3.



FIGURA 3.5: Equipo medidor de flujo másico Alicat M-500SCCM-S/5M.

Es importante señalar que el flujómetro dispone de una selección de 98 calibraciones de gases precargados; sin embargo, para el caso del *HHO* fue necesario solicitar un servicio de calibración directamente con el proveedor para obtener una medición precisa del flujo de *HHO* producido por la celda electrolítica.

TABLA 3.3: Características técnicas del sensor Alicat M-500SCCM-S/5M.

Parámetro a medir	Rango	Precisión
Rango de medición de flujo [<i>SCCM</i>]	0.05 - 500	±0.6 %
Repetibilidad de la medición de flujo [%]	±0.1	
Rango de presión [<i>PSIA</i>]	11.5 - 160	±0.5 %
Rango de temperatura [°C]	-10 - 60	±0.75°C
Tiempo de calentamiento [<i>s</i>]	1	
Tiempo de respuesta de flujo indicado [<i>ms</i>]	10	
Caída de presión [<i>PSID</i>]	1	

3.2.4 ANALIZADOR DE LOS GASES DE ESCAPE MAHA MET 6.3.

El análisis de los gases de escape permite cuantificar las emisiones generadas por el motor; en esta investigación se utilizó el *Analizador MAHA MET 6.3* (Figura 3.6), el cual permite determinar emisiones de *HC*, *CO*, *CO₂*, *O₂*, valor Lambda (λ), *NO_x* y Concentración de Partículas (*PM*). Las especificaciones técnicas del analizador se presentan en la Tabla 3.4.

El analizador MAHA MET 6.3 está equipado con un sensor de detección electroquímica de *O₂*, medición de extinción para opacidad y *PM*, y finalmente espectrometría infrarroja para *HC*, *CO* y *CO₂*; además puede usarse tanto en motores MEP como MEC sin la exigencia de intercambiar la sonda de muestreo.

TABLA 3.4: Especificaciones técnicas del analizador de gases MAHA MET 6.3.

Parámetro a medir	Rango	Precisión
<i>HC</i> (hexano)	0 - 2 000 <i>ppm</i>	4 <i>ppm</i> abs.
<i>HC</i> (propano)	0 - 4 000 <i>ppm</i>	8 <i>ppm</i> abs.
<i>NO_x</i>	0 - 2 000 <i>ppm</i>	3 <i>ppm</i> abs.
<i>CO</i>	0 - 10 % vol	0.02 % abs.
<i>CO₂</i>	0 - 15 % vol	0.3 % abs.
<i>O₂</i>	0 - 25 % vol	0.02 % abs.
<i>PM</i>	1 - 1 100 <i>mg/m³</i>	1 <i>mg/m³</i>
λ	0 - 9.99	



FIGURA 3.6: Equipo analizador de gases de escape MAHA MET 6.3.

Dado que la investigación se realiza con bajas cargas de combustible y con un régimen de giro constante, se decidió utilizar un dosado estequiométrico. Para ello fue necesario modificar el parámetro λ a través del sistema de inyección que, al registrar la masa de aire que entra al cilindro; ajusta el tiempo de apretura del inyector a través de la interfaz de cómputo, regulando la relación A/F. Esta relación es monitoreada en tiempo real con el respaldo del MAHA MET 6.3 mediante el valor de λ en los gases de escape.

3.2.5 ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA SEÑAL DE PRESIÓN EN CÁMARA.

Tal como se describió en la Sección 2.3, la presencia del fenómeno knock en los motores MEP puede detectarse y medirse a través de la señal de presión en cámara durante la combustión. Esto se debe a que el knock provoca fluctuaciones de alta frecuencia superpuestas sobre la curva de presión típica de la combustión. La adquisición de señal de presión en cámara se realizó utilizando un osciloscopio ScopeCorder Yokogawa DL850E (Figura 3.7) con frecuencia de muestreo de 1 MHz [49].

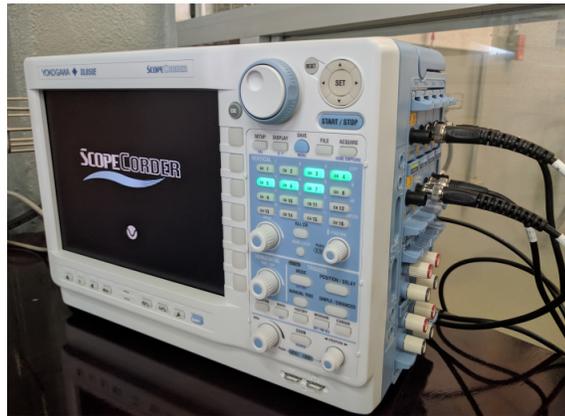


FIGURA 3.7: Equipo osciloscopio ScopeCorder Yokogawa DL850E.

Posterior a la lectura y adquisición de los datos de la presión en el cilindro; la señal de presión es tratada con un filtro paso-banda, el cual tiene configurados 4 kHz y 20 kHz como frecuencias de corte inferior y superior, respectivamente; eliminando las componentes de señal que estén fuera de dicho rango.

El filtro utilizado se diseñó a través de Filter Designer de Matlab, siendo un filtro de tipo Butterworth caracterizado por minimizar los efectos sobre las componentes de la señal que están dentro del rango establecido. En la Figura 3.8, se observa la gráfica de señal de presión en cámara y knock para un ciclo de combustión.

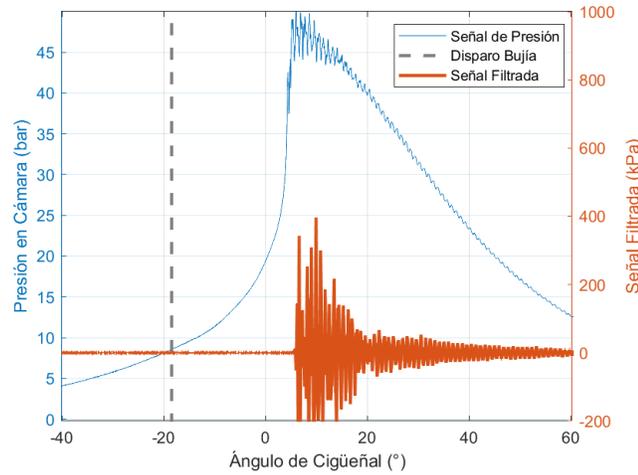


FIGURA 3.8: Señal de presión en cámara para un ciclo de combustión con autoignición.

Una vez hecha la filtración de la señal de presión, se debe caracterizar el knock. La intensidad de autoignición se define como el valor máximo de la señal resultante, este valor es la amplitud máxima de las fluctuaciones provocadas por la autoignición. Para realizar la caracterización, el análisis de la señal de presión en el cilindro se hace para 306 ciclos de combustión, de los cuales se obtiene el promedio de la intensidad de autoignición. Si la señal de presión supera los 50 kPa en el ciclo de combustión, entonces se considera que el ciclo presentó knock y por lo tanto, se puede obtener el porcentaje de los ciclos de combustión en los que se registró dicho fenómeno. Los detalles sobre el procesamiento de las señales de presión se detalla en el trabajo de Rubio Gómez [49].

3.3 MATRIZ EXPERIMENTAL.

Para la definición de la matriz experimental se tomaron en cuenta los parámetros de operación del motor, el tipo de medición del analizador y las condiciones de operación de la celda electrolítica. En esta sección se describirán los elementos antes mencionados.

3.3.1 PARÁMETROS DEL MOTOR CFR.

Tal como se ha mencionado con anterioridad, el motor CFR fue creado con la finalidad de estandarizar los métodos de evaluación de autoignición de los combustibles. Por esta razón, las condiciones de operación del motor se rigen por la norma ASTM-D2700 [49, 61], en la cual se establecen las temperaturas del aire de admisión (T_{adm}) y el ángulo de ignición (CA) correspondiente a la relación de compresión (RC) configurada a través de la interfaz de control. En la Tabla 3.5 se aprecian las condiciones de operación del motor.

TABLA 3.5: Condiciones de operación del motor CFR.

T_{adm} [$^{\circ}C$]	RC	CA [$^{\circ}$]
38	<5	26
68	5.19	25
	5.41	24
	5.64	23
	5.91	22
	6.2	21
	6.54	20
	6.91	19
	7.36	18
	7.86	17
	8.45	16
9.15	15	
>10	14	

3.3.2 GAS HHO. CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA.

La celda electrolítica utilizada es de la marca Hidrocell para motores de 4 cilindros (Figura 3.9). De acuerdo con lo especificado por el fabricante, la celda funciona correctamente cuando se utiliza una concentración de electrolito de 6 g de KOH por litro, siendo energizada por la batería del automóvil y manteniendo un periodo de operación de 6 a 8 horas continuas.

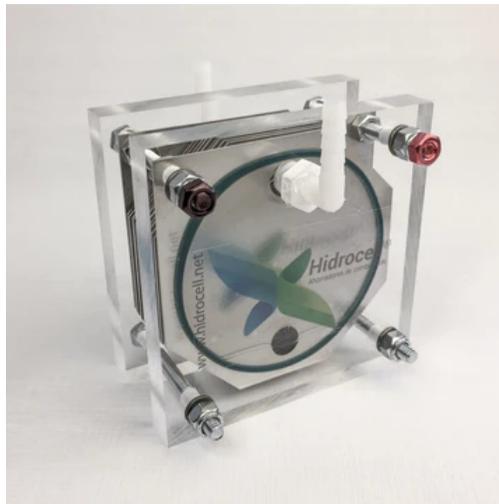


FIGURA 3.9: Celda electrolítica Hidrocell para 4 cilindros.

Sin embargo, no se especifica la tasa de producción ni la temperatura de salida del gas producido. Por ello, se realizaron pruebas experimentales para la caracterización de la celda utilizada. La metodología seguida para dichas pruebas se describe a continuación.

3.3.2.1 DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE HHO TEÓRICA.

En primer lugar, se utilizó la Ecuación (3.2), la cual representa la ecuación de la electrólisis de Faraday para calcular el caudal teórico de producción de HHO .

$$m = \frac{I \times t \times M}{F \times v_n} \quad (3.2)$$

Donde m representa la cantidad de masa del elemento en gramos, F es la constante de Faraday que corresponde a 96 485.4 coulomb por mol, I es la cantidad de corriente eléctrica usada para la electrólisis medida en amperes, t corresponde al tiempo transcurrido en segundos, M hace referencia a la masa atómica del elemento en unidades de gramos por mol y finalmente, v_n es el número de valencia del elemento [20]. Para determinar la intensidad de corriente que la celda consume, se tomó en cuenta el voltaje nominal que puede suministrar la fuente; a su vez, se utilizó el amperímetro de la fuente para registrar la intensidad de corriente.

Una vez hecho el cálculo de la masa para cada elemento (tanto para el H_2 como para el O_2), mediante la Ecuación (3.3) se determinó el volumen teórico de cada elemento.

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3.3)$$

El resultado se multiplicó por el número de electrodos correspondientes a los ánodos y cátodos de la celda. Es importante recordar que el H_2 se concentra en el cátodo, mientras que el O_2 se concentra en el ánodo. Finalmente, el caudal total teórico de HHO es el resultado de la suma del volumen de H_2 y el volumen de O_2 calculados previamente.

3.3.3 MATRIZ EXPERIMENTAL Y CONDICIONES DE OPERACIÓN.

El diseño de la matriz experimental fue delimitada por 3 variables que influyen en el desarrollo del proceso de combustión: la relación de compresión del motor (RC) con ángulo de chispa definido, la temperatura de admisión del aire (T_{adm}) y finalmente el flujo volumétrico de HHO (\dot{Q}_{HHO}) que ingresa a la cámara de combustión

en función de la variación del voltaje suministrado por la fuente. Con estas variables se pretende influir en los resultados de la presión en cámara y la concentración de emisiones.

De acuerdo con lo estipulado en la norma ASTM-D2700 [61], la temperatura para la evaluación de los combustibles es de $T_{adm}=38^{\circ}\text{C}$, además el ángulo de ignición varía en función de la relación de compresión. Adicionalmente, el rango de RC fue seleccionado con base en lo encontrado en el trabajo de tesis de Rubio Gómez [49], en el cual indica que las RC de 7.36, 7.86, 8.45 y 9.15 fueron en las que la autoignición comienza a apreciarse. En la Tabla 3.6 se expone la matriz experimental diseñada para llevar a cabo esta investigación.

TABLA 3.6: Matriz experimental diseñada.

RC	\dot{Q}_{HHO} [ml/min]	T_{adm} [$^{\circ}\text{C}$]
7.36 (CA=18 $^{\circ}$)	0	38
7.86 (CA=17 $^{\circ}$)	451.861 (12 V)	68
8.45 (CA=16 $^{\circ}$)		

En la matriz se empleó gasolina pura (G100) como combustible de referencia y una mezcla de gasolina-*HHO* manteniendo un caudal de *HHO* con el voltaje nominal de 12 V (GHHO). Los 2 combustibles empleados, combinados con las 3 relaciones de compresión y la evaluación en las 2 temperaturas, constan un total de 12 ensayos.

Por otra parte, el tiempo de inyección se mantuvo constante para cada ensayo, siendo modificado por cada mezcla y a diferente temperatura. Esto se debe a que el control de la instalación calcula por sí mismo el tiempo en que debe permanecer abierto el inyector para alcanzar la relación A/F deseada [49, 76]. La apertura del cuerpo de aceleración se posiciona en totalmente abierto, ya que la autoignición se potencializa cuando se añade más carga al motor, lo cual sucede con la válvula

totalmente abierta. Como la combustión se pretende realizar en condiciones estequiométricas, el valor de lambda (λ) se define en 1 para todos los ensayos.

Cada ensayo fue configurado para el registro de 9 conjuntos de combustión y 1 de arrastre, estableciendo un periodo de combustión y arrastre de 35 000 milisegundos (*ms*) y 22 000 *ms*, respectivamente. Estos periodos permiten la captura de los datos reales de las emisiones para el analizador MAHA durante los conjuntos de combustión, mientras que los conjuntos de arrastre permiten la limpieza de los gases de escape producto de combustiones anteriores.

De los diez conjuntos configurados, los primeros 4 fueron medidos por el analizador MAHA con la finalidad de estabilizar el factor λ para mantener la estequiometría en cada ensayo. Dicho factor es medido a través del sensor de oxígeno del analizador, y a su vez, es ajustado mediante la interfaz de control del motor. Terminada la estabilización del λ , el resto de los conjuntos fueron medidos con el analizador MAHA para registrar las emisiones de gases de escape del motor.

3.4 TRATAMIENTO DE DATOS.

3.4.1 DETERMINACIÓN DE INTENSIDAD Y PROBABILIDAD DE APARICIÓN DEL KNOCK.

Como se explicó en la Sección 3.2.5, la medición de las oscilaciones de las curvas de presión dentro del cilindro fue realizada a través de un filtro aplicado a la señal de presión para 306 ciclos de combustión. Los datos obtenidos fueron procesados estadísticamente mediante la interfaz de usuario desarrollada en el trabajo de Rubio Gómez [49].

En el presente trabajo de investigación se presentan los promedios y valores máximos de la presión dentro del cilindro, así como la intensidad de autoignición; haciendo uso de gráficos de barras con marcadores para cada elemento de la matriz.

El objetivo del tratamiento de datos de la presión en el cilindro, es detectar una relación entre la intensidad de autoignición y el flujo de *HHO* introducido en el colector de admisión.

3.4.1.1 USO DE LA INTERFAZ DE ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN.

Cuando los datos de la señal de presión son procesados mediante la interfaz de control del motor CFR, estos se guardan en una carpeta creada por el mismo sistema de captura de datos para su posterior análisis. Para ello, se realiza la siguiente secuencia de pasos:

1. Iniciar el programa de Matlab y ejecutar el código precargado en el editor de código visualizado en la Figura 3.10. Se abrirá una nueva ventana con la interfaz *Análisis Combustión*. Como se aprecia en la Figura 3.11, la interfaz se divide en 5 secciones: 1) *Menu*, 2) *Mean Motored Signal*, 3) *Individual Combustion Signals*, 4) *Combustion Analysis* y 5) *Mean Combustion Signal*.
2. Para iniciar con el análisis, lo primero que se debe hacer es cargar el archivo que contiene los ciclos de arrastre del motor. Para ello, en la sección 1) *Menu*, se pulsa sobre el botón *a) Load Motored File*, y se busca el archivo correspondiente.
3. Es importante señalar que el programa de control del motor CFR guarda los conjuntos de combustión por fecha y por hora de creación, de esta forma el archivo de arrastre es el primero en ser creado y por lo tanto, el más <antiguo> de los 10 conjuntos (Figura 3.12a). Una vez identificado, se carga y se permite que el programa realice la curva de arrastre con los datos contenidos.

4. Cuando la interfaz muestre la curva de arrastre en la sección *2) Mean Motored Signal*, se debe seguir con la carga del resto de los archivos. Nuevamente en la sección *1) Menu*, se pulsa sobre el botón *b) Load Combustion File*, y se cargan el resto de los archivos con los ciclos de combustión registrados, asegurándose de no cargar una vez más el archivo de arrastre, de lo contrario el programa señalará un error y deberá cerrar todo para iniciar desde el punto 1 (Figura 3.12b). De igual forma, se permite que el programa realice las curvas de presión para cada ciclo de combustión (dado que cada archivo contiene una gran cantidad de datos, el programa tardará unos minutos en cargarlos por completo).
5. Cuando todos los archivos estén cargados, la interfaz mostrará los datos correspondientes a los ciclos registrados. Y automáticamente graficará las curvas de presión individuales de cada ciclo, así como la curva de presión promedio de los ciclos registrados (Figura 3.13).
6. Para trabajar sobre los datos capturados, en la sección *1) Menu* se pulsa sobre el botón *c) Save Results*. Finalmente, guardar los datos como archivo *xls* con el nombre $\langle \text{RC_x.y_}[\text{combustible}] \text{T}[\text{z}] \rangle$.
7. Guardar las curvas de presión promedio como archivos *fig* de Matlab. Para ello en la sección *5) Mean Combustion Signal*, en el *Menu*, habilitar la casilla **Motored** y presionar el botón *a) Get Figure*. Posteriormente, guardar la figura con el nombre $\langle \text{Press-relenti-combustion-}[\text{RC}] \text{T}[\text{z}] \rangle$.
8. Para realizar otro análisis en la sección *1) Menu*, se presiona el botón *d) Clear Data* y se repiten los pasos a partir del punto 2. En caso de haber terminado con el análisis, cerrar todas las ventanas y finalizar el software Matlab.

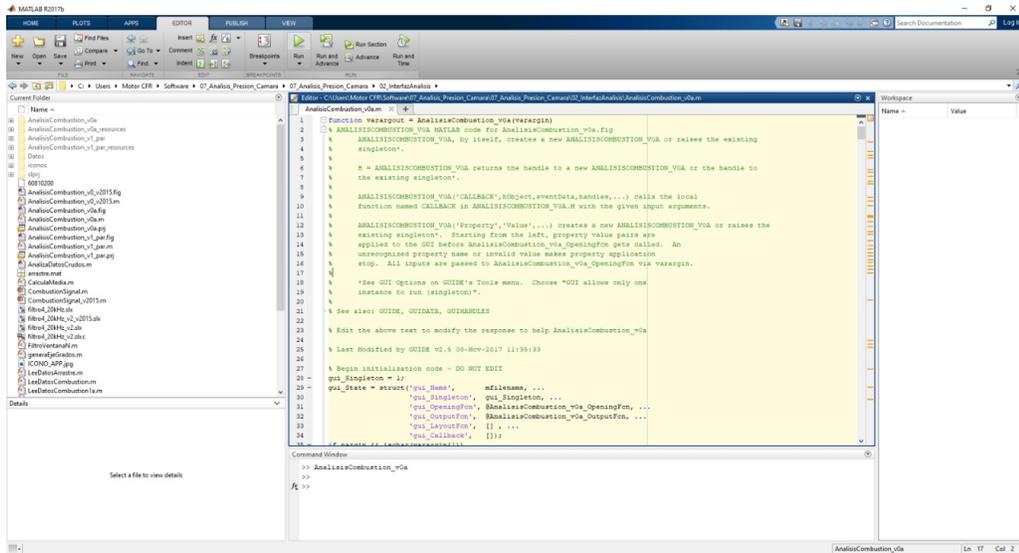


FIGURA 3.10: Workspace de Matlab con el código precargado.

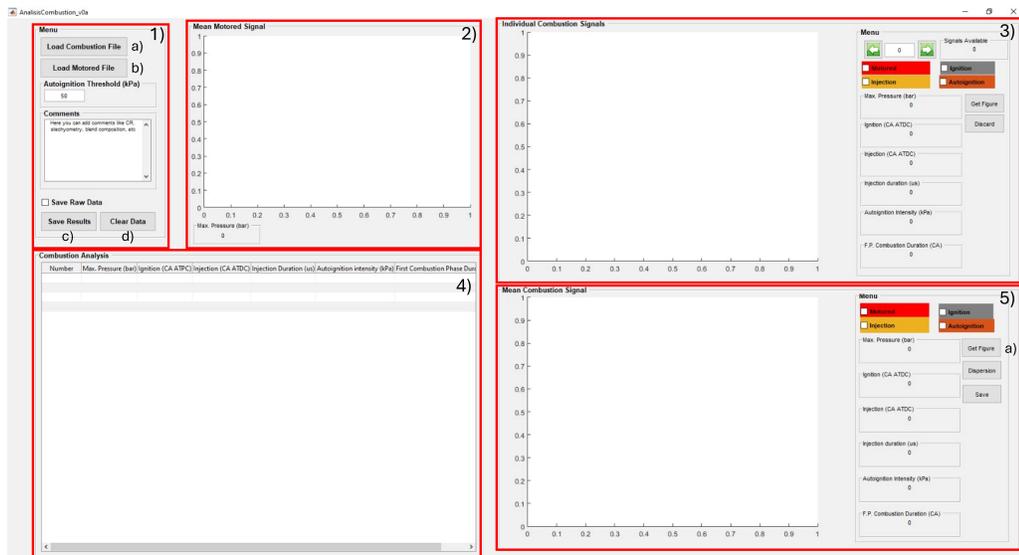


FIGURA 3.11: Interfaz del programa Análisis de la Combustión.

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
20231220_114835_429	20/12/2023 11:37	Microsoft Access ...	78,205 KB
20231220_114933_999	20/12/2023 11:38	Microsoft Access ...	78,205 KB
20231220_115032_561	20/12/2023 11:39	Microsoft Access ...	78,205 KB
20231220_115130_990	20/12/2023 11:40	Microsoft Access ...	78,205 KB
20231220_115229_566	20/12/2023 11:41	Microsoft Access ...	78,205 KB
20231220_115328_134	20/12/2023 11:42	Microsoft Access ...	78,205 KB
20231220_115426_615	20/12/2023 11:43	Microsoft Access ...	78,205 KB
20231220_115525_251	20/12/2023 11:44	Microsoft Access ...	78,205 KB
20231220_115623_847	20/12/2023 11:45	Microsoft Access ...	78,205 KB
20231220_115722_459	20/12/2023 11:46	Microsoft Access ...	78,205 KB

(a) Selección del archivo de arrastre. (b) Selección de los archivos de combustión.

FIGURA 3.12: Carga de los archivos de datos de presión.

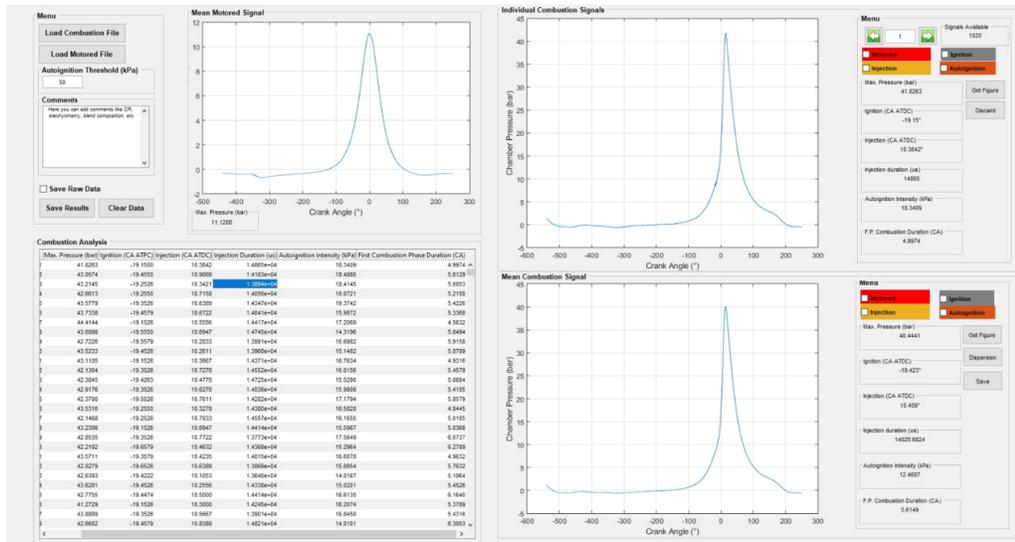


FIGURA 3.13: Programa Análisis de la Combustión con datos cargados correctamente.

3.4.2 ANÁLISIS DE LOS GASES DE ESCAPE.

Con este análisis se pretende cuantificar los niveles de las emisiones de escape del motor mediante el uso de un analizador de gases MAHA modelo MET 6.3. El procedimiento seguido para la realización del análisis se describe a continuación.

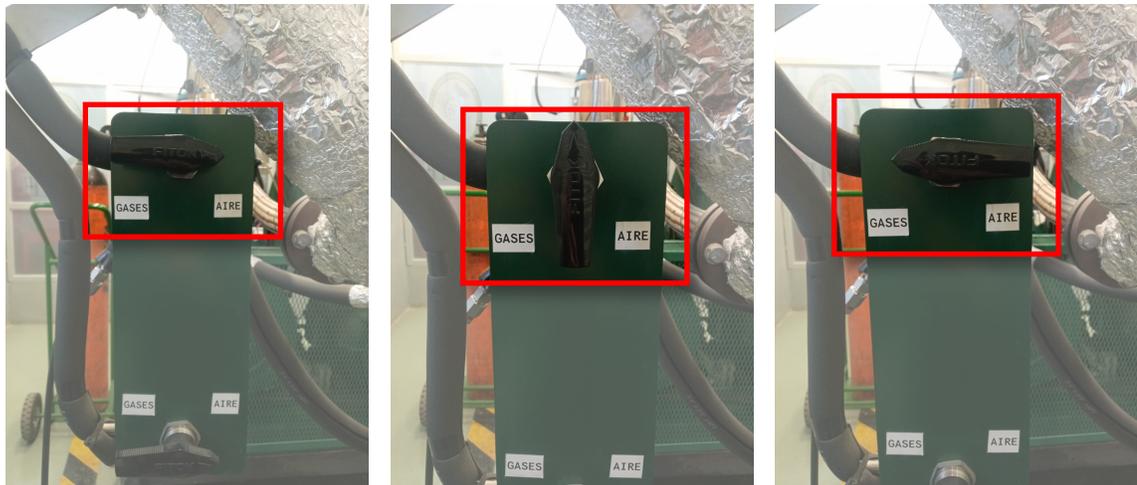
3.4.2.1 ADQUISICIÓN DE DATOS. FUNCIONAMIENTO DEL MAHA MET 6.3.

Para la correcta adquisición de datos de las emisiones se realizó el siguiente procedimiento para operar el equipo:

1. Encender el analizador MAHA y permitir tanto su inicialización como su calentamiento. Es importante iniciar primero el analizador antes de encender el motor CFR.

2. Realizar la prueba de hermeticidad de la sonda a través del software del analizador. Esta prueba se hace solamente 1 vez al día durante la experimentación. Cabe señalar que, en el caso de la instalación del motor CFR usada en este trabajo; la válvula del motor debe permanecer abierta hacia la inscripción *aire*, tal como se muestra en la Figura 3.14a.
3. Dentro del software del analizador, llevar a cabo la siguiente selección de opciones: *Gasolina>Medición de gases estática>Auto*. A continuación el analizador inicia con la verificación de vacío, por lo cual es necesario cerrar la sonda del MAHA y abrirla cuando el software lo indique. En este caso, la válvula del motor debe girarse 90° a la izquierda de la inscripción *aire* para cerrarse, tal como se aprecia en la Figura 3.14b. Mientras que para abrirla, debe volver a señalar hacia la inscripción *aire*.
4. Posterior a la prueba de hermeticidad, el software realiza una prueba de ajuste del punto cero, donde se lleva a cabo la prueba de contenido de *HC* y componentes de emisiones. En este punto es primordial mantener la válvula abierta en la inscripción *aire* (oxígeno) para evitar un ajuste incorrecto y causar daños al equipo.
5. Cerrar el software del analizador utilizando los botones proporcionados en la interfaz, y abrir el software de análisis de emisiones. Se deben asegurar 2 cosas: que se visualicen las emisiones que se desean medir y la correcta selección del combustible a utilizar.
6. Una vez dentro del software de análisis de emisiones, configurar el equipo como *Sólo gasolina* e indicar las emisiones que se desean estudiar. Para evitar errores de funcionamiento, se deben deshabilitar las casillas de *PM máx* y *PM sin filtrar*.
7. Realizar otra prueba de ajuste del punto cero. Esta prueba se hace en cada ensayo y manteniendo la válvula abierta en la inscripción *aire*.

8. Encender el motor CFR. Es importante efectuar alrededor de 10 ciclos de combustión antes de comenzar a medir con el analizador, esto se realiza para asegurar el correcto funcionamiento del motor.
9. Iniciar la medición del analizador a través del botón *Ejecutar* de la interfaz; es importante mencionar que el analizador tomará su tiempo para inicializar antes de comenzar a medir. Una vez inicializado, y manteniendo la válvula abierta en la inscripción *aire*, verificar el porcentaje de oxígeno en el aire (20-21 %). Con esta acción se comprueba que el analizador funciona correctamente. En caso de indicar un valor de O_2 diferente o incluso de no indicar alguna lectura; se debe detener la prueba, apagar y revisar el equipo.
10. Posterior a la verificación del funcionamiento del analizador; girar rápidamente la válvula 180° a la izquierda, para abrirla en la inscripción *gases* como se observa en la Figura 3.14c. En este paso el analizador comienza con el registro de datos de los gases de escape.
11. Una vez finalizado el ensayo, exportar y guardar los datos como archivo *CSV* (archivo compatible con la paquetería de Excel); también guardar el archivo *MPM* del software de análisis de emisiones.
12. En caso de realizar otro ensayo, abrir la válvula en la en la inscripción *aire*, abrir un nuevo archivo y realizar el ajuste a punto cero. Para este punto, el motor debe estar listo para iniciar una nueva toma de datos, por lo cual se repiten los pasos a partir del punto 9.
13. Terminada la experimentación y guardados los datos de interés, cerrar el software de análisis de emisiones y apagar el equipo.



(a) Abierta en aire.

(b) Cerrada.

(c) Abierta en gases.

FIGURA 3.14: Posiciones de la válvula del motor para el analizador MAHA.

3.4.2.2 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS PARA LAS EMISIONES.

Terminada la captura de datos de emisiones, se procedió a realizar un tratamiento estadístico debido a la gran cantidad de datos capturados por el analizador y la dispersión existente entre los mismos. Para lo cual, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

1. Acotar los límites de datos. Dado que la adquisición de datos se realiza en un tiempo continuo, se registraron las mediciones tanto de ciclos con combustión como los ciclos en los que no hay combustión. Entonces, para delimitar cuándo inicia y termina un ciclo de combustión se tomaron en cuenta los siguientes 3 criterios: estabilización del CO_2 ($CO_2 \approx 13\%$), mantener la estequiometría en el ciclo ($\lambda = 1 \pm 0.05$) y disminución del porcentaje de O_2 ($O_2 \approx 1\%$).
2. Una vez filtrados los valores de combustión, construir tablas de distribución de frecuencias e histogramas con campanas de Gauss para cada emisión. A través de estos, se observarán los rangos y las tendencias de los datos.

3. Determinar los valores máximos y mínimos de cada emisión, así como calcular las medidas de tendencia central, las desviaciones estándar y los cuartiles 2 y 3.
4. Al presentarse una variación relativamente alta, se utilizó la media armónica (H) como punto de referencia para cada emisión. Este tipo de media se utiliza en distribuciones asimétricas, de forma que se mantiene su representatividad al promediar los valores de una variable. La fórmula utilizada se aprecia en la Ecuación (3.4). Donde N es el número de elementos $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ sobre los cuales se desea calcular la media.

$$H = \frac{N}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3} + \dots + \frac{1}{x_n}} \quad (3.4)$$

Las emisiones estudiadas, fueron agrupadas en gráficas de barras mediante su media armónica correspondiente. Por lo consiguiente, la comparación de resultados entre emisiones determinará qué mezcla emite la menor cantidad y se relacionará la influencia del *HHO* sobre los niveles de las emisiones de interés.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DEL EFECTO DEL HHO EN LA COMBUSTIÓN DEL MOTOR CFR

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la caracterización de la celda electrolítica y la experimentación de la combustión del motor CFR. En primer lugar, se muestran los resultados teóricos y experimentales de la producción de HHO proporcionada por una celda electrolítica Hydrocell. Posteriormente, se muestran las curvas de presión en cámara obtenidas para cada una de las mezclas de combustible con respecto a la relación de compresión y temperatura del aire de admisión estudiadas. Seguidas de las gráficas relacionadas al comportamiento de la presión máxima en cámara, la presencia e intensidad de autoignición y la duración de la primera fase de la combustión. Finalmente, se exponen los resultados comparativos del análisis de las emisiones contaminantes.

4.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA.

El objetivo principal de la caracterización de la celda utilizada es determinar la producción de HHO durante la electrólisis. De igual manera, se pretende controlar dicha producción variando las condiciones de operación de la celda y asegurar un flujo constante de gas durante la etapa de inyección y su posterior combustión.

En la Tabla 4.1 se aprecian los resultados numéricos obtenidos mediante la Ecuación (3.2) para la producción teórica de HHO , tomando en consideración el voltaje nominal (12 V) proporcionado por la fuente utilizada.

TABLA 4.1: Resultados numéricos de los caudales de HHO teórico y experimental.

		Faraday
Voltaje [V]	Amperaje [A]	\dot{Q}_{HHO} [ml/min]
12	8.95	483.037

A continuación se muestra la Tabla 4.2 con las medias armónicas de los resultados experimentales para cada variable medida por el sensor Alicat M-500SCCM-S/5M para el flujo de HHO otorgado por la celda.

TABLA 4.2: Propiedades del gas HHO registradas por el sensor Alicat M-500SCCM-S/5M.

Voltaje	Temperatura	Presión_{abs}	\dot{Q}_{HHO}
[V]	[°C]	[PSI]	[ml/min]
12	32.231	13.729	478.583

De acuerdo con lo observado en la tabla anterior, existe una diferencia porcentual de 0.922% para un voltaje de operación de 12 V en comparación con el

caudal teórico calculado. Estos resultados muestran la exactitud de la producción de la celda utilizada con respecto a lo calculado teóricamente, por lo cual se tiene la certeza de tener un flujo de HHO constante e ininterrumpido.

En el Apéndice A, se muestran los valores numéricos de los experimentos realizados.

4.2 CURVAS DE PRESIÓN EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

La presión máxima alcanzada en la cámara de combustión se considera como un parámetro influyente en la aparición de la autoignición, dicho valor depende principalmente de la velocidad de la combustión, es decir, la duración de la primera fase de la combustión; el poder calorífico del combustible y la relación de compresión (RC) bajo la que opera el motor. En las Tablas 4.3 y 4.4 se presentan las condiciones en las que se realizaron los ensayos experimentales, donde la temperatura del aire de admisión (T_{adm}) y las RC fueron variadas de acuerdo a la matriz experimental; mientras que la temperatura de los gases de escape (T_{ge}) y la temperatura del aceite del motor (T_{aceite}) fueron medidas a través de la interfaz de control del motor.

TABLA 4.3: Condiciones de operación del motor para G100.

T_{adm} [$^{\circ}C$]	RC	T_{ge} [$^{\circ}C$]	T_{aceite} [$^{\circ}C$]
38	7.36	450.226	42.149
	7.86	448.829	
	8.45	434.529	
68	7.36	446.865	45.824
	7.86	438.65	
	8.45	433.509	

TABLA 4.4: Condiciones de operación del motor para GHHO.

T_{adm} [$^{\circ}C$]	RC	T_{ge} [$^{\circ}C$]	T_{aceite} [$^{\circ}C$]
38	7.36	455.3	45.453
	7.86	446.742	
	8.45	436.740	
68	7.36	450.891	47.383
	7.86	443.307	
	8.45	428.802	

A continuación se muestran las gráficas del comportamiento de la presión dentro de la cámara de combustión de cada mezcla y RC estudiadas. Dado que la adquisición de datos se realizó para 306 ciclos de combustión, el valor presentado es el promedio de las presiones máximas registradas de cada ciclo.

Las Figuras 4.1a y 4.1b ilustran las curvas de presión en cámara de cada combustible estudiado a las T_{adm} de $38^{\circ}C$ y $68^{\circ}C$, respectivamente; ambas evaluadas en la RC de 7.36. En cada figura se presenta la curva de arrastre, siendo esta la que tiene una menor presión debido a la ausencia de la combustión; a su vez, el resto de curvas representan cada combustible (G100 y GHHO).

Tal como se observa, la T_{adm} tiene una gran influencia sobre las curvas de presión, donde los ensayos de $T_{adm}=38^{\circ}C$ alcanzan picos de presión mayores que los $T_{adm}=68^{\circ}C$. Esto ocurre porque al aumentar la T_{adm} , la densidad del aire disminuye; entonces es necesario inyectar una menor cantidad de combustible para mantener la estequiometría, lo que trae en consecuencia una menor liberación de energía. Estos comportamientos en la presión coinciden con lo reportado en [49, 76, 77].

A continuación, se muestran las gráficas de la evolución de la presión máxima promedio alcanzada en cámara para cada mezcla y temperatura de la matriz de experimentos. Adicionalmente las curvas de presión para las RC 7.86 y 8.45 se encuentran en el Apéndice B.1.

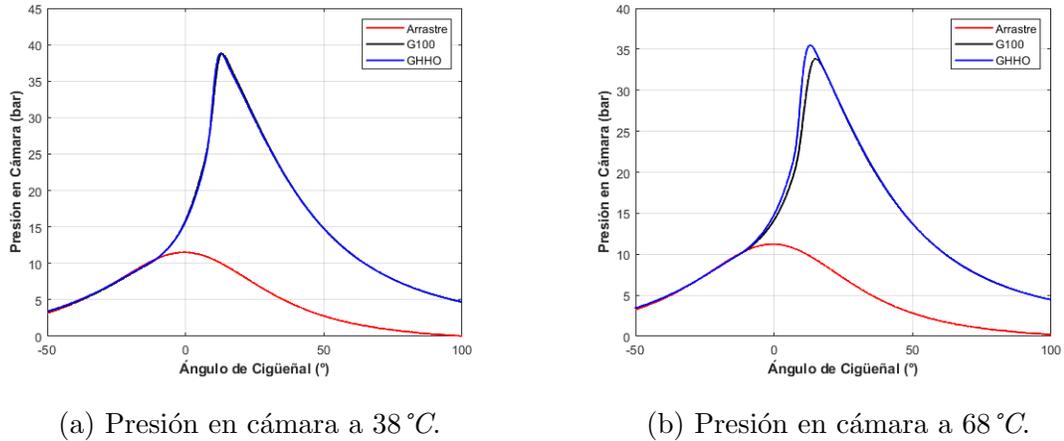
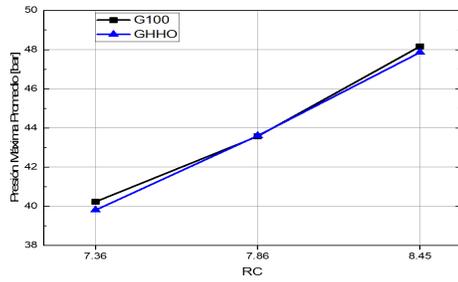


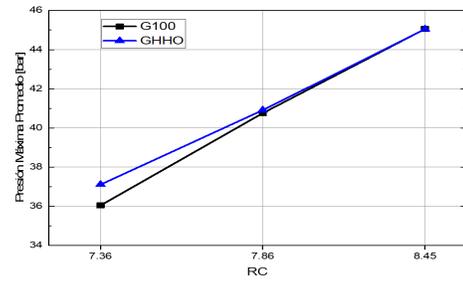
FIGURA 4.1: Curvas de presión para el combustible G100 y GHHO para una RC=7.36, a) 38 °C y b) 68 °C.

Tal como se observa en las Figuras 4.2a y 4.2b, la RC influye considerablemente en la magnitud de la presión en cámara, la cual alcanza el valor máximo con la RC más alta. En otras palabras, el proceso de combustión ocurre más rápido dando lugar a que el pico de presión ocurra durante la carrera de expansión y por lo tanto; a un volumen menor, lo cual aumenta su magnitud [48]. Este fenómeno es la razón por la que los motores que trabajan a elevadas RC tienen un mayor rendimiento, además de que las condiciones favorecen la presencia de la autoignición en los MEP.

Por otra parte, las gráficas muestran un incremento lineal de la presión máxima promedio en cámara, tanto para la G100 como para el GHHO. Ambos combustibles muestran una magnitud similar para cada RC. No obstante; para la RC de 7.36 a una $T_{adm}=68\text{ }^{\circ}\text{C}$, el pico de presión del GHHO aumentó en un 2.95 % sobre la curva de la G100.



(a) Presión máxima promedio a 38 °C para las distintas RC.



(b) Presión máxima promedio a 68 °C para las distintas RC.

FIGURA 4.2: Comparación de la presión máxima promedio para los combustibles estudiados.

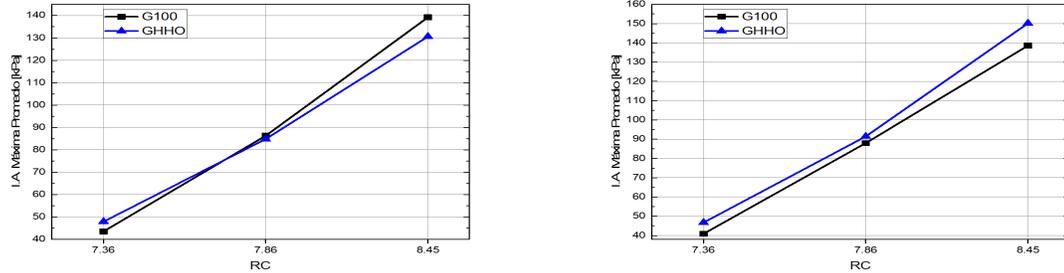
De igual manera, en el Apéndice B.2 se encuentran las gráficas de las presiones máximas registradas en cámara; a su vez, en el Apéndice C.1 se ilustran las tablas de resultados numéricos de presión en la cámara de combustión.

4.3 INTENSIDAD Y FRECUENCIA DEL KNOCK.

Para la determinación de la intensidad y frecuencia del fenómeno knock es necesario evaluar los siguientes 2 criterios: la intensidad de knock promedio (KI) y la probabilidad de aparición de knock (KP) a lo largo de los 306 ciclos estudiados, determinada como el porcentaje de ciclos que manifestaron una intensidad de autoignición (IA) mayor a 50 kPa [49].

En las Figuras 4.3a y 4.3b se muestran las gráficas de KI obtenidas para cada mezcla de combustible estudiado a las diferentes RC y T_{adm} definidas en la matriz experimental. En primera instancia, se aprecia una correlación lineal entre el incremento de la IA promedio conforme aumenta la RC, dicha aseveración se cumple para ambos combustibles y ambas temperaturas estudiadas. Tal como se observó en la Sección 4.1, cuanto más alta es la RC, más alto es el valor de la presión en cámara. Por este motivo, las condiciones termodinámicas de presión y temperatura

del cilindro favorecen la reacción de oxidación del combustible que se encuentra en la cámara, provocando la ignición espontánea de la masa de combustible sin quemar, antes de ser afectado por el frente de llama originado por la chispa de la bujía [46].



(a) Intensidad de autoignición promedio a 38 °C.

(b) Intensidad de autoignición promedio a 68 °C.

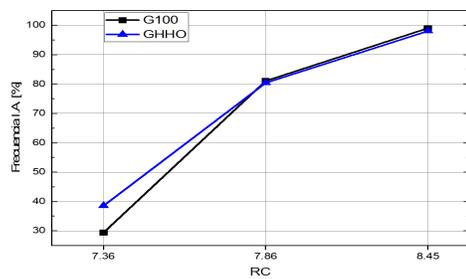
FIGURA 4.3: Comparación de la IA para los distintos combustibles y RC.

De las figuras anteriores se puede resaltar el impacto de la T_{adm} sobre la KI en los ensayos de GHHO, los cuales presentaron valores mayores con respecto a la gasolina y un incremento de hasta 14.98 % en los experimentos a 68 °C en comparación con los experimentos de 38 °C. Por su parte, los valores de KI para la G100 se mantuvieron en un rango similar para cada temperatura de admisión. Analizando en comportamiento de la KI entre combustibles, es evidente la diferencia entre el knock registrado en la RC de 8.45; en la cual los experimentos de G100 a 38 °C superaron en un 6.18 % al GHHO. Sin embargo, este comportamiento se invierte cuando la temperatura del aire de admisión sube a 68 °C, aumentando la KI del GHHO en un 8.35 % sobre el valor registrado para la gasolina.

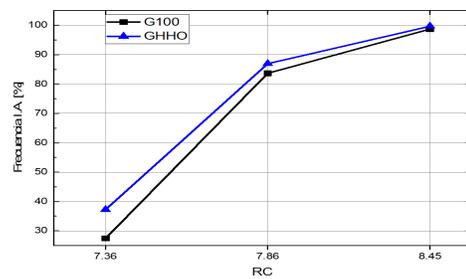
Para explicar el efecto anterior es importante aclarar que el H_2 es propenso a un knock incontrolado, el cual depende de los números de octano (RON y MON). Generalmente el MON de una gasolina es aproximadamente 8 puntos más bajo que el RON. En el caso del H_2 , el MON (60) es mucho más bajo que el RON (>160), por lo tanto la resistencia al knock es relativamente baja en la práctica comparado con otros combustibles [78, 79].

El comportamiento anterior se relaciona significativamente con la probabilidad de aparición del knock o frecuencia de intensidad de autoignición (KP), la cual se muestra en las Figuras 4.4a y 4.4b para $T_{adm}=38^{\circ}C$ y $T_{adm}=68^{\circ}C$, respectivamente. En primer lugar, se observa una relación directamente proporcional entre la RC y la KP, esto se cumple para ambos combustibles.

Al analizar la KP para cada combustible, las gráficas muestran que el GHHO presentó una probabilidad de knock igual o superior que la de la G100. Siendo la RC de 7.36 en la que la diferencia es más evidente, alcanzando una diferencia del 31.1% y 35.57% para los ensayos de $38^{\circ}C$ y $68^{\circ}C$, respectivamente. De igual forma, los experimentos de $T_{adm}=68^{\circ}C$ muestran que el GHHO presenta una mayor probabilidad de knock con respecto a la G100 en todas las RC estudiadas.



(a) Probabilidad de aparición de knock a $38^{\circ}C$.



(b) Probabilidad de aparición de knock a $68^{\circ}C$.

FIGURA 4.4: Comparación de la probabilidad de aparición de knock para las distintas mezclas y RC.

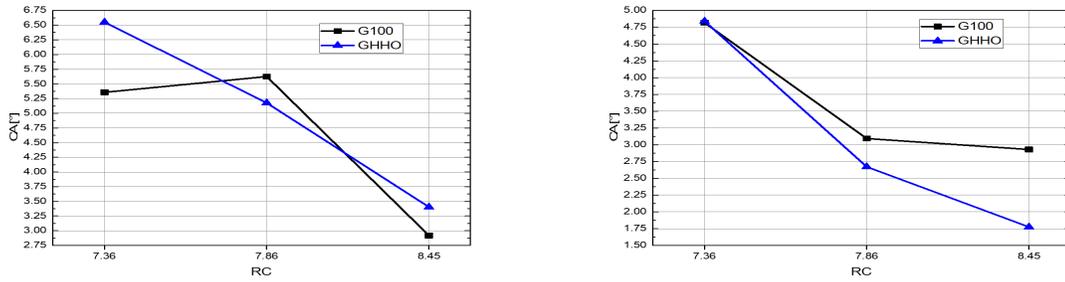
Para entender este incremento en la KP, es necesario analizar la duración de la primera fase de la combustión (DPFC), misma que se explica y detalla en la siguiente sección. En el Apéndice B.3 se encuentran las gráficas de la IA máxima, mientras que en el Apéndice C.1 se muestran los valores numéricos de la IA máxima, KP y KI.

4.4 DURACIÓN DE LA PRIMERA FASE DE LA COMBUSTIÓN.

En primer lugar, una elevada DPFC implica una elevada dispersión entre ciclos de combustión, es decir, que el proceso de combustión no se desarrolló en las mismas condiciones en cámara, lo cual impide la obtención de resultados consistentes sobre la presión en cámara para bajas RC [49]. En las Figuras 4.5a y 4.5b se observan las gráficas de la DPFC para cada elemento de la matriz. De igual forma, los resultados numéricos se encuentran en el Apéndice C.1.

Tal como se muestra, independientemente del combustible y la temperatura; la RC influye fuertemente sobre la DPFC, la cual disminuye con el aumento de la RC. Para el caso de los ensayos con $T_{adm}=68\text{ }^{\circ}\text{C}$, se percibe que un valor de RC más elevado favorece a que la DPFC sea más rápida para el GHHO, disminuyendo hasta un 60.57 % con respecto a la G100. No obstante, la DPFC del GHHO incrementó en un 22.28 % para la RC de 7.36 a una $T_{adm}=38\text{ }^{\circ}\text{C}$, posteriormente sufre una ralentización del 16.63 % para la RC de 8.45.

De igual manera, se puede apreciar el efecto que tiene la T_{adm} sobre la DPFC, donde los experimentos de $68\text{ }^{\circ}\text{C}$ muestran valores inferiores en comparación con los ensayos a $38\text{ }^{\circ}\text{C}$; esto aplica para ambos combustibles. Registrando un decremento para el GHHO de hasta un 52.12 % con respecto a la DPFC capturada en los ensayos de $38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por su parte, los resultados sugieren que la capacidad del HHO para reducir la DPFC puede aumentar en RC superiores a 7, tanto para los ensayos de $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ como en los de $68\text{ }^{\circ}\text{C}$.



(a) Comparación de la DPFC a 38 °C.

(b) Comparación de la DPFC a 68 °C.

FIGURA 4.5: DPFC para los combustibles estudiados.

Finalmente, acorde a lo presentado sobre la DPFC; se puede explicar que el incremento de la KP para el GHHO se relaciona con la reducción de la DPFC, dado que esta última implica mayores niveles de presión en cámara, favoreciendo al incremento de la temperatura del combustible durante el proceso de combustión y por ende, a la generación de knock [49].

4.5 ANÁLISIS DE LOS GASES DE ESCAPE.

De acuerdo con lo mencionado en la Sección 3.4.2, la instalación experimental fue equipada con un analizador de gases conectado directamente al conducto de escape del motor CFR, por lo tanto los datos registrados no fueron producto de filtraciones o tratamientos físico-químicos de post-combustión.

Los resultados de los gases de escape se presentan en las secciones siguientes, comparando los niveles de cada tipo de emisión para cada combustible y RC.

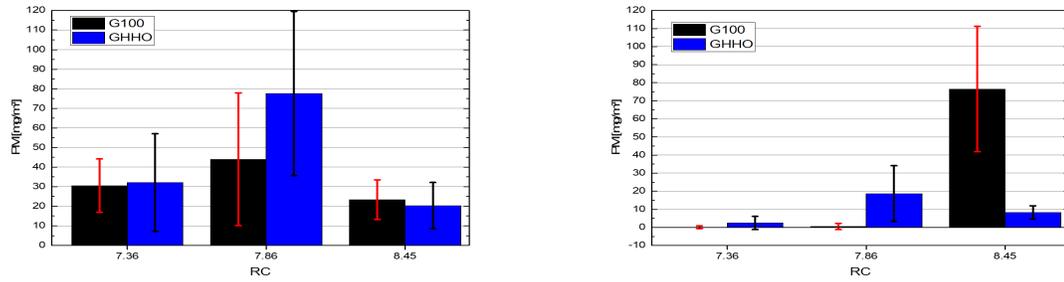
4.5.1 EMISIONES DEL MATERIAL PARTICULADO.

Los resultados de las emisiones del material particulado (PM) se muestran en las gráficas de las Figuras 4.6a y 4.6b para cada temperatura estudiada. De igual

forma, los resultados numéricos pueden consultarse en el Apéndice C.2.

En primera instancia, se aprecia que la temperatura del aire de admisión impacta positivamente en la concentración del PM , dado que al elevar la temperatura de $38^{\circ}C$ a $68^{\circ}C$, se logra una reducción de la concentración de PM de hasta un 99.57%. Para comprender este comportamiento, es importante aclarar que la formación de PM se ve afectada por tres agentes: *i*) el tipo de combustible, *ii*) el combustible líquido en cámara y *iii*) la temperatura de combustión [80], siendo esta última el factor principal en este análisis. Adicionalmente, esta condición puede ser explicada con lo reportado por Singh et al. [81], quien afirma que el PM se forma en condiciones de altas temperaturas y con mezclas ricas en combustibles. Como se mencionó en la Sección 4.2, el aumento de la temperatura de admisión implica una disminución de la densidad del aire y para mantener la estequiometría es necesario inyectar una menor cantidad de combustible; es decir, en el presente estudio se trabaja con una mezcla pobre de combustible, evitando así la alta concentración de PM .

Por otro lado, para los ensayos de $T_{adm}=38^{\circ}C$ la concentración de PM no mostró cambio alguno entre los combustibles estudiados y las RC. Mientras que para los ensayos de $T_{adm}=68^{\circ}C$, los valores de PM incluso llegaron a 0 para la G100 y GHHO en la RC más baja (7.36), incrementando conforme aumenta la RC. Siendo la RC de 8.45 en la que se aprecia un cambio notable entre los combustibles estudiados, donde el GHHO mostró una disminución de hasta el 89.17% con respecto a la gasolina. Acorde con lo reportado por Kayes et al. [80], el PM puede generarse debido a la presencia de gotas de combustible en la cámara de combustión. Cuando estas se encuentran en la pared del cilindro, la alta temperatura provoca su ignición espontánea, generando llamas de hollín y aumentando la concentración de PM en los gases de escape.



(a) PM a $38^{\circ}C$ para las distintas RC.

(b) PM a $68^{\circ}C$ para las distintas RC.

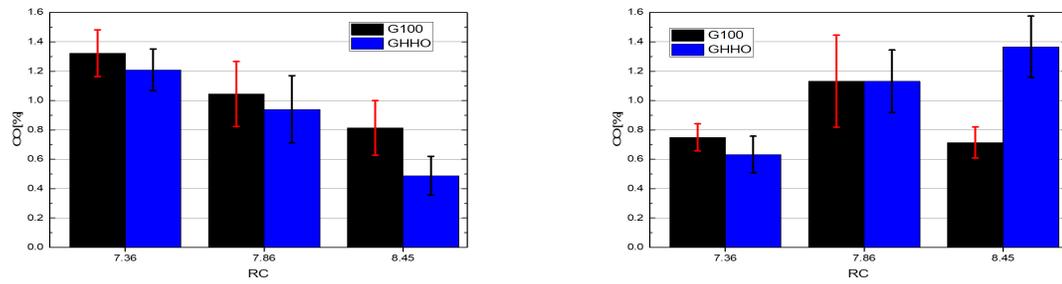
FIGURA 4.6: Niveles de emisión de PM para las distintas RC.

4.5.2 EMISIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO Y DIÓXIDO DE CARBONO.

A continuación se presentan los resultados de los niveles de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2) para cada elemento de la matriz. Los valores numéricos pueden ser consultados en el Apéndice C.2.

En primer lugar, se presentan las gráficas correspondientes a las emisiones de CO en las Figuras 4.7a y 4.7b a $T_{adm}=38^{\circ}C$ y $T_{adm}=68^{\circ}C$, respectivamente. Como se observa, para los experimentos de $T_{adm}=38^{\circ}C$, los niveles de CO muestran una tendencia descendente cuando la RC aumenta; sin embargo, entre los combustibles no muestran una diferencia en los valores de CO , comportándose de forma similar para cada RC.

Por su parte, en los experimentos de $T_{adm}=68^{\circ}C$, los niveles de CO tienden a ascender a medida que la RC aumenta. De acuerdo a lo observado, los combustibles estudiados presentan un comportamiento similar entre ellos para las RC de 7.36 y 7.86; sin embargo, cuando la RC=8.45 el nivel de CO incrementó hasta un 91.16% sobre el nivel registrado de la G100. Según lo indicado en la Sección 2.4.1, la formación de CO en los MEP se presenta cuando no hay suficiente oxígeno en la cámara de combustión para realizar la oxidación del combustible, propiciando un aumento de este producto intermedio de la combustión.


 (a) CO a $38^\circ C$ para las distintas RC.

 (b) CO a $68^\circ C$ para las distintas RC.

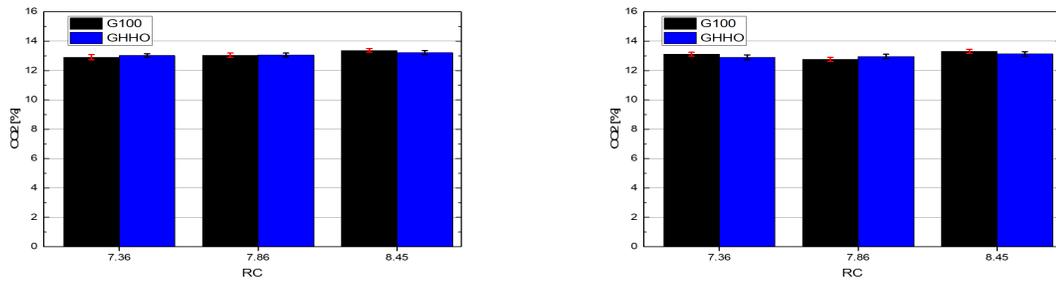
 FIGURA 4.7: Niveles de emisión de CO para las distintas RC.

Acorde a lo reportado por Zhao Z. et al. [82], de los factores que impactan en la formación de CO (λ , concentración de O_2 y temperatura de combustión en cámara), el valor λ es el que más influye. Afirmando que cuanto más pobre sea la mezcla, la presencia del O_2 es mayor, y por lo tanto, permite la oxidación del CO remanente en la cámara de combustión. Ahora bien, en este trabajo se mantuvo el λ en un valor estequiométrico para ambos combustibles, ajustando la cantidad de aire-combustible que se inyectaba durante los ciclos de combustión. De este modo, la concentración de O_2 y la temperatura de combustión tienen mayor relevancia en los niveles registrados durante los ensayos.

Al analizar los niveles de O_2 en los experimentos de $68^\circ C$ para la RC de 8.45, se observa un nivel considerablemente inferior en comparación con la gasolina. Este nivel bajo, implica la falta de oxígeno requerido para la oxidación del CO , aumentando la presencia de este último en las emisiones de escape. El comportamiento anterior coincide con lo registrado por Alm ElDin et al. [38], quien explica que la mezcla aire-combustible en las zonas cercanas al inyector suele ser insuficiente para mantener la propagación de la llama, de este modo, la temperatura local decremента y por lo tanto la oxidación del CO se interrumpe.

Con relación a los niveles de CO_2 , en las gráficas de las Figuras 4.8a y 4.8b se muestra el comportamiento de dicha emisión para cada combustible, en cada RC y T_{adm} estudiada. En primera instancia, los valores de emisión son aproximados al

13 % de concentración; esto se repite tanto en los ensayos de 38 °C como en los de 68 °C.



(a) CO_2 a 38 °C para las distintas RC.

(b) CO_2 a 68 °C para las distintas RC.

FIGURA 4.8: Niveles de emisión de CO_2 para las distintas RC.

La razón principal por la que los niveles de CO_2 se mantuvieron estables, es debido al valor λ . De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos por Wua C. W. et al. [83], la concentración de CO_2 depende de la relación aire-combustible y del CO , siendo el valor $\lambda \approx 1$ en la que aparece la máxima concentración de CO_2 . Esto quiere decir, que la condición estequiométrica permite que el proceso de combustión sea más completo. Complementando la estabilidad del CO_2 en el porcentaje del 13 %, se debe aclarar que esta concentración es usual en la combustión de la gasolina (con condición estequiométrica) [84].

De acuerdo al comportamiento visualizado en las gráficas de CO_2 y considerando lo explicado con anterioridad, parece no haber efecto de la adición del HHO a la gasolina, y a su vez, las gráficas muestran una nula relación entre el combustible, la RC y T_{adm} . De igual manera, los resultados numéricos pueden ser consultados en el Apéndice C.2.

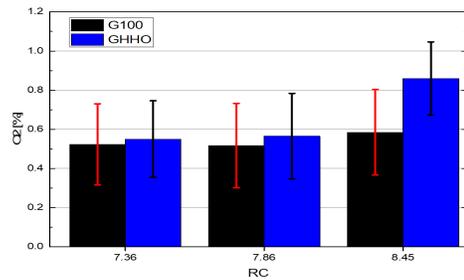
4.5.3 EMISIONES DE OXÍGENO.

El nivel del oxígeno (O_2) en los gases de escape puede implicar un efecto tanto favorable como perjudicial. Considerando que refleja la uniformidad de la mezcla

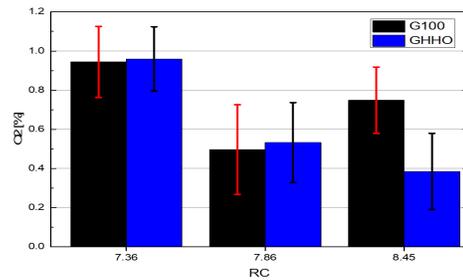
dentro del cilindro en un MEP, niveles elevados de O_2 aunados con altos niveles de productos intermedios conlleva a una combustión incompleta. Por otra parte, cabe la posibilidad de que el O_2 no reaccione con los hidrocarburos debido a que no hay combustible presente en cámara para hacer combustión [76].

En las Figuras 4.9a y 4.9b se observa el comportamiento del O_2 para ambos combustibles en cada RC y T_{adm} estudiadas. Los resultados numéricos pueden ser consultados en el Apéndice C.2.

Tal como se ilustra, los niveles de O_2 tienden a aumentar conforme aumenta la RC en los experimentos de $T_{adm}=38^\circ C$. A su vez, no se identifica diferencia entre el comportamiento del O_2 entre la G100 y el GHHO, por lo cual no es posible determinar el comportamiento de la combustión a esta temperatura. Por el contrario, en los niveles obtenidos para la G100 en los ensayos de $T_{adm}=68^\circ C$ no se identifica un patrón de incremento o decremento del nivel de O_2 al aumentar la RC. Por su parte, el GHHO muestra una disminución del O_2 al aumentar la RC, siendo la de 8.45 en la que alcanzó una disminución del 51.44 % en relación con lo registrado para la G100.



(a) O_2 a $38^\circ C$ para las distintas RC.



(b) O_2 a $68^\circ C$ para las distintas RC.

FIGURA 4.9: Niveles de emisión de O_2 para las distintas RC.

La disminución del O_2 para el GHHO en la RC de 8.45 a $T_{adm}=68^\circ C$, usualmente se relaciona con un nivel bajo de productos intermedios de la combustión, debido a que los átomos de oxígeno disponibles en la cámara de combustión oxidan las cadenas de carbono del combustible, transformándolo en CO_2 [46, 48]; sin embar-

go, las gráficas muestran que la falta de oxígeno en cámara dio lugar a la formación de emisiones CO , es decir, que el GHHO realizó una combustión incompleta.

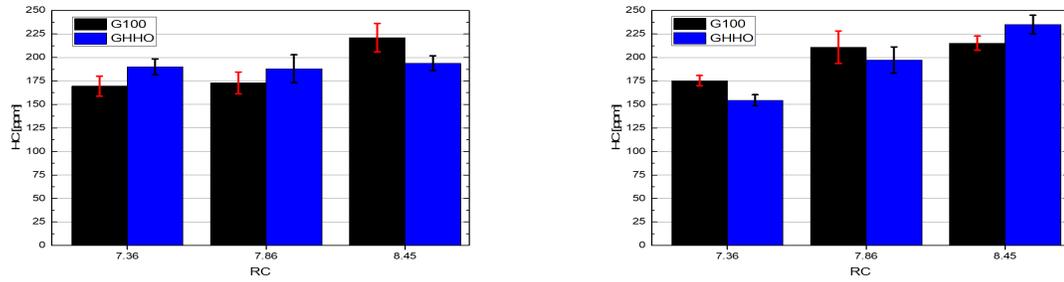
4.5.4 EMISIONES DE LOS HIDROCARBUROS SIN QUEMAR.

Retomando lo explicado en la Sección 2.4.3, los hidrocarburos sin quemar (HC) son restos de combustible no quemado, lo cual implica una pérdida en el rendimiento del motor. Usualmente esto se produce durante el funcionamiento del motor en frío; además de esta condición, el sistema de inyección de combustible tiene una influencia considerable, en especial si permite la formación de película líquida en la pared del cilindro [62].

Los resultados de los niveles de hidrocarburos sin quemar (HC) se presentan en las Figuras 4.10a y 4.10b a las T_{adm} de $38^{\circ}C$ y $68^{\circ}C$, respectivamente. Los valores numéricos se encuentran en el Apéndice C.2.

Como se logra observar, para ambas temperaturas se identifica una tendencia ascendente de los niveles de HC conforme aumenta la RC. En el caso de los experimentos de $T_{adm}=38^{\circ}C$, se observa que para la RC de 7.36 el GHHO mostró un valor superior en comparación con la G100, con una diferencia del 12.14%. Por el contrario, en la RC de 8.45 el GHHO presentó un valor de HC más bajo que el de la gasolina, disminuyendo dicha emisión hasta un 12.30%. A su vez, para la RC de 7.86, ambos combustibles tuvieron un comportamiento similar entre ellos, por lo cual no es posible afirmar si los niveles de HC aumentaron o disminuyeron en un combustible u otro.

Por otra parte, en los experimentos de $T_{adm}=68^{\circ}C$ el GHHO mostró una disminución de HC del 11.93% para la RC de 7.36 con respecto a lo registrado para la G100. Mientras que para la RC de 8.45, el GHHO incrementó el nivel de emisiones HC en un 9.18% sobre la G100. Al igual que con los experimentos de $38^{\circ}C$, los niveles de HC en ambos combustibles fueron similares para la RC de 7.86.


 (a) HC a $38^\circ C$ para las distintas RC.

 (b) HC a $68^\circ C$ para las distintas RC.

 FIGURA 4.10: Niveles de emisión de HC para las distintas RC.

Acorde a lo consultado en la literatura, las concentraciones de HC en las emisiones de escape disminuyen con la adición del HHO debido al incremento de la oxidación del combustible. Si se considera que una mezcla de gasolina-aire requiere un tiempo de inyección y posterior evaporación previo a la combustión, la adición de un combustible gaseoso conduce a una mezcla de mayor homogeneidad, dando como resultado una combustión adecuada y un nivel de HC inferior [85, 86].

Por otro lado, en algunas circunstancias el HC tiende a aumentar con la inyección del HHO , las razones principales son [87]:

- Diseño y control del motor. Donde el motor no está ajustado y optimizado para la adición del HHO en el sistema, conllevando a una combustión incompleta e incrementando la concentración de HC .
- Sincronización del tiempo de ignición. Si la chispa de la bujía no se ajusta tomando en cuenta la presencia del HHO en la cámara de combustión, se provocaría un aumento de emisiones HC .
- Las condiciones de temperatura y presión. Las propiedades de combustión del HHO pueden ser susceptibles a los cambios de temperatura y presión dentro del motor, complicando el desarrollo de la combustión de la mezcla en cámara.

Tomando en cuenta lo anterior, el aumento de las emisiones de HC obtenido durante la experimentación fue influenciado por las condiciones de temperatura y presión del motor.

Observando las gráficas, en los ensayos con temperatura de $38\text{ }^{\circ}C$, el GHHO fue sometido a una presión y temperatura inferior cuando la RC fue de 7.36, sugiriendo que el proceso de calentamiento del motor influyó en el desarrollo de la llama. El efecto anterior se contrarresta cuando la temperatura del aire aumentó a $68\text{ }^{\circ}C$ para la misma RC. Este mismo efecto se presentó en los ensayos de $68\text{ }^{\circ}C$ para la RC de 8.45, donde a pesar de que el GHHO se inyectó a una mayor temperatura y presión, estas mismas aceleraron el desarrollo de la flama, la cual se extingue en las zonas cercanas a la pared, dejando gasolina líquida remanente.

4.5.5 EMISIONES DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO.

Los resultados de los óxidos de nitrógeno (NOx) se presentan en las Figuras 4.11a y 4.11b a las T_{adm} de $38\text{ }^{\circ}C$ y $68\text{ }^{\circ}C$, respectivamente. Es importante mencionar que la formación e incremento del NOx se ve influenciado por tres elementos cruciales: *i*) el nitrógeno (N_2) presente en el aire, *ii*) el O_2 que permite la oxidación de los hidrocarburos del combustible, y en su defecto también la oxidación del N_2 ; y finalmente *iii*) una alta temperatura; siendo el NOx térmico el mecanismo que más influye en los MEP [46, 48].

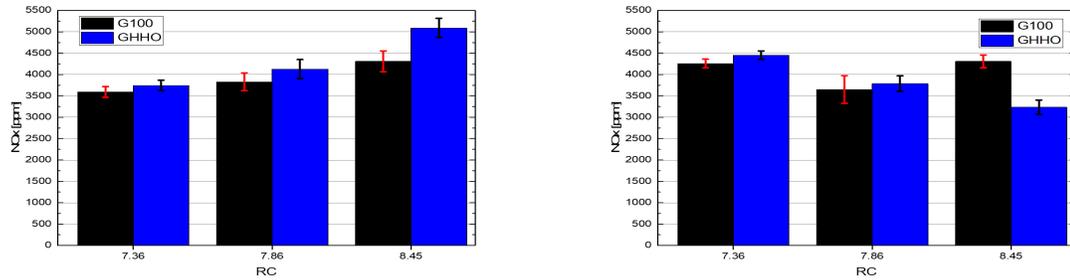
En primer lugar, se logra observar la influencia de la temperatura de admisión del aire sobre los niveles de NOx . Siendo la $T_{adm}=38\text{ }^{\circ}C$ en la que se registraron valores de al menos 3500 ppm en la RC más baja (7.36), mientras que en la $T_{adm}=68\text{ }^{\circ}C$ el valor mínimo registrado fue de aproximadamente 3250 ppm en la RC más alta (8.45). Aunado a la premisa anterior, en los ensayos de $T_{adm}=38\text{ }^{\circ}C$ existe una tendencia ascendente para ambos combustibles conforme aumentan las RC. Por otra parte, en los ensayos de $T_{adm}=68\text{ }^{\circ}C$, el GHHO mostró una tendencia descendente al

aumentar la RC, mientras que la tendencia de la G100 parece no tener relación con el aumento de la RC. A su vez, es posible notar diferencia entre los niveles de NOx de los combustibles para las RC de 7.36 y 8.45 en ambas temperaturas; mientras que en la RC de 7.86 los combustibles estudiados muestran un comportamiento similar entre ellos.

Para el caso de los experimentos de $T_{adm}=38\text{ }^{\circ}\text{C}$, el GHHO mostró un incremento de NOx del 4.33 % con respecto al nivel de la G100. Esta diferencia es mucho más evidente para la RC de 8.45, donde el NOx llegó a alcanzar hasta un 18.13 % de diferencia en comparación con la gasolina. De igual manera, en el caso de los experimentos de $T_{adm}=68\text{ }^{\circ}\text{C}$; el NOx del GHHO aumentó en un 4.6 % en relación con la gasolina para la RC más baja. No obstante, para el caso de la RC más alta, el GHHO mostró una disminución del 24.87 % en comparación con la G100.

A continuación se discutirán los comportamientos ilustrados con anterioridad. En primer lugar se encuentra la influencia de la temperatura del aire de admisión, de acuerdo a lo discutido en secciones anteriores, el aumento de la T_{adm} trae consigo una reducción en la densidad del aire; por lo cual, para mantener la estequiometría de los experimentos, se vuelve necesario reducir la masa de combustible que se inyecta. Este hecho, impacta sobre la concentración de oxígeno y de nitrógeno que ingresa al cilindro.

Por otra parte, la generación del NOx térmico es explicado por el mecanismo extendido de Zeldovich, el cual indica que la concentración de este compuesto cambia de forma exponencial con la temperatura. De acuerdo con lo reportado por Zhao Z. et al. [82], la adición del HHO a la gasolina beneficia a la velocidad de propagación de la flama y aumenta la temperatura en la cámara, además de que el oxígeno existente en el HHO permite la generación de NOx . El comportamiento descrito se puede observar en los ensayos de $T_{adm}=38\text{ }^{\circ}\text{C}$.



(a) NOx a $38^\circ C$ para las distintas RC.

(b) NOx a $68^\circ C$ para las distintas RC.

FIGURA 4.11: Niveles de emisión de NOx para las distintas RC.

Para el caso de los ensayos de $T_{adm}=68^\circ C$, se observa un comportamiento contrario al de los ensayos de $38^\circ C$. Especialmente en la RC de 8.45, donde el GHHO muestra un decremento importante en el NOx . Según como lo explica Zhao Z. et al. [88], el mecanismo de Zeldovich también considera el aumento de la temperatura y el aumento de la presión parcial de O_2 en el incremento del NOx . A su vez, Zhao Z. indica que el λ del MEP también afecta a la producción de NOx térmico, debido a que este factor afecta la concentración del O_2 como a la temperatura de la combustión. Considerando que se mantuvo el $\lambda=1$, se tienen las condiciones ideales para la combustión y con la adición de HHO la temperatura de la combustión incrementa. Sin embargo, trabajar con un valor de λ superior a 1, es decir, una mezcla pobre, ayuda a la disminución del NOx [31]. Los resultados graficados pueden ser consultados en el Apéndice C.2.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

Este capítulo es dedicado a presentar las conclusiones determinadas a partir de los resultados obtenidos en la presente investigación. Asimismo, se mencionan los trabajos futuros que podrían continuar y complementar la línea de investigación.

De forma general, se concluye que el uso del *HHO* como aditivo de la gasolina tiene una fuerte influencia sobre la duración de la primera fase de la combustión (DPFC), disminuyendo al aumentar la relación de compresión (RC). Esto, aunado a la influencia de la temperatura del aire de admisión (T_{adm}), la mezcla gasolina-*HHO* (GHHO) mostró que la combustión ocurre de forma más rápida que la de la gasolina (G100), impactando también sobre la intensidad de knock (KI) presentada durante los experimentos. De igual manera, la T_{adm} propicia las condiciones para la disminución de algunos componentes de emisiones de escape. Por lo tanto, la hipótesis planteada en la investigación es verificada.

En las siguientes secciones se plantean las conclusiones obtenidas para cada uno de los parámetros de la combustión estudiados.

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA.

En esta sección se presentan las conclusiones obtenidas de la caracterización de la celda utilizada con respecto a lo calculado con las leyes de Faraday y a lo registrado por el sensor Alicat.

- La celda utilizada otorga una producción acorde al cálculo teórico de Faraday, habiendo hasta un 0.922 % de diferencia entre lo medido y lo calculado.
- Tras un periodo de inactividad de la celda superior a 3 días, es importante recircular el electrolito en el sistema de producción de *HHO* y designar al menos 15 minutos de estabilización del flujo posterior al encender la celda electrolítica.
- La temperatura del gas incrementa con el tiempo de operación de la celda, indicando que esta última también incrementa su temperatura. De acuerdo

con lo consultado en la literatura [89], al incrementar la temperatura de la celda, también se incrementa la cantidad de corriente consumida; ante esto se vuelve necesario desarrollar un sistema de refrigeración para la celda si se pretende usar durante un tiempo prolongado.

5.2 PRESIÓN EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

A continuación se presentan las conclusiones del valor de presión máxima en la cámara de combustión.

- El valor de la presión máxima promedio registrada en cámara se ve afectado principalmente por la RC a la que opera el motor y la T_{adm} . A su vez, el uso del *HHO* también influye en dicha magnitud, mostrando un valor superior al de la G100 cuando el aire es precalentado a $68\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- El uso del *HHO* provoca un incremento en la presión de hasta un 2.95% con respecto a la G100 para una $T_{adm}=68\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una RC de 7.36, mientras que para los ensayos de $38\text{ }^{\circ}\text{C}$, no hubo algún cambio significativo.
- El GHHO muestra poca variación entre ciclos de combustión con respecto a la G100 en diferentes RC. Indicando una DPFC menor, y por lo tanto, una combustión más rápida.

5.3 DURACIÓN DE LA PRIMERA FASE DE LA COMBUSTIÓN.

Con respecto a la velocidad de desarrollo de la primera fase de la combustión, se concluye lo siguiente.

- Una vez más, la RC del motor tiene un gran efecto sobre la DPFC. Cuanto más aumenta la RC, la velocidad de la primera fase de combustión también aumenta, reduciendo el tiempo en ángulo de cigüeñal (CA) que le toma a la PFC desarrollarse, esto es válido para los 2 combustibles estudiados.
- El uso del *HHO* en la gasolina, provoca una disminución en la DPFC de hasta un 60.57% en comparación con la G100 para los ensayos de $T_{adm}=68^{\circ}C$. Por su parte, para los ensayos de $T_{adm}=38^{\circ}C$, se aprecia una relación directa entre la DPFC y RC para el GHHO. No obstante, para la G100 no se identificó algún patrón que relacione las variables anteriores.
- La T_{adm} influye en la DPFC, debido a que relaciona directamente la estequiometría de la mezcla en cámara, y por ende cambiando las condiciones en que se desarrolla la combustión.
- La reducción de la DPFC trae consigo un incremento en la KI. Dado que una combustión más rápida implica una mayor presión y temperatura, la probabilidad de aparición de knock (KP) aumenta, registrando presiones superiores a 50 *kPa*.

5.4 PRESENCIA E INTENSIDAD DEL KNOCK.

Las conclusiones con respecto al comportamiento de la KP y la KI con la variación de la RC del motor y la adición del HHO son las siguientes.

- En primer lugar, la RC es el parámetro que más influye en la KP y KI. Al aumentar la RC, incrementa la presión dentro de la cámara, dando lugar al aumento de la KI y la frecuencia de aparición del knock entre los ciclos de combustión.

- Tanto el GHHO como la G100, para RC superiores a 7.5 presentaron una KI superior a 50 *kPa*, así como una frecuencia de aparición en los ciclos de combustión superior al 80 %.
- Para los ensayos de 68 °C, el HHO como aditivo llegó a presentar una mayor KI en comparación con la combustión de la G100. Por su parte, en los ensayos de 38 °C, el GHHO mostró un comportamiento similar al de la G100 para las RC de 7.36 y 7.86. Sin embargo, esto parece mejorar ligeramente en la RC de 8.45, donde el GHHO disminuyó en un 6.18 % la KI con respecto a la G100.
- El GHHO presentó una KP superior al de la G100, alcanzando diferencias de hasta el 31.1 % y 35.57 % para las temperaturas de 38 °C y 68 °C, respectivamente.
- Para los ensayos de 68 °C, se observó una mayor KP para el GHHO en todas las RC estudiadas. Este comportamiento se relaciona directamente con la disminución de la DPFC, favoreciendo el aumento de la temperatura del cilindro y la generación de knock.

5.5 GASES DE ESCAPE.

A continuación se muestran las conclusiones correspondientes al comportamiento observado en los niveles de los gases de escape.

- Para iniciar se concluye con lo observado en los porcentajes del λ , lo cual muestra el funcionamiento correcto del banco de pruebas y la mezcla estequiométrica. Donde la estabilización de la estequiometría en un valor de 1 con un rango de ± 0.05 otorga la certeza sobre los registros de las emisiones estudiadas.

- Otro valor a tomar en cuenta es el porcentaje de O_2 , el cual relaciona cómo ocurre la combustión en cámara. Los ensayos con $T_{adm}=38^\circ C$ no mostraron cambios al incrementar las RC, esto se relaciona con la densidad del aire y una combustión más completa. Sin embargo, la afirmación anterior no es válida para los ensayos con $T_{adm}=68^\circ C$, donde los niveles de O_2 comienzan a ser menores con el aumento de la RC. Siendo la RC de 8.45, en la que el GHHO muestra una disminución del 51.44% en la concentración de O_2 con respecto a lo registrado para la G100.
- Relacionando el comportamiento del O_2 con los niveles de CO , en los ensayos de $38^\circ C$ el CO mantuvo una tendencia descendente con el aumento de las RC, siendo la RC de 8.45 en la que se registraron las menores concentraciones de CO . Por el contrario, en los ensayos de $68^\circ C$, la tendencia fue ascendente conforme aumentaba la RC, siendo la RC de 8.45 en la que se registraron los valores más altos de concentración de CO , diferenciándose de la G100 hasta un 91.16%.
- De acuerdo con lo consultado en la literatura, las concentraciones de CO y O_2 se ven impactadas por el λ . Dado que se buscó mantener la estequiometría en la combustión, la cantidad de oxígeno no fue suficiente para oxidar el CO y transformarlo en CO_2 , por lo cual no se tuvo una buena combustión [82].
- El nivel de CO_2 no se ve afectado por la adición del HHO a la gasolina. De acuerdo con los resultados analizados y a lo consultado en la literatura, los MEP usualmente emiten concentraciones de CO_2 de aproximadamente el 13%. Por lo cual, no se encontró una relación entre la RC, la T_{adm} y la adición del HHO en las condiciones de operación del presente trabajo.
- En el caso de las emisiones de NOx , en los ensayos de $38^\circ C$ se presentó una tendencia ascendente con el aumento de la RC; por el contrario, cuando la temperatura del aire de admisión aumentó a $68^\circ C$, los NOx mostraron una tendencia descendente.

- El GHHO mostró un incremento de NOx de al menos 4.33 % a 4.6 % para la RC de 7.36 a una temperatura de 38 °C y de 68 °C, respectivamente. Por otra parte, el NOx incrementó un 18.13 % para la RC de 8.45 en la temperatura de 38 °C, mientras que para los ensayos de 68 °C, el NOx disminuyó en un 24.87 % con respecto a lo registrado por la gasolina.
- Los resultados obtenidos concuerdan con lo registrado en la literatura [88], donde el incremento del NOx se debe al aumento de la temperatura en la cámara de combustión. Siendo el HHO el que beneficia la velocidad de propagación de la flama y el incremento de la temperatura. Por otra parte, también se comprueba la disminución del NOx debido al valor del λ , el cual afecta la concentración de oxígeno en la mezcla, así como la temperatura de la cámara.
- Los resultados muestran que, en los ensayos de 38 °C, el GHHO incrementó el HC en un 12.14 % para la RC de 7.36, mientras que en la RC de 8.45 los HC descendieron en un 12.30 %. Por su parte, en los ensayos de 68 °C, el GHHO mostró una disminución del 11.93 % en el HC para la RC de 7.36, mientras que para la RC de 8.45 aumentó la concentración de HC hasta un 9.18 %.
- La temperatura del aire de admisión impactó positivamente en la concentración del PM . Dado que al elevar la temperatura de 38 °C a 68 °C, se redujo la concentración de PM hasta un 99.57 %.
- De acuerdo con lo consultado en la literatura [81], la reducción en la inyección de combustible cuando se aumenta la temperatura de admisión evita la alta concentración de PM .
- La concentración del PM disminuyó con el HHO en las condiciones de temperatura de admisión de 68 °C a una RC de 8.45, llegando a disminuir hasta un 89.17 % con respecto a la G100.

Acorde a lo expuesto en las subsecciones anteriores, el HHO mostró mejores beneficios a altas temperaturas y presiones, los cuales; aunado al comportamiento

con respecto al KI y KP, sugieren que el *HHO* es un combustible adecuado para aplicaciones en las que la resistencia a la autoignición no influye sobre el proceso de combustión.

5.6 TRABAJOS FUTUROS.

Considerando la capacidad y funcionalidad de la instalación experimental al finalizar el presente trabajo, se identifican diferentes oportunidades para continuar la línea de investigación del *HHO* como aditivo del combustible en motores de combustión interna. A continuación se exponen los trabajos futuros propuestos para continuar con este trabajo de investigación:

- **Estudio del uso del *HHO* en un vehículo particular en un circuito de baja velocidad.** Es importante estudiar el comportamiento de las emisiones usando el *HHO* en un motor con carga, adicionalmente se estudiará el consumo de combustible y la facilidad de instalación de un sistema de producción de *HHO* en un vehículo.
- **Diseño y desarrollo de una celda electrolítica para un motor monocilindrico tipo CFR.** De acuerdo con lo observado, la celda utilizada puede ser mejorada y optimizada para mantener un flujo de *HHO* adecuado para el motor CFR, se recomienda definir adecuadamente el material utilizado para los electrodos, el área que entra en contacto con el electrolito, la distancia de separación entre los electrodos, la concentración del electrolito, y finalmente instalar una fuente de voltaje que permita aumentar y disminuir el suministro de corriente que pase por la celda.
- **Estudio de las condiciones termodinámicas de la combustión de mezclas de gasolina-*HHO*.** En el presente trabajo se estudió la adición del *HHO* bajo las condiciones de las normas ASTM-D2699 y ASTM-D2700. Sin embargo, se propone estudiar el efecto del ajuste del ángulo de chispa con diferentes

concentraciones de HHO , de igual forma el estudio del A/F que podría existir entre un combustible líquido y un combustible gaseoso.

- **Estudio del efecto del HHO como aditivo en un motor diésel sobre las emisiones contaminantes.** Diversos estudios han determinado el funcionamiento del HHO en los motores de gasolina, así como en los motores diésel. Sin embargo, el estudio del efecto de la combinación de sistemas EGR y combustión de HHO con diésel en los gases de escape aún es limitado.
- **Estudio del HHO como aditivo en un motor CFR sobre las emisiones.** De acuerdo a lo observado en el presente trabajo de investigación, se sugiere realizar pruebas experimentales de la combustión de gasolina- HHO , con las RC de 7.36, 7.86, 8.45 y 9.15, esto con la finalidad de obtener mayor certeza sobre el impacto del HHO en las emisiones de escape. Adicionalmente, se recomienda el estudio del comportamiento de la combustión considerando el valor λ en condición estequiométrica de gasolina, condición estequiométrica de gasolina- HHO , y condición pobre.

APÉNDICE A

RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA DE HHO.

A.1 RESULTADOS TEÓRICOS DE LA PRODUCCIÓN DE HHO.

A continuación se presentan los datos utilizados para calcular el caudal teórico de HHO a partir de la ecuación de Faraday, la cual fue resuelta en función de la cantidad de corriente suministrada, el tiempo transcurrido, la masa atómica y el número de valencia de los elementos que componen el HHO.

CÁLCULO DE LA CANTIDAD TEÓRICA DE LA PRODUCCIÓN DE HHO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE

FÓRMULAS

$$m = \frac{I \times t \times M}{F \times v_n} \quad V = \frac{m}{\rho}$$

DATOS DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

NÚMERO DE PLACAS		
POSITIVAS	NEGATIVAS	NEUTRAS
1	2	7
TOTAL DE ELECTRODOS		
ÁNODOS	CÁTODOS	
4.5	5.5	

DATOS PARA CUMPLIR CON LA PRIMERA LEY DE FARADAY

CONSTANTE DE FARADAY (F) [C/mol]
96485.4
CANTIDAD DE CORRIENTE (I) [A]
8.95
CANTIDAD DE TIEMPO TRANSCURRIDO (t) [s]
60

DATOS DE LOS ELEMENTOS

MASA ATÓMICA DEL ELEMENTO (M) [g/mol]	
H2	O2
1.008	16.00
NÚMERO DE VALENCIA DEL ELEMENTO (v _n)	
H2	O2
1	2
DENSIDAD DEL ELEMENTO (ρ) [kg/m ³]	
H2	O2
0.09	1.43

CÁLCULO DE LA MASA (m) [g]	
H2	O2
0.005609967	0.044523201
CÁLCULO DEL VOLUMEN [m ³]	
H2	O2
6.2333E-05	3.11569E-05
62.33296437	31.15689394

CÁLCULO DEL VOLUMEN [cm ³]	
H2	O2
342.831304	140.2060227

CAUDAL TOTAL TEÓRICO DE HHO	
483.03733	[cm ³ /min]
8.0506221	[ml/s]
28.98224	[l/hr]
0.48303733	[l/min]

A.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA PRODUCCIÓN DE HHO.

En el presente apéndice se muestran la media aritmética, media armónica y desviación estándar de los datos registrados por el sensor Alicat durante la experimentación. Las variables monitorizadas por el sensor son el flujo volumétrico en *ml/min*, la temperatura de salida del HHO en $^{\circ}C$ y la presión absoluta de salida del HHO en *PSI*.

TABLA A.1: Valores estadísticos de la producción de HHO

Método	μ	H	σ
Experimental	[ml/min]	[ml/min]	
Sensor Alicat	485.829	478.583	36.428

TABLA A.2: Valores estadísticos de temperatura y presión registrada por el sensor

Variable	μ	H	σ
T [$^{\circ}C$]	32.284	32.231	0.726
Presión _{abs} [PSI]	13.731	13.729	0.121

APÉNDICE B

GRÁFICAS DE PRESIÓN.

B.1 CURVAS DE PRESIÓN EN CÁMARA.

En este apéndice se presentan las curvas de presión de cada combustible para las relaciones de compresión de 7.86 y 8.45 evaluadas en las temperaturas de 38 °C y 68 °C.

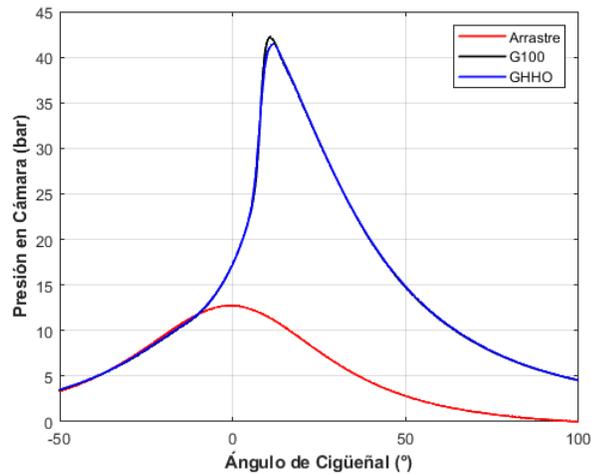


FIGURA B.1: Curvas de presión de cada combustible a $RC=7.86$ y $T_{adm}=38^{\circ}C$

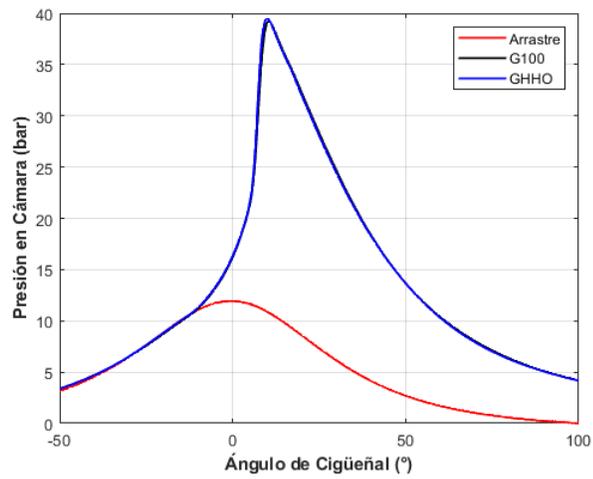


FIGURA B.2: Curvas de presión de cada combustible a $RC=7.86$ y $T_{adm}=68^{\circ}C$

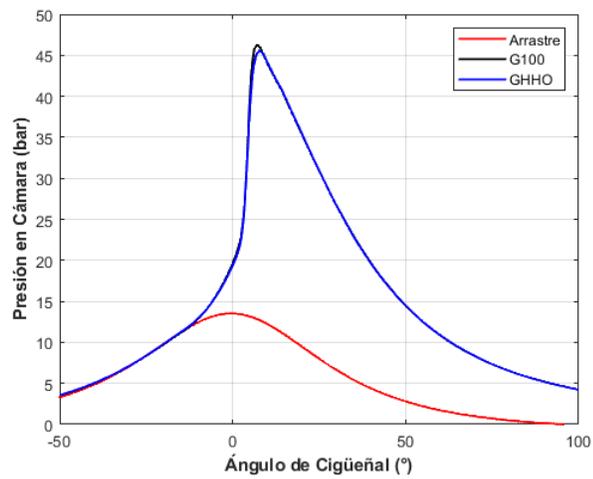


FIGURA B.3: Curvas de presión de cada combustible a $RC=8.45$ y $T_{adm}=38^{\circ}C$

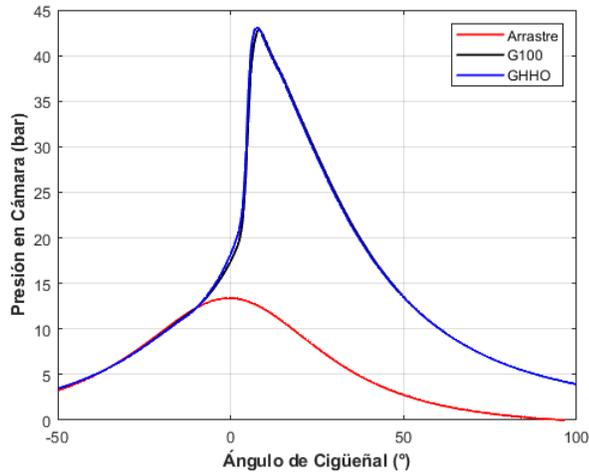


FIGURA B.4: Curvas de presión de cada combustible a $RC=8.45$ y $T_{adm}=68^{\circ}C$

B.2 GRÁFICAS DE PRESIÓN MÁXIMA EN CÁMARA.

A continuación se muestran las gráficas de presión máxima en cámara registrada en los 306 ciclos de combustión capturados. En los gráficos se indica el punto máximo registrado para cada combustible para cada relación de compresión evaluadas en las temperaturas de $38^{\circ}C$ y $68^{\circ}C$.

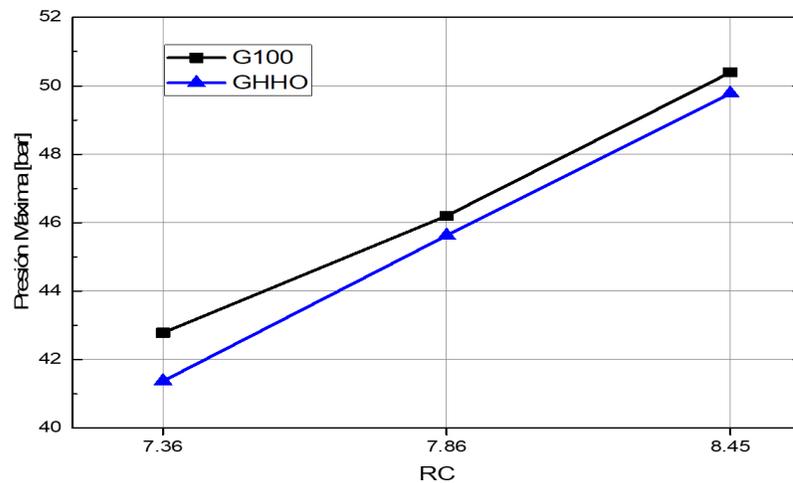


FIGURA B.5: Presión máxima en cámara; $T_{adm}=38^{\circ}C$

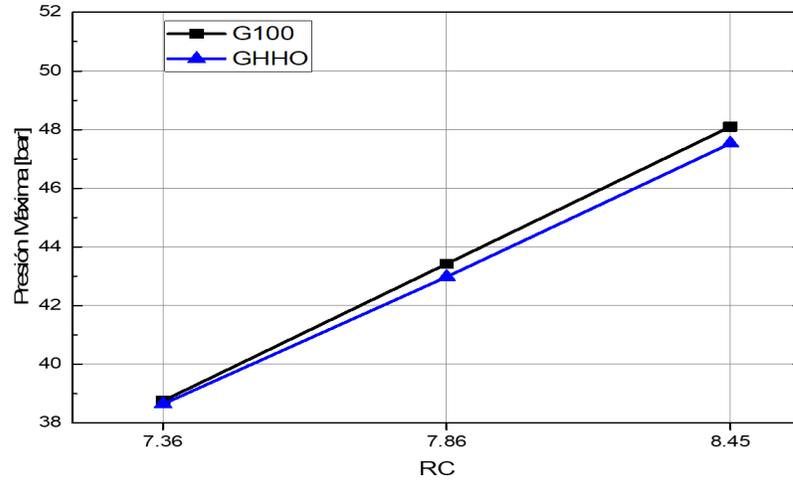


FIGURA B.6: Presión máxima en cámara; $T_{adm}=68^{\circ}\text{C}$

B.3 GRÁFICAS DE INTENSIDAD DE AUTOIGNICIÓN MÁXIMA.

En el siguiente apéndice se muestran las gráficas de intensidad de autoignición máxima registrada en los 306 ciclos de combustión capturados. En cada gráfica se indica el punto máximo registrado por cada combustible para cada relación de compresión evaluadas en las temperaturas de 38°C y 68°C .

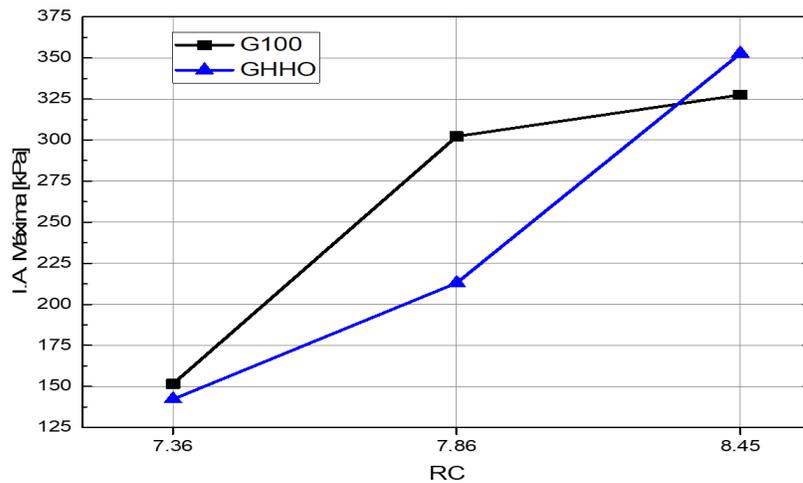


FIGURA B.7: Intensidad de autoignición máxima en cámara; $T_{adm}=38^{\circ}\text{C}$

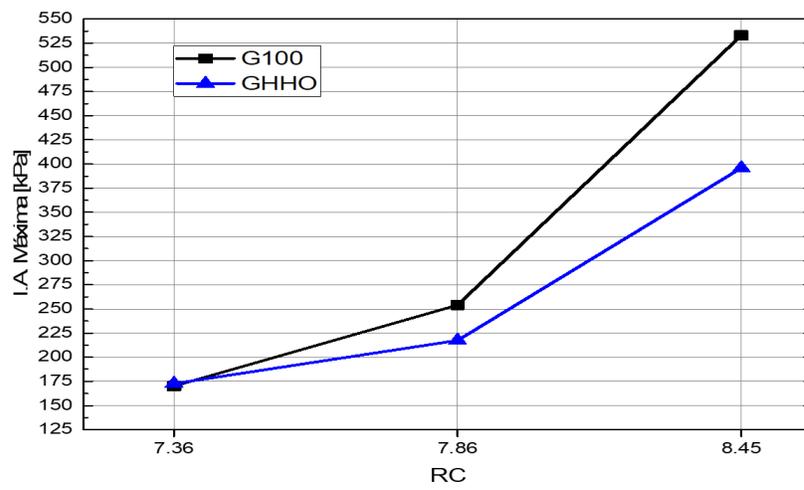


FIGURA B.8: Intensidad de autoignición máxima en cámara; $T_{adm}=68^{\circ}\text{C}$

APÉNDICE C

TABLAS DE RESULTADOS NUMÉRICOS.

C.1 VALORES DE PRESIÓN EN CÁMARA.

En el presente apéndice se muestran las tablas con los resultados numéricos de la presión en cámara para cada combustible y cada temperatura.

TABLA C.1: Valores de presión para G100 a 38°C

RC	P. Máx. Promedio [bar]	DPFC Promedio [CA]	I. A. Promedio [kPa]	Freq. A. [%]	P. Máx. [bar]	I. A. Máx. [kPa]
7.36	40.229	5.356	43.530	29.412	42.781	151.543
7.86	43.574	5.625	86.303	81.046	46.201	302.246
8.45	48.162	2.919	139.213	99.020	50.391	327.504

TABLA C.2: Valores de presión para G100 a 68°C

RC	P. Máx. Promedio [bar]	DPFC Promedio [CA]	I. A. Promedio [kPa]	Freq. A. [%]	P. Máx. [bar]	I. A. Máx. [kPa]
7.36	36.044	4.817	40.910	27.451	38.752	170.171
7.86	40.758	3.092	87.980	83.660	43.424	254.029
8.45	45.055	2.929	138.610	98.693	48.100	533.121

TABLA C.3: Valores de presión para GHHO a 38°C

RC	P. Máx. Promedio [bar]	DPFC Promedio [CA]	I. A. Promedio [kPa]	Freq. A. [%]	P. Máx. [bar]	I. A. Máx. [kPa]
7.36	39.804	6.550	47.917	38.562	41.372	142.246
7.86	43.603	5.176	84.834	80.392	45.623	212.984
8.45	47.858	3.404	130.613	98.039	49.775	352.699

TABLA C.4: Valores de presión para GHHO a 68°C

RC	P. Máx. Promedio [bar]	DPFC Promedio [CA]	I. A. Promedio [kPa]	Freq. A. [%]	P. Máx. [bar]	I. A. Máx. [kPa]
7.36	37.108	4.840	46.736	37.255	38.642	172.662
7.86	40.912	2.671	91.424	86.928	42.979	217.463
8.45	45.042	1.774	150.178	99.673	47.526	395.891

C.2 VALORES DE LAS EMISIONES DE ESCAPE.

A continuación se muestran las tablas con los resultados numéricos de las emisiones de escape para cada combustible y cada temperatura.

TABLA C.5: Medias armónicas de λ para las mezclas usadas

T_{adm} [°C]	RC	G100	GHHO	Unidades
38	7.36	1.00	0.966	
	7.86	0.98	0.980	
	8.45	1.02	0.988	
68	7.36	1.02	0.972	
	7.86	0.98	0.984	
	8.45	0.98	0.989	

TABLA C.6: Medias armónicas de PM para las mezclas usadas

T_{adm} [°C]	RC	G100	GHHO	Unidades
38	7.36	339.33	41.492	mg/m ³
	7.86	54.95	41.469	
	8.45	23.32	69.757	
68	7.36	14.87	6.753	mg/m ³
	7.86	59.06	8.814	
	8.45	41.93	35.845	

TABLA C.7: Medias armónicas de CO para las mezclas usadas

T_{adm} [°C]	RC	G100	GHHO	Unidades
38	7.36	1.03	1.831	%
	7.86	1.28	1.348	
	8.45	0.67	1.013	
68	7.36	0.96	1.546	%
	7.86	1.34	1.188	
	8.45	1.37	1.068	

TABLA C.8: Medias armónicas de CO_2 para las mezclas usadas

T_{adm} [°C]	RC	G100	GHHO	Unidades
38	7.36	13.28	12.889	%
	7.86	12.96	12.995	
	8.45	12.98	13.084	
68	7.36	12.87	13.161	%
	7.86	12.94	13.182	
	8.45	12.89	13.194	

TABLA C.9: Medias armónicas de O_2 para las mezclas usadas

T_{adm} [°C]	RC	G100	GHHO	Unidades
38	7.36	0.80	0.594	%
	7.86	0.58	0.588	
	8.45	0.98	0.569	
68	7.36	1.05	0.562	%
	7.86	0.63	0.596	
	8.45	0.55	0.603	

TABLA C.10: Medias armónicas de HC para las mezclas usadas

T_{adm} [°C]	RC	G100	GHHO	Unidades
38	7.36	175.69	210.995	ppm
	7.86	211.47	209.085	
	8.45	220.24	229.702	
68	7.36	162.29	225.271	ppm
	7.86	222.99	215.320	
	8.45	234.65	224.883	

TABLA C.11: Medias armónicas de NOx para las mezclas usadas

T_{adm} [°C]	RC	G100	GHHO	Unidades
38	7.36	3542.02	3207.031	ppm
	7.86	3366.56	3622.332	
	8.45	4727.74	4105.772	
68	7.36	4322.37	3560.153	ppm
	7.86	3888.89	3893.368	
	8.45	3682.33	3879.742	

BIBLIOGRAFÍA

- [1] OMS. 7 millones de muertes cada año debidas a la contaminación atmosférica. Recurso libre, disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution>, 2014.
- [2] Coalition for Urban Transitions. Climate emergency, urban opportunity. Recurso libre, disponible en: <https://urbantransitions.global/en/publication/climate-emergency-urban-opportunity/>, 2019.
- [3] SEMARNAT. Fuentes de contaminación atmosférica. Recurso libre, disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica>, 2018.
- [4] SEMARNAT. Qué son los contaminantes climáticos de vida corta. Recurso libre, disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/que-son-los-contaminantes-climaticos-de-vida-corta?idiom=es>, 2018.
- [5] SEMARNAT. Inventario nacional de emisiones de contaminantes criterio inem. Recurso libre, disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>, 2019.
- [6] INECC. México: Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. Recurso libre, disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/737226/156_2022_INEGY-CEI_1990-2019_NIR.pdf, 2019.

-
- [7] Wei Z.; Goehring T.; Mioduszewski M.; Luo L.; Kotrba A.; Rybarz M.; Ellinghaus K. y Pieszkalla M. Chapter 18 - failure mechanisms and modes analysis of vehicle exhaust components and systems. In Abdel Salam Hamdy Makhlouf and Mahmood Aliofkhazraei, editors, *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries*, pages 393–432. Butterworth-Heinemann, 2016.
- [8] Goñi Delión J. C. y Rojas Delgado M. Combustibles alternativos en motores de combustión interna. *Ingeniería Industrial*, 1(32):199–229, 2014.
- [9] Montes de Correa C. y Hernández-Saldarriaga G. Combustibles alternativos. *Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia*, 1(17):67–77, 1998.
- [10] US EPA. Combustibles alternativos. Recurso libre, disponible en: <https://fueleconomy.gov/feg/escurrent.shtml>, 2020.
- [11] SENER. Sistema de Información Energética. Parque vehicular por tipo de combustible, 2018-2032, 2023.
- [12] SENER. Sistema de Información Energética. Demanda de combustibles en el sector transporte, 2018-2032, 2023.
- [13] Naciones Unidas. Acuerdo de París. Recurso libre, disponible en: https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf, 2015.
- [14] PricewaterhouseCoopers. Net zero economy index 2022. Recurso libre, disponible en: <https://www.pwc.es/es/publicaciones/sostenibilidad/net-zero-economy-index-2022.pdf>, 2022.
- [15] Diario Oficial de la Federación. Nom-016-cre-2016, especificaciones de calidad de los petrolíferos, 2016.
- [16] Diario Oficial de la Federación. Nom-042-semarnat-2003, que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o no metano,

- monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3 857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diésel, así como de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos, 2003.
- [17] Diario Oficial de la Unión Europea. Euro 6, 2007.
- [18] Sánchez Jalet J. C. Utilización del oxihidrógeno como aditivo para incrementar el desempeño de un motor de combustión interna. Recurso libre, disponible en: <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2017/05/Tesis-JuanCarlosSanchez.pdf>, 2016.
- [19] US EPA. Hidrógeno. Recurso libre, disponible en: <https://fueleconomy.gov/feg/eshydrogen.shtml>, 2020.
- [20] Teed P. L. *The Chemistry and Manufacture of Hydrogen*. New York, Longmans, Green and Co.; London, Arnold, 1919.
- [21] Al-Rousan A. A. Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing hho gas into intake manifold. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(23):12930–12935, 2010.
- [22] Arjun T. B.; Atul K. P.; Muraleedharan A. P.; Walton P. A.; Bijinraj P. B. y Raj A. A. A review on análisis of hho gas in ic engines. *Materials Today: Proceedings*, 11:1117–1129, 2019.
- [23] EL-Kassaby M. M.; Eldrainy Y. A.; Khidr M. E. y Khidr K. I. Effect of hydroxy (hho) gas addition on gasoline engine performance and emissions. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1):243–251, 2016.
- [24] Musmar S. A. y Al-Rousan A. A. Effect of hho gas on combustion emissions in gasoline engines. *Fuel*, 90(10):3066–3070, 2011.
- [25] Organización Internacional del Trabajo; Organización Mundial de la Salud; Comisión Europea. Ipsc 001 - hidrógeno, 2018.

- [26] Pacific Northwest National Laboratory. Comparative properties of hydrogen and other fuels. Recurso libre, disponible en: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/comparative-properties-hydrogen-and-other-fuels>, 2001.
- [27] The Engineering Toolbox. Fuels - higher and lower calorific values. Recurso libre, disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html, 2003.
- [28] World Nuclear Association. Heat values of various fuels. Recurso libre, disponible en: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>, 2016.
- [29] Paparao J. y Murugan S. Oxy-hydrogen gas as an alternative fuel for heat and power generation applications - a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(76):37705–37735, 2021.
- [30] González Gil J. E.; Díaz Rey A. O. y González-Estrada O. A. Análisis de un generador de hho de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1):143–154, 2018.
- [31] Beccari S.; Pipitone E. y Caltabellotta S. Analysis of the combustion process in a hydrogen-fueled cfr engine. *Energies*, 16(5):2351, 2023.
- [32] Shivaprasad K. V.; Chitragar P. R. y Kumar G. N. Experimental investigation of variations in spark timing using a spark-ignition engine with hydrogen-blended gasoline. *Energy Technology*, 3(12):1174–1182, 2015.
- [33] Juma Yar D. A. y Martínez Anangonó H. W. Diseño e instalación de un sistema de alimentación gasolina-hho en el motor de combustión interna del vehículo monoplace tipo buggy del laboratorio de mecánica de patio de la espe extensión latacunga. *Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería Automotriz*, 2015.

- [34] Sharma D.; Pathak D. K. y Chhikara K. Performance analysis of a four stroke multi-cylinder spark ignition engine powered by a hydroxy gas booster. *Journal of Aeronautical and Automotive Engineering (JAAE)*, 2(1):11–15, 2015.
- [35] Wang L.; Hong C.; Li X.; Yang Z.; Guo S. y Li Q. Review on blended hydrogen-fuel internal combustion engines: A case study for china. *Energy Reports*, 8:6480–6498, 2022.
- [36] Tamayo E.; Rosales C.; Guzmán A. y Pazmiño P. Efecto del uso de hidrógeno en la potencia y rendimiento de un motor de combustión interna. *Enfoque UTE*, 7(4):43–53, 2016.
- [37] Zhao Z.; Huang Y.; Yu X.; Sun P.; Li M.; Shi W.; Guo Z. y Wang T. Effect of hho addition on combustion and emission in si engine with butanol direct injection and gasoline port injection. *Case Studies in Thermal Engineering*, 42:102746, 2023.
- [38] Alm ElDin Mohamad H.; Abd elhamid E.; Elkelawy M. y Hendawi O. Experimental investigation on the effect of using oxy-hydrogen gas on spark ignition engines performances, and emissions characteristic. *Journal of Engineering Research*, 7(1):32–41, 2023.
- [39] Kandah M. I. Enhancement of water electrolyzer efficiency. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 4(11), 2014.
- [40] Salek F.; Zamen M. y Hosseini S. V. Experimental study, energy assessment and improvement of hydroxy generator coupled with a gasoline engine. *Energy Reports*, 6:146–156, 2020.
- [41] El Kady M. A.; El Fatih Farrag A.; Gad M. S.; El Soly A. K. y Abu Hashish H. M. Parametric study and experimental investigation of hydroxy (hho) production using dry cell. *Fuel*, 282:118825, 2020.
- [42] Rosero M.; González H.; Ochoa P.; Díaz M.; Jiménez E.; Castillo C.; Chulde D.

- y Stahl U. Producción de oxihidrógeno como alternativa energética. *Revista Perspectivas*, 3(2):62–67, 2021.
- [43] Juárez Sandoval A.; Cruz Gómez M. A.; Juárez Zerón T. A. y Ochoa Barragán J. F. Caracterización de celda para producción de hidrógeno con fin de generar combustible alternativo para motores de combustión interna. *Revista de Energías Renovables*, 2(6):26–32, 2018.
- [44] Essuman S.P.K.; Nyamful A.; Agbodemegbe V. y Debrah S.K. Experimental studies of the effect of electrolyte strength, voltage and time on the production of brown's (hho) gas using oxyhydrogen generator. *Open Journal of Energy Efficiency*, 8(2):64–80, 2019.
- [45] Pulkrabek W.W. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Pearson Education, Limited, 2004.
- [46] Heywood J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 1988.
- [47] Breeze P. *Piston Engine-Based Power Plants. Spark Ignition Engines*. Elsevier Ltd, 2018.
- [48] Payri González F.; Desantes Fernández JM. *Motores de combustión interna alternativos*. Editorial Universitat Politècnica de València, 2011.
- [49] Rubio Gómez G. Estudio de la combustión de mezclas de gasolina-bioalcohol en un motor de compresión variable cfr, 2018.
- [50] Wheeler R. W. *Abnormal Combustion Effects on Economy*. Springer, G. S. (eds) Fuel Economy, 1984.
- [51] Lounichi M.S; Bennellil M.A.; Loubar K.; Niculescu D.C. y Tazerout M. Knock characterization and development of a new knock indicator for dual-fuel engines. *Energy*, 141:2351–2361, 2017.

- [52] Shun G.; Pan J. y Wei H. Analysis of onset and severity of knock in si engine based on in-cylinder pressure oscillations. *Applied Thermal Engineering*, 51:1297–1306, 2013.
- [53] Brunt M.; Pond C. y Biundo J. Gasoline engine knock analysis using cylinder pressure data. *SAE Technical Paper 980896*, 1998.
- [54] Shi H.; Uddeen K.; An Y.; Pei Y. y Johansson B. Statistical study on engine knock oscillation and heat release using multiple spark plugs and pressure sensors. *Fuel*, 297, 2021.
- [55] Aranque J.; Martín M. y Fygueroa S. Estudio de la combustión en un motor de gasolina. *Ciencia e Ingeniería*, 27(3):119–127, 2006.
- [56] Song Z.; Zhang X.; Wang Y. y Hu Z. Evaluation mass fraction burned obtained from the ion current signal fuelled with hydrogen/carbon dioxide and natural gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44:25257–25264, 2019.
- [57] Waukesha Engine. An international historic mechanical engineering landmark: The waukesha cfr fuel research engine. Recurso libre, disponible en: <https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/aboutasme/who%20we%20are/engineering-cooperative-fuel-research-engine-1928.pdf>, 1980.
- [58] Mun Foong T. On the autoignition of ethanol/gasoline blends in spark-ignition engines, 2013.
- [59] Reif K. *Gasoline Engine Management*. Springer Vieweg Wiesbaden, 2014.
- [60] ASTM International. Astm d-2699: Standard test method for research octane number of spark-ignition engine fuel, 2023.
- [61] ASTM International. Astm d-2700: Standard test method for research octane number of spark-ignition engine fuel, 2023.

- [62] Cheng W. K.; Hamrin D.; Heywood J. B.; Hochgreb S.; Min K. y Norris M. An overview of hydrocarbon emissions mechanisms in spark-ignition engines. *SAE Technical Paper 932708*, 1993.
- [63] Alagumalai A.; Jodat A.; Mahian O. y Ashok B. Chapter 2 - nox formation chemical kinetics in ic engines. In B. Ashok, editor, *NOx Emission Control Technologies in Stationary and Automotive Internal Combustion Engines*, pages 39–68. Elsevier, 2022.
- [64] The Engineering Toolbox. Adiabatic flame temperatures. Recurso libre, disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/adiabatic-flame-temperature-d_996.html, 2005.
- [65] Butt O. M.; Ahmad M. S.; Che H. S. y Rahim N. A. Usage of on-demand oxyhydrogen gas as clean/renewable fuel for combustion applications: a review. *International Journal of Green Energy*, 18(13):1405–1429, 2021.
- [66] Sazali N. Emerging technologies by hydrogen: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45:18753–18771, 2020.
- [67] Purayil S.T.P.; Hamdan M. O.; Al-Omari S.A.B.; Selim M.Y.E.; Elnajjar E. Review of hydrogen–gasoline si dual fuel engines: Engine performance and emission. *Energy Reports*, 9:4547–4573, 2023.
- [68] Al-Baghdadi M. A. R. S. A study on the hydrogen-ethyl alcohol dual fuel spark ignition engine. *Energy Conversion and Management*, 43(2):199–204, 2002.
- [69] Huang Y.; Surawski N. C.; Zhuang Y.; Zhou J. L. y Hong G. Dual injection: An effective and efficient technology to use renewable fuels in spark ignition engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 2021.
- [70] Lee Z.; Kim T.; Park S. y Park S. Review on spray, combustion, and emission characteristics of recent developed direct-injection spark ignition (disi) engine system with multi-hole type injector. *Fuel*, 259, 2020.

- [71] Petróleos Mexicanos. Hds-pemex-tri-sac-7, 2015.
- [72] Poursadegh F.; Brear M.; Hayward B. y Yang Y. Autoignition, knock, detonation and the octane rating of hydrogen. *Fuel*, 332:126201, 2023.
- [73] Wade L. *Química Orgánica. Volumen 1*. PEARSON EDUCATION, 2011.
- [74] College of the Desert. Hydrogen use in internal combustion engines. en hydrogen fuel cell engines and related technologies, 2001.
- [75] Gómez-Gordo Villa P. Desarrollo de un sistema de control automático aplicado a un motor cfr para el estudio físico-químico de la combustión, 2017.
- [76] Rivera Flores E.U. Evaluación de la auto-ignición de mezclas gasolina-etanol-metanol en un motor cfr de compresión variable, 2020.
- [77] Salas Montaña F.J. Caracterización experimental de la emisión del númeo de nanopartículas durante el proceso de combustión mep con gasolinas mexicanas, alcoholes puros y mezclas oxigenadas, 2023.
- [78] Gummer J. y Hawksworth S. Spontaneous ignition of hydrogen. literature review, 2008.
- [79] Pavlos G. Aleiferis and Martino F. Rosati. Controlled autoignition of hydrogen in a direct-injection optical engine. *Combustion and Flame*, 159(7):2500–2515, 2012.
- [80] Kayes D. y Hochgreb S. Mechanisms of particulate matter formation in spark-ignition engines. *Environmental Science and Technology*, 33:3957–3967, 1999.
- [81] Singh E.; Kim N.; Vuilleumier D.; Skeen S.; Cenker E.; Sjöberg M.; Pickett L. Particulate matter emissions in gasoline direct-injection spark-ignition engines: Sources, fuel dependency, and quantities. *Fuel*, 338:127198, 2023.
- [82] Zhao Z.; Huang Y.; Yu X.; Guo Z.; Li M. y Wang T. Effect of brown gas (hho) addition on combustion and emission in gasoline engine with exhaust gas

- recirculation (egr) and gasoline direct injection. *Journal of Cleaner Production*, 360:132078, 2022.
- [83] Wua C. W.; Chenb R. H.; YungPua J. y Lin T. H. The influence of air–fuel ratio on engine performance and pollutant emission of an si engine using ethanol–gasoline-blended fuels. *Atmospheric Environment*, 38:7093–7100, 2004.
- [84] AUDI. Self-study programme 230: Motor vehicle exhaust emissions, 2000.
- [85] Farag M. S. Experimental investigation for improving performance and emissions of gasoline engine by adding hho gas. *Port-Said Engineering Research Journal*, 27(1):79–86, 2023.
- [86] Usman M.; Malik M. A. I.; Bashir R.; Riaz F.; Raza M. J.; Suleman K.; Rehman A.; Ashraf W. M. y Krzywanski J. Enviro-economic assessment of hho–cng mixture utilization in spark ignition engine for performance and environmental sustainability. *Energies*, 15(21):8253, 2022.
- [87] Bhave N.A.; Gupta M.M.; Joshi S.S. y Satputaley S.S. Effect of varying flowrate of oxy-hydrogen (hho) gas addition on combustion and emission characteristics of early direct injection homogenous charge compression ignition engine. *Springer*, 2023.
- [88] Zhao Z.; Huang Y.; Yu X.; Li M.; Zhang Z.; Guo Z.; Wang T. y Li D. Comparative study on combustion and emission of si engine blended with hho by different injection modes of gasoline. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47:34273–34290, 2022.
- [89] Allebrod F; Mollerup P. L.; Chatzichristodoulou C. y Mogensen M. B. Electrical conductivity measurements of aqueous and immobilized potassium hydroxide. *Proceedings*, page 181, 2011.