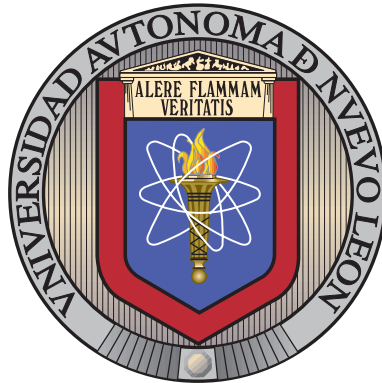


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



EVALUACIÓN DE LA AUTO-IGNICIÓN DE
MEZCLAS GASOLINA-ETANOL-METANOL EN UN
MOTOR CFR DE COMPRESIÓN VARIABLE

POR

I.M. EDGAR ULISES RIVERA FLORES

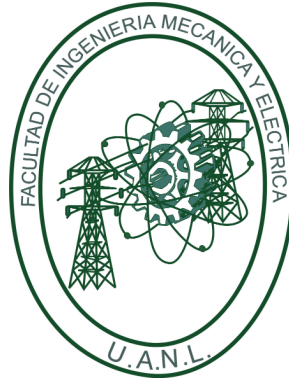
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

DICIEMBRE 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



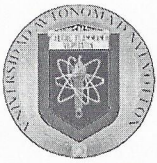
EVALUACIÓN DE LA AUTO-IGNICIÓN DE
MEZCLAS GASOLINA-ETANOL-METANOL EN UN
MOTOR CFR DE COMPRESIÓN VARIABLE

POR

I.M. EDGAR ULISES RIVERA FLORES

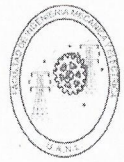
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

DICIEMBRE 2020



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “Evaluación de la auto-ignición de mezclas gasolina-etanol-metanol en un motor CFR de compresión variable”, realizada por el alumno Edgar Ulises Rivera Flores, con número de matrícula 1935049, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Tesis

Dr. Simón Martínez Martínez
Director

M. C. Miguel García Yera
Co-Director

Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León
Revisor

Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



FIME

060

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 16 de octubre de 2020



“Alere Flammam Veritatis”

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	XII
Agradecimientos	XIII
Resumen	XIV
1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Antecedentes	3
1.2.1. Estado actual de los biocombustibles en el mundo	3
1.2.2. Estado actual de los biocombustibles en México	8
1.2.3. Bioetanol como combustible	12
1.2.4. Biometanol como combustible	15
1.3. Hipótesis	16
1.4. Objetivos	17
1.4.1. Objetivo General	17
1.4.2. Objetivos Específicos	17
2. Marco teórico	18
2.1. El proceso de combustión en motores de combustión interna por ignición	19
2.2. Estado del arte	20
2.2.1. Mezcla gasolina-etanol	20
2.2.2. Mezcla gasolina-metanol	25

2.2.3. Mezcla gasolina-etanol-metanol	29
2.3. Knock y autoignición en motores de combustión interna	33
2.3.1. El fenómeno de autoignición	33
2.3.2. Autoignición en alcoholes y mezclas.	36
2.3.3. El fenómeno del knock.	38
2.4. Emisiones características en motores de encendido provocado	42
3. Metodología	44
3.1. Descripción de la instalación experimental	45
3.2. Caracterización de las mezclas	47
3.3. Matriz de ensayos	49
3.4. Análisis de emisiones	51
3.5. Análisis de Intensidad del knock	54
4. Resultados	57
4.1. Resultados de caracterización de las propiedades termoquímicas de los combustibles	58
4.2. Resultados sobre la presión en cámara	62
4.3. Resultados de intensidad y frecuencia de aparición de knock	64
4.3.1. Resultados de intensidad de knock	64
4.3.2. Resultados de frecuencia de aparición de knock	67
4.4. Resultados de emisiones contaminantes.	69
4.4.1. Emisiones de monóxido de carbono (CO).	69
4.4.2. Emisiones de dióxido de carbono (CO ₂)	71
4.4.3. Emisiones de oxígeno (O ₂)	73
4.4.4. Emisiones de hidrocarburos no quemados (HC)	75
4.4.5. Resultados de emisiones óxidos nitrosos (NO _x)	76
4.4.6. Resultados de material particulado (PM)	78
5. Conclusiones y Trabajos futuros	81
5.1. Conclusiones	82

5.2. Trabajos futuros	84
A. Apéndice	86
A.1. Resultados de presión en cámara	87
A.2. Resultados de intensidad y frecuencia de aparición del knock	88
A.3. Resultados de emisiones	90
A.4. Tablas de resultados	96
Bibliografía	101

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Prospectiva de cambio en demanda de energía primaria en período 2016-2040 [1].	2
1.2. Porcentaje de consumo de productos finales de petróleo por sector [2].	4
1.3. Suministro total de energía por fuente primaria [1].	6
1.4. Producción y demanda mundial de biocombustibles [3].	6
1.5. Prospectiva de la demanda de energía para 2060 [2].	7
1.6. Demanda de productos petrolíferos por sector, 2006-2016 [4].	8
1.7. Demanda de combustible en el sector transporte 2017-2031[4].	9
1.8. Empresas suministradoras de etanol y volumen promedio suministrado a PEMEX [5].	10
1.9. Principales materias primas para la producción de etanol [6].	14
2.1. Esquema de las partes de un motor mono-cilíndrico de encendido por bujía.	19
2.2. Diagrama de formulación de mezcla gasolina-etanol-metanol para relación A/C=9.71 [7].	30
2.3. Gráfica de retraso de ignición para a)Tubo de choque, y b)Máquina de compresión rápida [8].	34
2.4. Gráfica de presión en cámara y knock en un ciclo de motor [9].	38
3.1. Instalación experimental “Motor CFR”.	45
3.2. Diagrama de los principales sistemas de la instalación experimental “Motor CFR”.	46
3.3. Bomba calorimétrica para obtención del poder calorífico.	48

3.4. Equipo analizador de emisiones MAHA MET 6.3.	51
3.5. Gráfica de emisiones en porcentaje de volumen durante la combustión.	53
3.6. Gráfica de emisiones de partes por millón durante la combustión.	53
3.7. Gráfica de presión en cámara y knock en un ciclo de motor [9].	54
3.8. Interfaz de la aplicación de análisis de datos de la combustión.	55
4.1. Liberación de calor de la gasolina.	58
4.2. Poder calorífico de mezclas gasolina-etanol-metanol con mayor contenido de etanol (azul) y mayor contenido de metanol (roja).	59
4.3. Curva de destilación de G91.5E5M3.5.	60
4.4. Destilación de mezclas GEM y valor máximo de referencia que estipula la NOM-016-CRE.	61
4.5. Presión máxima en cámara de mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.	63
4.6. Intensidad del knock de mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.	66
4.7. Frecuencia de aparición del knock de mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.	68
4.8. Emisiones CO en mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.	70
4.9. Emisiones CO ₂ en mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.	72
4.10. Emisiones O ₂ en mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.	74
4.11. Emisiones HC en mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.	76
4.12. Emisiones NO _x en mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.	78
4.13. Emisiones PM en mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.	79

A.1. Presión máxima de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 38 °C.	87
A.2. Presión máxima de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.	87
A.3. Intensidad del knock de mezclas GEM; Temperatura de admisión de aire de 38 °C.	88
A.4. Intensidad del knock de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.	88
A.5. Frecuencia de aparición del knock de mezclas GEM; Temperatura de admisión de aire de 38 °C.	89
A.6. Frecuencia de aparición del knock de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.	89
A.7. Fracción volumétrica de CO de mezclas GEM; Temperatura de admi- sión de 38 °C.	90
A.8. Fracción volumétrica de CO de mezclas GEM; Temperatura de admi- sión de 60 °C.	90
A.9. Fracción volumétrica de CO ₂ de mezclas GEM; Temperatura de ad- misión de 38 °C.	91
A.10. Fracción volumétrica de CO ₂ de mezclas GEM; Temperatura de ad- misión de 60 °C.	91
A.11. Fracción volumétrica de O ₂ de mezclas GEM; Temperatura de admi- sión de 38 °C.	92
A.12. Fracción volumétrica de O ₂ de mezclas GEM; Temperatura de admi- sión de 60 °C.	92
A.13. Partículas por millón de HC de mezclas GEM; Temperatura de ad- misión de 38 °C.	93
A.14. Partículas por millón de HC de mezclas GEM; Temperatura de ad- misión de 60 °C.	93
A.15. Partículas por millón de NO _x de mezclas GEM; Temperatura de ad- misión de 38 °C.	94
A.16. Partículas por millón de NO _x de mezclas GEM; Temperatura de ad- misión de 60 °C.	94

A.17. Concentración de material particulado de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 38 °C.	95
A.18. Concentración de material particulado de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.	95

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Propiedades de los combustibles puros.	47
3.2. Matriz de variables a modificar durante la experimentación.	49
3.3. Características técnicas del analizador de gases Maha MET 6.3.	52
4.1. Propiedades de las Mezclas GEM.	60
A.1. Tabla de resultados para gasolina.	96
A.2. Tabla de resultados para mezcla G95.8 E2.5 M1.7.	96
A.3. Tabla de resultados para mezcla G96 E1.5 M2.5	97
A.4. Tabla de resultados para mezcla G91.5 E5 M3.5	97
A.5. Tabla de resultados para mezcla G92 E3 M5	98
A.6. Tabla de resultados para mezcla G86.5 E9.5 M4	98
A.7. Tabla de resultados para mezcla G88 E4.5 M7.5	99
A.8. Tabla de resultados para mezcla G83 E10 M7	99
A.9. Tabla de resultados para mezcla G84 E6 M10	100

AGRADECIMIENTOS

Dado que para todo individuo siempre es importante sus relaciones personales, en primer lugar, agradezco el apoyo de mi familia, que siempre estuvo alentándome en todo momento a superarme y a no rendirme cuando la situación se tornaba difícil. A mi esposa Karen por tener paciencia durante el tiempo transcurrido en este proyecto que involucro un sacrificio a ambos. Finalmente, pero no menos importante, a Leo por iluminar mis días y noches cuando el animo estaba bajo.

Agradezco al Grupo de Energía Térmica y Renovables por la facilidades para realizar esta investigación. Un especial agradecimiento es merecido al Dr. Simon Martinez Martinez por el apoyo durante la investigación y la excelente revisión de este documento.

Finalmente agradezco a mis compañeros de generación, y posgrado, especialmente a Fer y Alan con quienes discutí innumerables temas lo cual enriqueció mi estancia en la maestría.

RESUMEN

Los motores de combustión interna de encendido por ignición aparecieron a partir del siglo XXI como una forma de obtener trabajo por medio de la liberación de calor proveniente de la energía química contenida en los combustibles y liberada durante su combustión. Desde entonces el motor de combustión interna de encendido por ignición ha tenido modificaciones y mejoras sustanciales comparada con sus inicios. Sin embargo, en el contexto actual el motor de combustión interna debe de continuar mejorando su desempeño debido a la aparición de otras formas de transporte más eficientes, sin mencionar las estrictas regulaciones ambientales que van exigiendo mejor desempeño y menor impacto ambiental.

Por estas razones el motor de combustión interna de encendido por ignición se encuentra en una etapa de mejora constante, no sólo en el diseño del motor si no también durante su operación, lo cual involucra la etapa de combustión, no obstante, este proceso siempre ha puesto una limitante al motor de combustión por ignición, dicha limitante es el fenómeno de auto-ignición, que se manifiesta como el “knock”.

El fenómeno de auto-ignición tal como el concepto lo enuncia, implica la reacción espontánea de una porción de la mezcla combustible-aire en un punto e instante indeseable, en consecuencia se considera a la autoignición y su manifestación posterior del knock, como un fenómeno anormal de la combustión.

Diversas investigaciones han mostrado que existen sustancias que poseen cualidades antidetonantes, inhibiendo el fenómeno de la auto-ignición. Entre estas sustancias se encuentran los bioalcoholes, sustancias con propiedades similares a la gasolina

pero con la característica precisa que tienen cualidades antidetonantes mejores en comparación con la gasolina (por ejemplo el etanol y metanol), lo cual sugiere que la mezcla de la gasolina y los bioalcoholes puede tener mejor desempeño durante el proceso de combustión.

En la presente investigación se estudia desde un punto de vista comparativo, la combustión de la gasolina como combustible de referencia versus mezclas gasolina-etanol-metanol (GEM). Para el desarrollo de esta investigación se hace un barrido de relaciones de compresión hasta el punto en el que la mezcla gasolina-alcohol presenta diferencias importantes en intensidad y frecuencia de aparición del knock con respecto a la gasolina. El objetivo esta investigación es cuantificar la capacidad de reducir la intensidad y frecuencia de aparición del knock, impacto de máxima presión en cámara, además, durante los ensayos se hace medición de las emisiones reguladas. Con esto se obtiene información relevante con respecto a la magnitud en que la mezcla disminuye el knock durante la combustión respecto a la gasolina de referencia. Finalmente se concluye que, con el uso de estas mezclas se pueden alcanzar desempeños similares a los de la gasolina y disminuir emisiones contaminantes como por ejemplo el monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se expone como primera parte, la motivación para la realización de esta investigación. A continuación, se exponen los antecedentes del área de conocimiento en el que se enmarca el trabajo. Por último, se expone la hipótesis planteada junto a los objetivos, tanto de carácter general como específicos, de esta investigación.

1.1 MOTIVACIÓN

En el siglo XXI los cambios tecnológicos se dan de manera rápida y vertiginosa, el mundo se encuentra en constante cambio día a día y las economías tanto nacionales como regionales necesitan adaptarse a este constante cambio. Una de las principales incertidumbres a nivel mundial se encuentra en las fuentes de energía [1][10], debido a esta situación del sector petrolero, principal fuente de energía a nivel mundial, pero sobre todo a las reservas de crudo disponibles para su extracción, y si la capacidad de producción petrolera será suficiente para satisfacer las necesidades de la humanidad según se plasma en la Figura 1.1. En este sentido cuando se habla del acceso a energía se encuentra que los actuales modelos económicos no han podido proporcionarle acceso a energía de calidad a una gran parte de la población mundial [2]. Finalmente, si se añade el factor ambiental en donde la amenaza del calentamiento global y los efectos del cambio climático afectan cada vez más a la población mundial, ante este escenario, la mayoría de los países y principales economías se reunieron en París 2016 para acordar objetivos más ambiciosos en cuanto a la reducción de la huella de carbono de sus respectivos países [11].

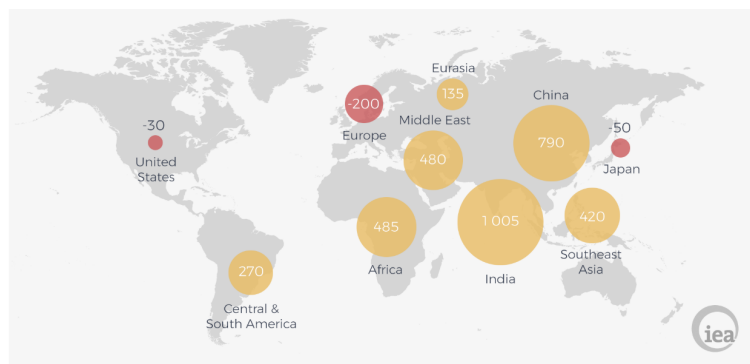


Figura 1.1: Prospectiva de cambio en demanda de energía primaria en período 2016-2040 [1].

Actualmente, se ha confirmado que el uso de combustibles fósiles ha propiciado un daño al medio ambiente generando los fenómenos del calentamiento global y el cambio climático. Por otro lado, la emisión de los contaminantes producto de la combustión también se consideran precursores de daños en la salud de los seres hu-

manos [12, 13]. En este contexto, la industria automotriz y la industria de refinación se encuentran ante el enorme reto de mejorar su portafolio de productos, mientras los vehículos deben de cumplir estándares más rigurosos de rendimiento por litro de combustible, a la par de que disminuyen sus emisiones; los combustibles se encuentran ante el reto de resistir condiciones más adversas dentro de la cámara de combustión durante la etapa de combustión.

En el actual contexto del desarrollo sustentable, las actividades humanas contemporáneas deben satisfacer las tres dimensiones que lo componen (económica, social y ambiental) esto para lograr un verdadero desarrollo en la sociedad [14, 15]. Además, en el contexto de desarrollo económico existe una tendencia, de que las sociedades conforme se desarrollan aumentan sus niveles de consumo de energía, por lo tanto, surge la interrogante de cómo las sociedades contemporáneas en este contexto económico lograran satisfacer sus necesidades actuales energéticas y las de futuras generaciones. Ante este hecho es posible vislumbrar la importancia que tiene y tendrá en un futuro el desarrollo y uso de combustibles alternos, tales como los biocombustibles, debido a que el uso de este tipo de combustibles pueden disminuir emisiones nocivas para el ser humano como CO, CO₂ NO_x, mejorar la combustión durante el funcionamiento del motor, y la natural ventaja de que provienen de materia orgánica con alto potencial de ser sustentable.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 ESTADO ACTUAL DE LOS BIOCOMBUSTIBLES EN EL MUNDO

En el mundo existe un consenso en cuanto a la importancia que tiene la energía para cualquier economía a tal punto que en ocasiones existe hasta un involucramiento de la propia política, y fuerzas económicas debido a que se considera asunto de seguridad nacional [16]. En este contexto, una de las actividades económicas que mayor demanda tiene de recursos energéticos es la industria del transporte (Figura 1.2). Dentro

de los objetivos clave de todas las economías desarrolladas, es asegurar recursos suficientes para movilidad colectiva de todas las actividades productivas (transporte público, tráfico de mercancías, etc.) e individuales (viajes, desplazamientos, etc.). Esto significa particularmente en el contexto mundial actual, tener la disponibilidad de recursos petroleros, lo cual abarca desde petróleo crudo hasta productos intermedios como queroseno o gasolina refinada. Sin embargo, en la actualidad no existen sustitutos viables a gran escala en el sector del transporte [17].

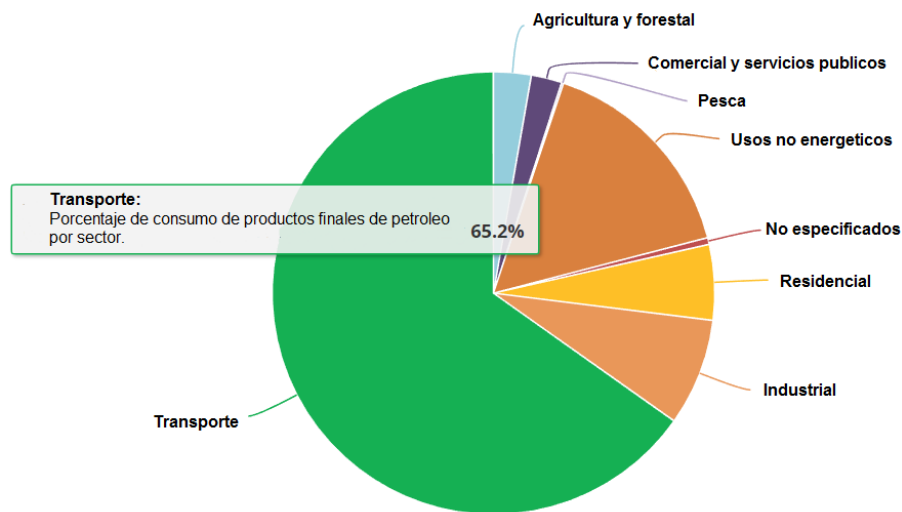


Figura 1.2: Porcentaje de consumo de productos finales de petróleo por sector [2].

Lograr un futuro bajo en carbono se plantea como un reto que requerirá ampliar el portafolio de fuentes de energía, así como el aprovechamiento de todas las tecnologías existentes y el establecimiento de las políticas pertinentes. La bioenergía tiene el potencial de suministrar hasta un 20% de los ahorros en las emisiones de carbono, de manera que se vuelve difícil replazar su importante contribución. Para lograr este impacto de la bioenergía, es necesario que sea producida y usada de una forma sustentable, lo cual permitirá reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero comparado con los combustibles fósiles, y ayudar a alcanzar las metas del desarrollo sustentable.

La bioenergía es particularmente importante en sectores donde las opciones de descarbonización no están disponibles. Por ejemplo, en el sector de transporte, la bioenergía complementa a la mejora en eficiencia, electrificación. Además, existen in-

dustrias como la aviación y marítima, donde proyectos tecnológicos ya han tomado particular importancia [3].

Mucho más que cualquier otro tipo de energía renovable, la bioenergía está fuertemente relacionada con todo el sistema de uso de la tierra, producción agrícola y forestal que compone la bioeconomía global. La “bioeconomía tradicional” ha sido en gran parte enfocada para la producción de alimentos, productos forestales, papel, pulpa y textiles, mientras que también proporciona una contribución sustancial a las necesidades locales de energía a través del uso de leña.

Existe ya una gran conciencia acerca del potencial de la expansión de la bioeconomía para reducir la dependencia de combustibles fósiles y otras fuentes no renovables. Se ha incrementado el reciclaje de materiales con base biológica y se ha desarrollado un mayor número de productos con valor agregado basados en fuentes de biomasa sostenibles.

Los productos refinados de petróleo todavía dominan el sector del transporte en todo el mundo y se pronostica que por lo menos hasta 2040 seguirá siendo la principal fuente de energía del mundo [1].

Los biocombustibles representan los sustitutos más obvios de los productos refinados del petróleo, casos como el etanol y el biodiesel, tienen el potencial de poder hacer uso eficiente de la infraestructura energética existente para los combustibles fósiles (tanques de combustible, tuberías, etc.), y la tecnología para su uso (es decir, motor de combustión).

Los biocombustibles representan una alternativa a corto y mediano plazo. Combustibles basados en cultivos denotados como biocombustibles incluido el biodiesel y el bioetanol, han surgido como una alternativa real al uso de gasolina y diésel convencional en el transporte. Existe una alta aceptación del público en general, gobiernos, productores agrícolas y de diversos sectores en la promoción de los biocombustibles en las actividades cotidianas.

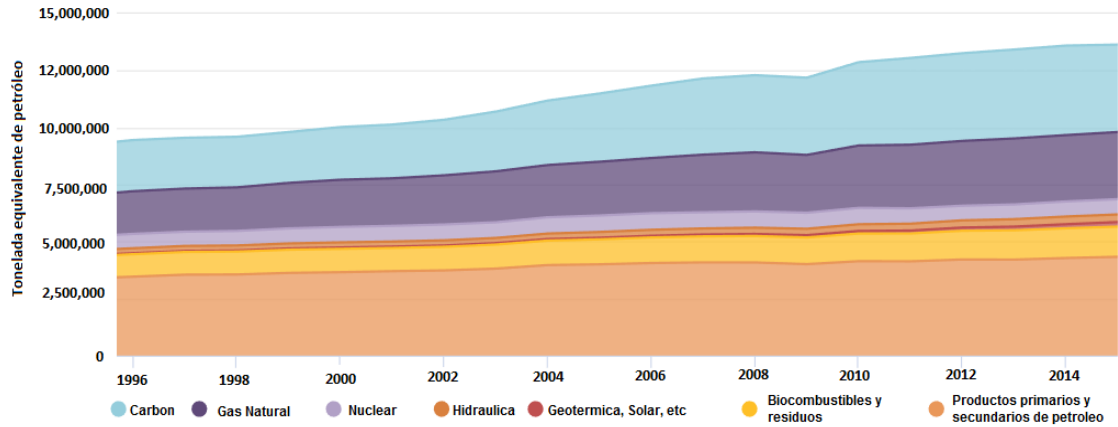


Figura 1.3: Suministro total de energía por fuente primaria [1].

Esto constituye un intento de cambiar la industria de transporte la cual se basa en la gasolina, producto en el que se ha confiado en los últimos 50 años, en comparación con una industria y sociedad de base biológica que pueda garantizar un suministro de energía más sustentable. El aumento exponencial en el consumo de estos biocombustibles ha tenido lugar en los últimos años (Figura 1.3), a tal punto que los biocombustibles y biomasa representan el 5% del consumo mundial de energía.

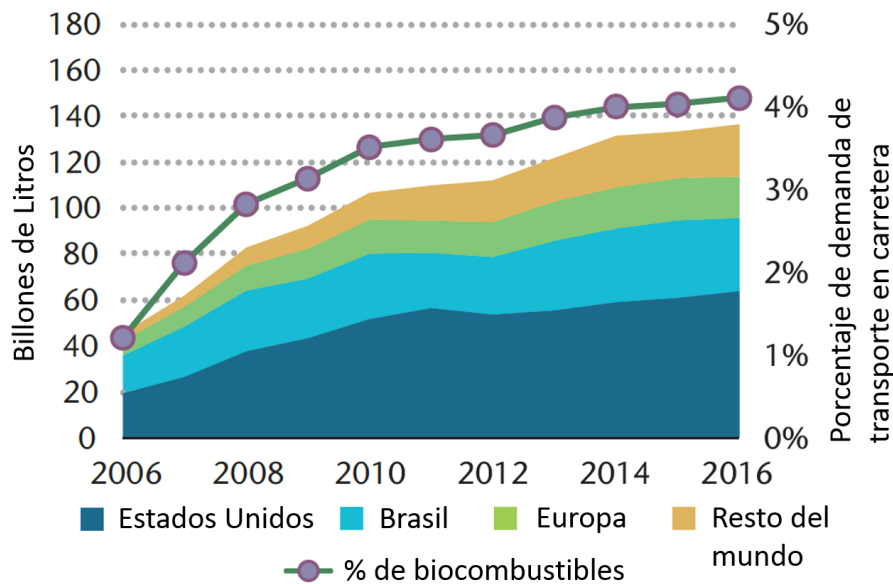


Figura 1.4: Producción y demanda mundial de biocombustibles [3].

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, los biocombustibles representan el 4% del consumo total de energía a nivel mundial para el sector transporte según

la Figura 1.4, teniendo como principales productos al biodiesel y el bioetanol. Las perspectivas demuestran que los biocombustibles aumentarán en demanda dentro de la matriz energética, sin embargo, diversos estudios muestran que la tecnología aún cuando ya se ha desarrollado, no ha logrado entrar a diversos mercados, lo cual se puede ver en la concentración de la producción en dos países, E.U.A. y Brasil quienes generan el 85 % de total de la producción mundial [3, 18].

Las perspectivas de la Agencia Internacional de Energía concluyen que en caso de superarse las barreras reguladoras en las diversas zonas económicas donde no se ha podido avanzar en la inserción de los biocombustibles, para 2060 habrá un aumento en la participación de los biocombustibles en el sector de transporte (Figura 1.5), los cuales contribuirán con el 29 % de las necesidades energéticas en el sector.

Los biocombustibles desempeñan un papel clave en la descarbonización de los medios de transporte de larga distancia, complementando las acciones destinadas a limitar las necesidades energéticas del sector, la mayor participación de la electrificación y otras medidas en las aplicaciones de transporte urbano y transporte de corta distancia [3].

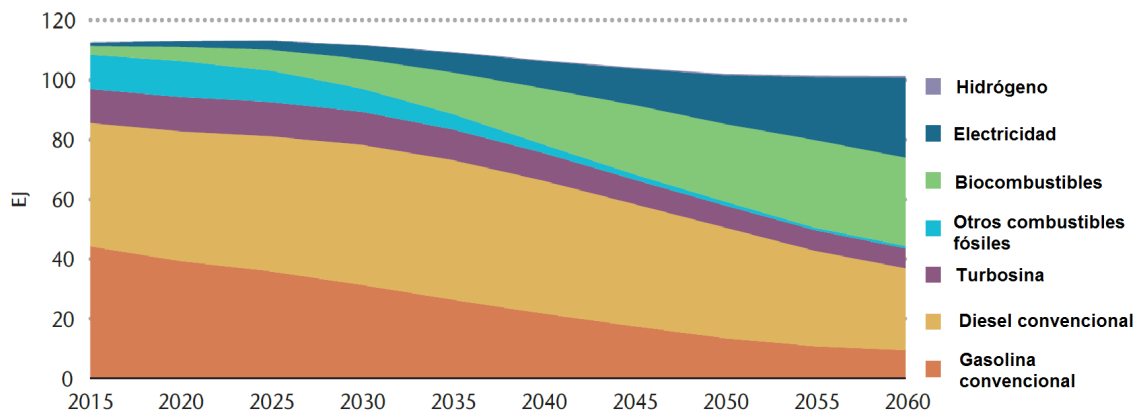


Figura 1.5: Prospectiva de la demanda de energía para 2060 [2].

Sin embargo, se observa que pese a los esfuerzos de introducir los biocombustibles en diferentes mercados, e incrementar su demanda, la tendencia en cuanto a la diversificación por área geográfica no mejorará mucho; en la actualidad aproximadamente el 90 % de los biocombustibles se utilizan en los Estados Unidos, Brasil, la Unión

Europea y China, mientras que en el 2060 el uso será un tanto más equilibrado entre las regiones [3, 18, 19].

Finalmente, cabe destacar que actualmente sólo el etanol ha sido incorporado a la matriz energética de algún país, con excepción de China que ya cuenta con experiencia en la incorporación de metanol siendo este el único caso aislado [20, 21, 22].

1.2.2 ESTADO ACTUAL DE LOS BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO

En 2016, en México la producción total de petrolíferos se distribuyó como a continuación se presenta: 33.3% se centró en la obtención de gasolinas, 29.8% de diésel, 27.8% de combustóleo, 5.0% de turbosina y 4.2% de coque de petróleo. En el mismo año, se registró una demanda total de petrolíferos 0.4% mayor con respecto a 2014. El sector transporte se ubica como el de mayor demanda de petrolíferos, el 91.8% de esta demanda corresponde a la modalidad de autotransporte. En la Figura 1.6, se muestra la demanda de petrolíferos 2005-2015 [4].

Sector	Datos anuales											TMCA 2006-2016
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Total	1,406.1	1,463.0	1,460.9	1,406.9	1,396.4	1,427.9	1,463.7	1,431.5	1,346.5	1,351.9	1,391.0	-0.1
Transporte	968.1	1,025.8	1,069.6	1,037.1	1,057.4	1,063.6	1,077.8	1,058.9	1,058.0	1,071.4	1,105.7	1.3
Gasolinas	595.2	630.0	656.3	656.2	664.2	662.2	665.5	652.0	643.2	657.0	681.9	1.3
Diésel	312.5	328.8	349.4	327.0	338.3	346.5	354.7	346.6	350.1	345.5	349.6	1.4
Combustóleo	1.3	1.3	1.1	0.7	0.9	0.7	0.2	0.0	0.3	0.5	0.4	1.2
Turbosina	59.2	65.7	62.8	53.2	54.0	54.3	57.4	60.2	64.3	68.5	73.8	0.5
Eléctrico	253.0	245.7	218.4	215.1	197.9	219.5	247.0	224.0	151.5	136.6	149.2	0.5
Diésel	7.8	4.5	6.8	8.6	8.0	9.5	14.1	13.8	9.5	9.3	11.2	-0.8
Combustóleo	230.5	226.5	197.5	192.5	172.5	193.2	215.6	192.4	124.2	110.0	122.6	-0.2
Coque de Petróleo	14.8	14.7	14.1	14.1	17.4	16.8	17.4	17.8	17.7	17.4	15.4	-10.1
Industrial	128.9	134.1	115.9	98.4	90.7	93.7	92.2	97.4	88.3	98.2	103.6	2.2
Diésel	24.3	24.8	25.5	23.1	24.5	27.3	31.4	30.9	29.4	29.7	26.3	2.2
Combustóleo	52.7	49.2	38.3	32.2	26.0	22.5	15.4	11.8	7.0	10.0	14.6	-5.1
Coque de Petróleo	51.9	60.1	52.1	43.2	40.2	43.9	45.3	54.7	51.9	58.5	62.6	3.7
Petrolero	56.0	57.5	57.1	56.3	50.4	51.1	46.7	51.2	48.7	45.7	32.5	-6.1
Gasolinas	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	1.0	1.1	1.7	1.5	0.8	0.0
Diésel	15.0	17.1	17.6	19.9	19.1	17.6	19.8	22.2	20.7	19.8	10.3	-2.2
Combustóleo	40.5	39.8	39.0	35.8	30.7	32.8	25.9	27.9	26.2	24.4	21.4	0.8

Figura 1.6: Demanda de productos petrolíferos por sector, 2006-2016 [4].

México presenta una economía sólida con crecimiento dinámico, considerando el número de vehículos por habitante, aún se encuentra lejos del punto de saturación. En este sentido, entre 2017 y 2031, se estima que el sector transporte incrementará el 27.3% la demanda de combustibles al pasar de 1,149.6 mbdpc (millones de barriles diarios de petróleo crudo) en 2017 a 1,463.5 mbdpc en 2031. Del volumen total previsto en 2031, las gasolinas serán las de mayor demanda, representando el 56.8%, mientras que el diésel será del 33.5%, resultado de su uso intensivo en el autotransporte. De acuerdo a lo anterior, el consumo de ambos combustibles representará el 90.4% de la demanda total de este sector; el resto se distribuye entre turbosina con 7.8% y gas LP con 1.5%. El gas natural comprimido (GNC) continuará reflejando una participación marginal [4].

Concepto	Datos Anuales															TMCA 2017-2031
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	
Total	1149.6	1172.6	1194.6	1217.2	1244.0	1275.4	1300.3	1322.1	1346.4	1368.9	1391.2	1408.1	1428.3	1446.6	1463.5	1.7
Gasolinas	686.3	699.6	709.7	719.7	731.0	747.5	760.2	771.5	784.1	794.5	804.4	810.3	818.7	825.6	832.3	1.4
Diesel	359.0	367.2	377.2	386.7	399.5	411.7	421.4	429.5	438.8	448.4	458.1	466.4	475.5	484.0	491.4	2.3
Gas LP	26.6	25.9	25.6	25.7	25.9	26.1	25.9	25.7	25.4	25.1	24.7	24.4	24.0	23.6	23.1	-1.0
Turbosina	76.7	78.9	81.0	83.9	86.3	88.8	91.4	94.0	96.7	99.5	102.5	105.5	108.6	111.9	115.2	2.9
Intermedio 15	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.0
Gas natural comprimido	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	4.6

Figura 1.7: Demanda de combustible en el sector transporte 2017-2031[4].

Durante el período que va de 2017 a 2031, el parque vehicular total se incrementará 20.4%, lo que significa una adición de 7.1 millones de vehículos, de los cuales 3.6 millones corresponderán a motor eléctrico (es importante subrayar el cambio a vehículos de motor eléctrico, ya que este sector no impactará en los mercados de combustibles automotrices), 2.9 millones a motor a gasolina, 0.8 millones a motor a diésel y en menor medida automóviles a gas L.P. y gas natural comprimido. Durante todo el período 2017-2031, se espera que la demanda de combustibles en el autotransporte crezca a una tasa de 1.6% promedio anual, en tanto que para el parque vehicular por tipo de combustible sea de 1.3% promedio anual [4].

En México, ya se tiene una legislación que permite el impulso de los biocombustibles. La Ley de Transición Energética y la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables. Son las leyes que permiten la implementación de acciones concisas para

pasar de una economía fuertemente basada en hidrocarburos fósiles a una economía con mayor participación de las energías renovables.

En México se inició en 2014 el proyecto piloto: *Introducción de etanol anhidro en las gasolinas para alcanzar un porcentaje de 10 % sobre volumen*, dicho proyecto fue promovido por la Secretaría de Energía, y desarrollado por la división de Petróleos Mexicanos (PEMEX) Distribución. El objetivo de dicho proyecto consistió en iniciar el procedimiento de la licitación para adquirir etanol anhidro para mezclarlo en las gasolinas que comercializa PEMEX. Esta actividad sería un elemento fundamental en la ejecución de una prueba de concepto regionalizada para introducir etanol anhidro en la matriz energética de los combustibles, dando con ello cumplimiento a la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos [5].

Finalmente, el procedimiento licitatorio para la adquisición de etanol anhidro en las gasolinas que comercializaba PEMEX, concluyó en 2015, resultando después de una etapa de negociación de precios y evaluación de las propuestas económicas, cuatro ganadores para seis terminales de almacenamiento y distribución (TAD) quienes adquirieron los compromisos de entregar hasta un máximo de 142 millones de litros en promedio por año para las seis TAD'S (figura 1.8), considerándose un arranque escalonado de la entrega de etanol anhidro a partir de 2016 [5].

Empresa Licitante	TAD	Cantidad mínima (millones de litros)	Cantidad máxima (millones de litros)
Alcoholera de Zapopan	Perote	79.0	113.0
Destiladora del Papaloapan/ Fabricación de Alimentos Tenerife (Grupo Báltico)	Veracruz	268.0	382.0
Soluciones en Ingeniería Naval, Marina y Terrestre	Xalapa	151.0	215.0
Bioenergéticos Mexicanos / Productores de Bioenergéticos Mexicanos (Biomex)	Cd. Mante	41.0	59.0
	San Luis	369.0	527.0
	Cd. Valles	135.0	193.0

Figura 1.8: Empresas suministradoras de etanol y volumen promedio suministrado a PEMEX [5].

Producto de los resultados de dicho proyecto para la introducción de etanol anhidro en ocho TAD's de PEMEX, la paraestatal creó una oportunidad importante para que México emprenda la producción de este biocombustible a gran escala, tomando como base los resultados de una prueba de concepto regionalizada.

De lograrse una expansión a gran escala de la producción de los biocombustibles, esta tendrá lugar a un desarrollo regional en nuevas zonas, creando empleos y promoviendo mejores infraestructuras sociales. Adicionalmente se espera la mitigación de Gases de efecto invernadero por el uso de este biocombustible.

Los beneficios que esperaba obtener el programa de introducción de etanol en las gasolinas para el país son los siguientes:

- La creación de empleos en el campo.
- El desarrollo de la economía rural.
- La mejora de la seguridad energética.
- Una mejor gestión del agua.
- La expansión de la agricultura a tierras más secas o desaprovechadas cosechando cultivos resilientes y múltiples como el sorgo dulce.
- La motivación de la comunidad científica y tecnológica para el desarrollo de segunda generación de biocombustibles.
- Incentivos a la industria de bienes de producción.
- La mejora del medio ambiente local y global.

Hasta ese momento parecía que México entraría en una fase inicial de la introducción de etanol, sin embargo, a partir de 2016 en el marco de la reforma energética donde el mercado de combustibles cambió y se dio la incorporación del sector privado en el negocio de suministro público de combustible. La Comisión Reguladora de Energía (CRE) decretó a través del proyecto de norma NOM-016-CRE-2016 la adición máxima de 10 % de etanol en todo el país y de 5 % en las zonas con altos índices de contaminación, posteriormente a inicios del año 2016 la CRE decreta oficialmente la NOM-016-CRE-2016 pero en esta ocasión disminuyendo la proporción máxima de etanol o semejante a 5.8 % en el país, prohibiendo la mezcla en las ciudades de Monterrey, Guadalajara, y Ciudad de México. De acuerdo con la información oficial la justificación por la cual se disminuyó la adición de etanol en estas ciudades

se debe al impacto que tendría el etanol en las emisiones de aldehídos, un producto incompleto de la combustión de alcoholes.

Con lo anterior, se observa que la adición de etanol a las gasolinas y las ventajas que conlleva, se ven detenidos a causa de falta de voluntad o conocimiento que compruebe científicamente el impacto que puede tener este alcohol, retrasando la transición hacia más combustibles limpios.

En nuestro país la implementación de biocombustibles si bien no se ha difundido ampliamente, ya se encuentra en curso y esto se debe a que ya está permitido la adición de etanol al 5% a las gasolinas que se comercializan en el país.

Además del bioetanol existen otros potenciales combustibles que podrían ser obtenidos de origen vegetal, una de las opciones más viables es el biometanol, que ya se visualiza como otra opción para mezclarse con la gasolina.

1.2.3 BIOETANOL COMO COMBUSTIBLE

El bioetanol es el alcohol producto de procesos biotecnológicos aplicados a la biomasa proveniente de diversas fuentes. El bioetanol representa el biocombustible de mayor producción la cual en 2016 fue de 101 mil millones de litros de bioetanol en el mundo, siendo el principal proceso de producción la fermentación anaerobia [3].

La fermentación anaerobia es un proceso de transformación biológica, el cual consiste en la acción de microorganismos, dichos microorganismos normalmente enzimas, metabolizan los azúcares (provenientes de un cultivo) a través del proceso anaeróbico de fermentación para convertir dichas azúcares en etanol [23]. Para obtener un proceso eficiente de fermentación es necesario mantener un control de calidad del jugo obtenido a partir del cultivo y los microorganismos utilizados durante la fermentación.

Además, se requiere mantener el proceso controlado en PH y temperatura, para favorecer la activación y digestión de los microorganismo, la fermentación es un

proceso totalmente tecnificado y mejorado ya que se cuenta con los conocimientos necesarios para realizarlo de la forma más óptima [24].

Al proceso de fermentación le siguen los procesos de destilación, para aumentar la concentración en etanol, y deshidratación, para reducir su contenido en agua. El bioetanol es actualmente el alcohol más utilizado como biocombustible, principalmente como aditivo a la gasolina y en reemplazo del MTBE (metil ter-butil éter), debido a su capacidad de aumento del número de octano y mejora de la combustión.

El bioetanol puede ser considerado como un combustible de primera, segunda o tercera generación dependiendo del tipo de materia prima del que se obtenga (Figura 1.9). El etanol producido a partir de los azúcares del trigo, caña de azúcar o maíz es considerado como un biocombustible de primera generación ya que son plantas de uso alimenticio. Otra de las principales fuentes de materia prima para la producción de etanol es la biomasa rica en celulosa y hemicelulosa, procedente de la poda, restos de madera o papel, o cultivos ricos en celulosa no utilizados para alimentación, en cuyo caso se trataría de un biocombustible de segunda generación [25].

El bioetanol de segunda generación producido a partir de diversos materiales lignocelulósicos como la madera, residuos agrícolas o forestales, tiene el potencial de ser una materia prima para la producción de etanol y por lo tanto, complemento a la gasolina. Uno de los pasos cruciales en la producción de etanol es la hidrólisis de la hemicelulosa y celulosa en monómeros de azúcares. El método más prometedor para la hidrólisis de celulosa a glucosa es mediante el uso de enzimas, es decir: celulasas. Sin embargo, con el fin de hacer que la materia prima sea accesible a las enzimas, algún tipo de tratamiento previo es necesario. El potencial de cada materia prima para la producción de etanol depende de forma directa de la facilidad y los tratamientos con los que pueden ser convertidas en azúcares simples [26].

El inconveniente del uso de esta materia es la necesidad de procesos previos a la hidrólisis para la obtención de azúcares más sencillos. En el caso de la celulosa, el rendimiento del proceso de hidrólisis depende de la magnitud en la que los pretratamientos químicos o mecánicos puedan alterar estructural y químicamente la biomasa.

En términos generales, la celulosa es insoluble en la mayoría de solventes, por lo que presenta un bajo rendimiento en la conversión a azúcares simples mediante hidrólisis. Por el contrario, la hemicelulosa es soluble en álcalis, lo que la hace más propensa a su conversión en azúcares por el proceso de hidrólisis [27].

En resumen, existen diversas fuentes de biomasa con las cuales, a través de las tecnologías de primera o segunda generación se puede convertir dicha biomasa en etanol, sin embargo, existe una crítica hacia las tecnologías en lo referente a la sustentabilidad de los procesos, ya sea por la materia prima utilizada, el uso de suelo y agua de los cultivos y la factibilidad económica de los pretratamientos del bioetanol de segunda generación, dada esta situación surge la alternativa del bioetanol de tercera generación [6].

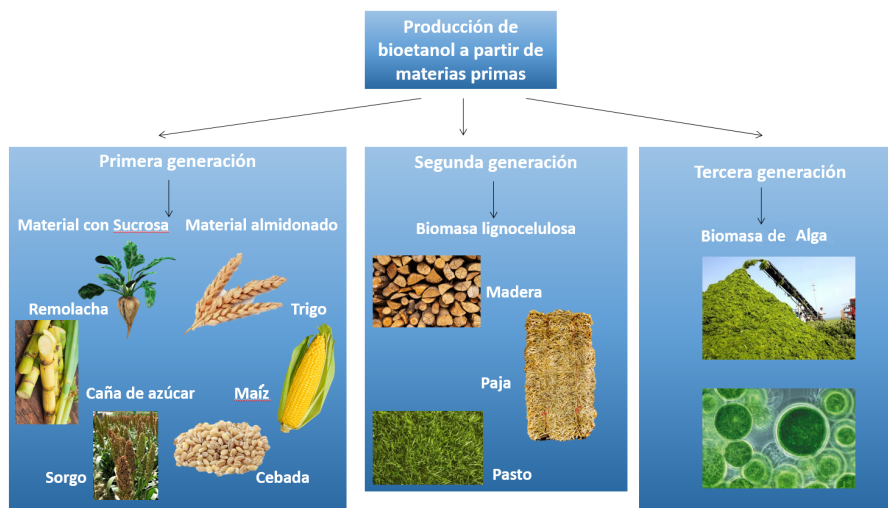


Figura 1.9: Principales materias primas para la producción de etanol [6].

El bioetanol de tercera generación se enfoca en el uso de organismos marinos como las algas. La aceptación pública sobre la capacidad de las algas para proporcionar biomasa para la producción de bioetanol es positiva, ya que esta acción puede limitar la competencia de las reservas de alimentos de las plantas agrícolas [6, 28]. En términos de potencial, el máximo rendimiento teórico para la producción de biomasa ha sido calculado en 365 toneladas de biomasa seca por hectárea al año. Principalmente, las algas tienen un contenido de lignina y hemicelulosa significativo para poder ser utilizado en la producción de bioetanol [29].

1.2.4 BIOMETANOL COMO COMBUSTIBLE

El metanol se puede usar en celdas de combustible, como materia prima química, además de usarse como combustible líquido de transporte. George A. Olah plantea incluso la posibilidad de una economía a base del metanol, esto porque de acuerdo al autor, el metanol es la forma más elemental y eficiente del almacenamiento de energía y fácil en su utilización [30].

El metanol tiene un largo historial de métodos de producción convencional, principalmente este se ha producido a partir de fuentes fósiles como el carbón o gas natural. Los procesos a partir de los cuales puede obtenerse biometanol son diversos, dependiendo del proceso utilizado y la materia prima a utilizar, se puede obtener metanol en estado líquido o gaseoso, siendo el primero el más utilizado como combustible en motores de combustión interna [20].

El proceso de pirólisis, consiste en provocar reacciones a gran temperatura y presión en ausencia de oxígeno, este método ha sido empleado tradicionalmente para la producción de metanol líquido a gran escala. Algunas de las materias primas utilizadas en el proceso con las que mejores resultados de producción se han obtenido han sido cáscaras de avellana [31] y madera de haya [32], teniendo en cuenta que el metanol producido por este método proviene de biomasa que no compite con la alimentación, se considera un biocombustible de segunda generación [33]. Otro método para la producción de metanol es mediante la gasificación de biomasa o carbón para la producción de gas de síntesis o syngas, del que posteriormente puede ser obtenido el metanol [34, 35]. Cifre y Badr [36] estudiaron la utilización de hidrógeno renovable en la producción de metanol mediante gasificación de biomasa, obteniendo una eficiencia de conversión en el rango 25-44 %. En un estudio se propuso la utilización del método hynol, que incrementa la eficiencia térmica del proceso. En este estudio se asegura que si el metanol producido por este método se utilizara en sustitución de la gasolina convencional se podrá alcanzar una reducción media del 41 % en las emisiones de CO₂ [37].

La bacteria metanotroca *Methylosinus trichosporium* ha sido empleada como bio-catalizador en la producción de metanol a partir de gases como CO_2 y CH_4 sin necesidad de utilizar H_2 , en el proceso conocido como biosíntesis del metanol [38].

Otros métodos para la obtención de metanol son los procesos foto-electroquímicos y la electrólisis. El primero utiliza celdas foto-electroquímicas que emplean CH_4 o CO_2 de gas natural o biomasa para producir metanol e hidrógeno [20]. Los métodos de electrólisis comprenden varias técnicas, como la producción de metanol a partir de H_2 , CO y O_2 , o a partir de la reacción de agua con CO y H_2 [39].

Debido a la diversidad de fuentes de materia prima para la producción del metanol, este ha sido considerado como una mejor opción para la sustitución de la gasolina en lugar del etanol. Existen estudios en donde se compara el potencial de obtención de metanol y etanol a partir de biomasa lignocelulosa y se encuentran ventajas en el metanol por la facilidad de procesamiento con respecto al otro [40].

1.3 HIPÓTESIS

Con base en la literatura previamente descrita se formula la siguiente hipótesis:

Es posible, a través del uso de mezclas ternarias de gasolina-etanol-metanol obtener iguales o mejores desempeños en la intensidad del *knock*, y su frecuencia de aparición durante el proceso de combustión, lo cual permite un aumento de la relación de compresión (RC) del motor, y de la presión en cámara, así como obtener una disminución en las emisiones contaminantes.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de la investigación será evaluar experimentalmente la aparición de knock, y su intensidad en la mezcla de gasolina-etanol-metanol en comparación con la gasolina, por medio de medidas de presión en la cámara de combustión en un motor de relación de compresión variable CFR; al mismo tiempo cuantificar las diferencias en las emisiones de CO, CO₂, O₂, NO_x, HC, y PM del motor alimentado por la gasolina pura y por las mezclas gasolina-etanol-metanol.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.-Caracterizar las propiedades de las mezclas gasolina-metanol-etanol.
- 2.-Evaluar de forma experimental la combustión para distintas relaciones de compresión usando diversas mezclas de gasolina-bioalcohol (80-20), midiendo la intensidad del knock.
- 3.-Evaluar la combustión de las mezclas GEM en una relación de compresión más alta del límite de la gasolina.
- 4.-Medir las emisiones de CO, CO₂, O₂, NO_x, HC, y PM de las mezclas GEM a la salida del motor y cuantificar su diferencia con respecto a las de la gasolina.
- 5.-Validar la regla de iso-estequiometría en mezclas ternarias GEM.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

El objetivo de este capítulo es informar al lector del estado del arte del estudio de mezclas de gasolina-etanol-metanol, así como brindar las herramientas teóricas y conceptuales necesarias para abordar el tema a investigar.

2.1 EL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA POR IGNICIÓN

El motor de encendido provocado o encendido por bujía SI (spark-Ignition) por sus siglas en inglés es el motor normalmente a gasolina donde el encendido se realiza a través de la descarga eléctrica de una bujía. En los motores de encendido provocado, el combustible se inyecta en el puerto de admisión, la carga de combustible se mezcla con el aire en el sistema de admisión a espera de la apertura de la cámara de combustión. La mezcla entra en el cilindro a través de la válvula de admisión, una vez dentro la mezcla se combina con productos de la combustión que quedan en el cilindro. En la Figura 2.1, se muestra un esquema de los principales elementos de un motor de encendido por bujía.

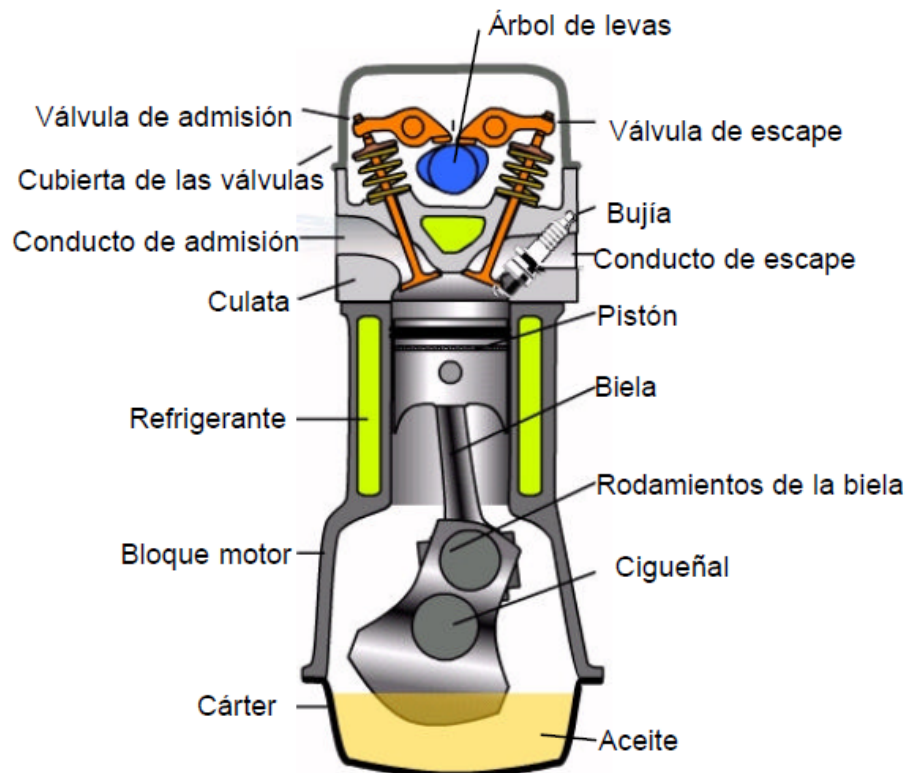


Figura 2.1: Esquema de las partes de un motor mono-cilíndrico de encendido por bujía.

Bajo condiciones de operación normales, el proceso de combustión comienza con una descarga eléctrica de la bujía situada en el cilindro, la cual se produce al final de la carrera de compresión, alrededor de 30° de cigüeñal antes del punto muerto superior (PMS). Después de la inflamación del combustible, se produce una llama de tipo turbulento y predominantemente premezclada, que se propaga por el cilindro desde la bujía. La llama se extingue cuando llega a las paredes del cilindro, lo que sucede en torno a 15° después del PMS, durante la carrera de expansión. La combustión puede proseguir en ciertas zonas de la cámara durante otros 10° . El proceso de combustión puede dividirse en cuatro etapas: descarga de la bujía, desarrollo primario, propagación y extinción de la llama.

2.2 ESTADO DEL ARTE

2.2.1 MEZCLA GASOLINA-ETANOL

El estudio de las mezclas gasolina-etanol constituye la más diversa compilación de investigaciones en combustibles alternos y limpios, esto se debe a que a raíz de la crisis del petróleo de los años 70's, y desde principios de los años 80's se puso interés en el etanol como uno de los combustibles con el potencial de sustituir a la gasolina, sin embargo, aún existen diversos vacíos de conocimiento en cuanto a su combustión y emisiones.

Una de las propiedades más importantes del etanol constituye su potencial antide-tonante representada por el número de octano de investigación (RON por sus siglas en inglés) y el número de octano de motor (MON por sus siglas en inglés). Waqas et al. [41], estudiaron el comportamiento de mezclas a diversas proporciones de etanol-gasolina, las gasolinas base contenían diferentes número de octano. La investigación se llevó a cabo siguiendo los estándares de la sociedad americana de pruebas y materiales (ASTM por sus siglas en inglés) en un motor CFR (Cooperative Fuel Research) en modo bujía de ignición (SI) y modo ignición por compresión de carga

homogénea (HCCI). Las mezclas se hicieron con concentración de etanol de 5 % a 20 % en base volumétrica; los autores observaron que las mezclas presentan un comportamiento no lineal en el número RON Y MON si se mezcla en base volumétrica, y disminuye la no linealidad si se mezcla en base molar. Los autores también reportan que el número de octano de la gasolina base influye en el número RON y MON de la mezcla final, la tendencia en las mezclas fue que con la adición de etanol los números RON y MON aumentaron en todos los casos.

Foong et al. [42], realizaron un estudio sobre la evaluación de mezclas de gasolina-etanol, y sustitutos de gasolina con etanol a proporciones de etanol de 0 % a 100 %; en el estudio se evalúa las mezclas bajo la metodología ASTM en un motor tipo CFR. Los autores concluyen que con la mezcla a base molar, se obtiene una mejor linealidad en el número RON, sin embargo, también influye el número RON de la gasolina, dado que se establecen relaciones de mejora entre el etanol y combustible base, como consecuencia se logra mejorar el número RON con respecto a la gasolina, mientras que la mezcla etanol-tolueno resulta con efectos negativos para el número RON.

Siguiendo con la misma línea de investigación Badra et al. [43], realizaron la experimentación de mezclas binarias gasolina-etanol, además de etanol-combustibles primario de referencia, en la investigación, el objetivo fue desarrollar un modelo para predecir la respuesta en octanaje del etanol mezclado con gasolina, este modelo fue validado experimentalmente con un motor tipo CFR. El modelo toma en cuenta los componentes de los combustibles para predecir la capacidad antidetonante de la mezcla, esto con el objetivo de determinar qué compuestos mejoran el número de octano de la mezcla.

Kolodziej et al. [44], caracterizaron mezclas de etanol-combustible de referencia encontrando que combustibles con mayor contenido iso-parafinico presentan diferencias en las condiciones de operación del motor y el cilindro, ya que son más sensibles al calor de vaporización, lo cual genera que el pico del knock, donde es medido el RON ocurra a condiciones menos ricas, para E30 esto provoca un número RON menor.

Wang et al. [45], recopilaron los modelos para predecir los números RON y MON, para posteriormente proponer un modelo simplificado, lo cual permite evaluar mejor la efectividad del etanol como aditivo para elevar el octanaje. Al final los autores determinan que la mezcla G60 E40 provee el octanaje más alto y óptimo.

Anderson et al. [46], establecieron una metodología para la mezcla de gasolina con etanol y metanol en donde se toma en consideración la densidad de cada componente de la mezcla y la proporción volumétrica que se convierte en proporción molar, los autores muestran que con esta metodología se consigue un aumento más lineal en el número MON y RON.

Anderson et al. [47] utilizaron un modelo previamente propuesto en otra investigación en donde a partir de la proporción molar de etanol y gasolina predicen el RON y MON de las mezclas con bajo, medio y alto contenido en etanol, hasta 85 %. Los autores concluyen que las gasolinas con un mayor contenido en iso-parafina presentan mayor desviación del modelo en el número MON, esto se debería a que a tales condiciones las interacciones entre etanol e iso-parafina serán mayores.

En la línea de desempeño de la combustión de la mezcla gasolina-etanol, Costagliola et al. [48], realizaron la evaluación del desempeño de un motor comercial utilizando mezclas de gasolina-etanol en proporciones de 0 a 85 %, el estudio se desarrolló a través del análisis de liberación de calor de los ciclos de presión medidos en la cámara de combustión, además del monitoreo de emisiones del motor. Los autores concluyen que no se encontraron diferencias significativas en la eficiencia (no más del 5 % en promedio), sin embargo, en emisiones se observó una importante reducción, por ejemplo: en número de partículas se redujo entre 60 % a 90 %, y algunas de las emisiones no reguladas como el benceno y bezopyreno, en contraste se observó un aumento en emisiones de carbonílicas, las cuales son emisiones indeseables en la combustión de alcoholes [49].

Dogan et al. [50], realizaron un estudio en un motor comercial Ford del desempeño de mezclas E0 E10 E20 y E30 agregando un análisis exergético del ciclo del motor, los autores reportan que la máxima potencia se obtiene a 2500 rpm con una mezcla E0

y la menor potencia con mezcla E30. Las emisiones de CO disminuyeron en función del régimen de giro, obteniéndose los valores más bajos a 2500 rpm y una mezcla E10, además, los autores reportan una disminución en la producción de NO_x .

En la línea de investigación, desempeño y emisiones del motor diversos autores concluyen que con las mezclas etanol-gasolina se mejora la eficiencia térmica del ciclo del motor, los autores reportan que a bajas proporciones de alcohol se obtiene un ligero aumento de la presión máxima. Además se ha observado que las emisiones de CO, NO_x y HC se han reducido mientras que el CO_2 aumenta [51, 52, 53, 54].

En la línea de investigación de autoignición Sarathy et al. [8], realizaron una investigación a partir de la cual concluyen que la alta capacidad de antidetonación del etanol se debe a su baja reactividad de ignición a baja temperatura. Con el uso de etanol, se favorece las vías de terminación de la cadena que conducen a la formación de radicales acetaldehído e hidroperoxi sobre el hidroxilo convencional de cadenas radicales de ramificación.

Además, el alto calor de vaporización del etanol reduce la temperatura de carga del gas cuando se inyecta directamente, lo que a su vez retrasa la autoignición [55, 56]. Esta característica se conoce comúnmente como el efecto de enfriamiento de carga. Sin embargo, el etanol tiene menor valor calorífico que la gasolina, lo que resulta en un menor contenido energético por unidad de volumen [57].

Lee et al. [38], realizaron un estudio comparativo entre el comportamiento de la oxidación de dos gasolinas certificadas y la variación en la reactividad del combustible a causa de su estructura molecular. Los tiempos de retraso de la ignición se midieron en un tubo de alta presión generador de ondas de choque y en una máquina de compresión variable a presiones de 10, 20 y 40 bar, a relaciones de equivalencia de 0.45, 0.9, 1.8 y un rango de temperatura de 650-1250 K. Los resultados indicaron que los efectos del número de octano, y la composición del combustible en las características de ignición son mayores en la región de temperaturas intermedias (coeficiente de temperatura negativa).

Los autores concluyen que la influencia de la composición de la mezcla se observa en determinados intervalos de temperatura, por ejemplo: a altas temperaturas mayores a 900 K, ambas gasolinas exhiben una reactividad similar a la de esas condiciones. Sin embargo, a temperaturas intermedias 700-850 K, la gasolina tipo Coryton presenta mayores retrasos en el tiempo de ignición a una presión de 20 bar. El aumento o disminución del retraso del tiempo de ignición con la composición química de la mezcla por ejemplo en temperaturas intermedias, la gasolina tipo Haltermann tiene una mayor producción de radicales OH y HO₂, esto como consecuencia de las interacciones cicloalcano/aromáticos etanol/aromáticas. La diferencia de composición se manifiesta en la calidad de autoignición y esto a su vez en el fenómeno del knock.

Agudelo et al. [58], realizaron una comparación de alcoholes etanol, butanol y n-heptano, en mezcla binaria al igual que etil hexanoate (mhx), y metil 3-hexenoate (meh) en mezclas ternarias, dicha comparación consiste en inyectar la mezcla en un motor tipo CFR haciendo un barrido de relaciones de compresión hasta el punto de CCR (punto de relación crítica por sus siglas en inglés), donde se encuentra niveles de autoignición considerables. El indicador que determina el CCR es la disminución abrupta de CO y el incremento abrupto de CO₂, en consecuencia, se monitorean en tiempo real las emisiones CO₂ y CO. Los autores encontraron que la adición de etanol reduce a la mitad la tendencia a la autoignición en metil ésteres insaturados, y en una tercera parte la tendencia en metil ésteres saturados, lo cual confirma que el etanol contribuye a reducir la reactividad de oxidación a baja temperatura.

Rapp et al. [59], realizaron la comparación entre la capacidad de antidetonación de una mezcla de gasolina-etanol y una mezcla de diferentes alcoholes, esto con la finalidad de determinar si la mezcla Alcohol mix proveniente de syngas podría sustituir el uso de etanol como aditivo. Se encontró que el etanol aumenta la presión de vapor Reid de la gasolina lo que resulta una desventaja, la investigación también muestra una metodología para el cálculo del knock en frecuencia e intensidad.

Vacaille et al.[60] realizaron un estudio numérico con su posterior validación experimental de la velocidad de la combustión y espesor de la llama, los autores analizan

las diversas correlaciones tanto empíricas como analíticas, para encontrar la velocidad y espesor de la llama, lo que permite conocer las ventajas y limitaciones de cada una de ellas. Al final los autores enuncian una nueva correlación, la cual es aplicable para rangos dentro de: relaciones de equivalencia (0.5-2) presiones de 5 a 85 bar, temperaturas de mezcla sin quemar (400-900 K). La importancia de estas variables radica que a partir de ellas se puede incorporar a los modelos de ciclos de combustión en un motor [61, 62].

Debido a la complejidad que implica el estudio de la combustión de una mezcla de combustibles con composición heterogénea, la mezcla etanol-gasolina se ha investigado bajo diversos enfoques, ya sea desde los mecanismos cinéticos de la reacción producida, o de los efectos físicos de la llama y las características que lo definen; uno de los enfoques más importantes, lo constituyen los estudios de velocidad de la flama para diversas mezclas gasolina-etanol [63, 64, 65].

2.2.2 MEZCLA GASOLINA-METANOL

El metanol a diferencia del etanol no ha sido exhaustivamente investigado, sin embargo, existen aplicaciones de este alcohol en motores de combustión interna, algunos de los ejemplos son los siguientes:

Dentro de la línea de simulación y modelado de la combustión, Sileghem et al. [66], realizaron una investigación para validar un modelo de medición de tiempo de ignición y diagnóstico de la aparición del knock. Los autores utilizan una nueva relación, en donde toman en consideración el tiempo de la ignición del metanol, el cual durante el inicio de la combustión no presenta el fenómeno de la flama fría, y el retraso que si presenta la gasolina. La investigación fue simulada y validada experimentalmente con un motor tipo CFR en condiciones MON.

Iliev [67], realizó una investigación donde simula las condiciones de combustión de mezclas de metanol-gasolina en proporciones volumétricas M0 M5 M10 M20 M30 y

M50, utilizando un modelo unidimensional, implementado en el software AVL boost. El autor concluye que a bajas concentraciones de metanol M5 M10 la potencia al freno se ve ligeramente incrementada mientras que a mayores concentraciones la potencia disminuye; finalmente el autor concluye que se obtiene disminución de emisiones de CO y HC obteniendo la menor proporción con la mezcla M50.

Nguyen et al. [68], realizaron el modelado de la combustión de mezclas gasolina-metanol para motores con ignición por bujía, en la investigación se desarrollan nuevas correlaciones para obtener la velocidad laminar de la flama, de la mezcla metanol-gasolina. El modelo se valida experimentalmente con un motor tipo CFR, y un motor comercial marca Hyundai, finalmente, los autores concluyen que a mayor concentración de metanol, existe un mayor retraso en la autoignición, mientras que la presión máxima aumenta con la concentración.

Beeckmann et al. [69], realizaron un estudio experimental y numérico para obtener la velocidad de combustión laminar de una mezcla metanol-iso-octano comparando con la mezcla ethanol-iso-octano bajo condiciones de presión de 10 bar, a un valor de temperatura de 372 K. El experimento se llevó a cabo a relaciones aire combustible de 0.8 a 1.2. Los autores obtuvieron una velocidad laminar para el methanol de 37 cm/s para la relación de equivalencia de 1, mientras que para el iso-octano el valor fue 27 cm/s, sin embargo, para la mezcla al 10% el valor de velocidad de combustión es de 10 cm/s, muy similar a la mezcla con etanol, además, los autores validaron su modelo numérico, siendo más exacto para el etanol en comparación con el metanol.

Siguiendo la línea de estudio de la llama de mezclas gasolina-metanol, Liao et al. [70], realizaron una investigación de las características de la combustión de mezclas G100, M5, M15 y M30 a bajas temperaturas, que suelen ser las características durante el arranque de los motores. Los experimentos se realizaron en el rango de temperaturas de 358 a 400 K. El estudio concluyó que para las mezclas M15 y M30 la relación de equivalencia óptima es de 1.3. El estudio mostró que a esta relación, se optimiza la velocidad más alta de la llama del metanol comparado con la gasolina pura, además, las emisiones de HC y CO a esa relación no son las más bajas posibles, de hecho, se

encuentran dentro de un rango óptimo comparadas con las emisiones de la gasolina en HC y CO.

Vancoillie et al. [71], realizaron una investigación experimental, donde evaluaron la velocidad de combustión turbulenta de mezclas de gasolina-metanol a diferentes dosados y con velocidades de 2 a 6 m/s, a temperatura de 358 K, y presión de 0.5 MPa. El estudio se realizó en una cámara para combustión a alta presión agitando con un ventilador, la medida se obtiene a través de imágenes de alta velocidad, los autores concluyen que los modelos de turbulencia predicen bien la velocidad, pero no toman en consideración la presión, factor que en el modelado de combustión de motores resulta relevante.

Las propiedades de metanol han generado que se le considere como un combustible viable para motores de combustión interna a tal punto que se ha derivado una línea en donde se ha investigado la factibilidad de estos combustibles en motores de alta compresión. Zhen et al [72], realizaron una investigación numérica con el software Fire Code CFD para modelar el fenómeno del knock en motores de alta relación de compresión de encendido por bujía, y operando con metanol, poniendo énfasis en el tiempo de disparo de la bujía y el EGR. Los autores reportan que con el aumento del EGR, la eficiencia térmica disminuye en gran medida y la aparición del knock es retrasada. El uso de una alta tasa de EGR y el adelanto temprano de la chispa generan una mejor eficiencia térmica en la desaparición del knock en comparación con el uso de una tasa de EGR baja, y la sincronización de la chispa tardía.

En la misma línea de investigación de motores de relación de compresión alta Celik et al. [73], realizaron un estudio experimental en un motor mono-cilíndrico modificado con relación de compresión variable de 6, 8 y 10, comparando en el estudio los resultados de la gasolina y una mezcla de gasolina-metanol. Los autores reportan que en la relación de compresión de 6, tanto la gasolina, como la mezcla no presentaron knock, pero que en la relación de compresión de 8, la gasolina presentó knock, mientras que la mezcla no, lo cual permite que utilizando esta mezcla se alcance RC=10. Además, se observa una mejora en eficiencia térmica, presión máxima y

torque, mientras que las emisiones de CO, CO₂ y NO_x disminuyeron en todos los casos analizados.

Zheng et al. [74], estudiaron el knock producido en un motor de relación de compresión variable a través de un modelo CFD, utilizando LEN y una cinética química de la combustión. Los resultados mostraron que la autoignición del gas final se produjo primero en un lugar cercano a la pared de la cámara debido a la mayor temperatura y presión. La evolución de los radicales OH fue básicamente la misma que la evolución de la temperatura en el cilindro. La producción de las especies de CO, CH₂O, H₂O₂ y OH fueron más altas que otras especies durante la combustión con knock.

En la línea de desempeño de motores de combustión interna utilizando metanol, Björnestrand [75] realizó una investigación experimental de las eficiencias y emisiones en el modo de combustión DISI (inyección directa, ignición por chispa por sus siglas en inglés) utilizando metanol como combustible en un motor Scania modificado para uso pesado. Se usó una relación de compresión de 17.3: 1, presión de admisión ambiental, y mezclas de combustible-aire ligeras, utilizadas a escala comercial. El autor concluye que un mayor rango de operación está disponible a mayores presiones en el riel común. Existe un inicio óptimo de inyección para lograr un retraso del inicio de la bujía. Este retraso es sensible al EGR. Eficiencias del 54 % son posibles en este modo de combustión. Un sistema de tratamiento de emisiones sería necesario para cumplir con la legislación vigente sobre emisiones.

Siguiendo con la misma línea de investigación, Agarwal et al. [76], realizaron una investigación del desempeño, emisiones y características de la combustión de mezclas M10 y M20 en un motor de encendido por bujía. Los autores reportan un aumento en la eficiencia térmica al freno mayor en las mezclas que la gasolina, y una disminución de CO y NO para las mezclas de metanol, se observó también una disminución menor de la presión en cámara en las mezclas comparada con la gasolina. Finalmente, la tasa de liberación de calor de las mezcla presenta algunos picos, mientras que la duración de la combustión de las mezclas es mayor que para la gasolina.

Elfasakhany [77], realizó una comparación experimental de mezclas metanol-gasolina obteniendo resultados similares a los anteriormente planteados en este texto. De hecho, se puede concluir como se ha planteado por Verhelst [78] que las propiedades del etanol y metanol permiten un nivel de mejora en el funcionamiento, en comparación con la gasolina aunque el grado de mejora depende principalmente de si el metanol se usa en un motor normal o de combustible flexible como se destaca en la literatura [79, 80, 81].

2.2.3 MEZCLA GASOLINA-ETANOL-METANOL

Turner et al. [7], postulan que a partir de la relación A/C de una mezcla binaria gasolina-etanol se puede obtener una mezcla ternaria equivalente GEM (Gasolina-Etanol-Metanol) manteniendo la relación A/C igual para ambas, a este principio formulado por los autores se le conoce como la regla de mezcla Iso-estequiometrica para mezclas GEM (Figura 2.2). En la investigación se estudian las mezclas GEM equivalentes a E85, dichas mezclas se caracterizan y se evalúan en un motor tipo Flex-fuel. Los resultados de la investigación muestran que el poder calorífico, densidad, números RON-MON y sensibilidad son similares en mezclas GEM y E85, además cuantificando la operación del motor se observa una disminución de las emisiones de CO₂ por cada kilómetro recorrido, mejora en la eficiencia energética, y un aumento en el consumo de combustible con respecto a la gasolina.

Waqas et al. [82], argumentan que los combustibles basados en alcoholes poseen diversas ventajas en comparación con la gasolina que inclusive podrían elevar los límites actuales de eficiencia. En este estudio los autores evaluaron mezclas GEM a partir de la regla de iso-estequiometría basada en los trabajos de Turner et al [7], utilizando la regla de iso-estequiometria. En el estudio se prueban mezclas gasolina-etanol-metanol en bajos porcentajes. Los porcentajes de las mezclas son: 5 %, 10 %, 15 %, la investigación se realizó en un motor tipo CFR en modo de combustión SI, HCCI y modo ignición por compresión (CI por sus siglas en inglés) se evalúa en una

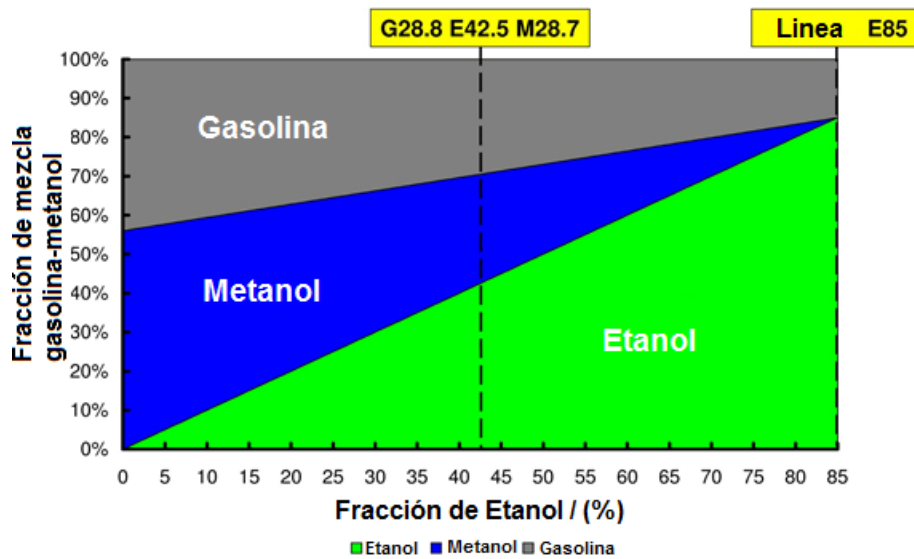


Figura 2.2: Diagrama de formulación de mezcla gasolina-etanol-metanol para relación A/C=9.71 [7].

instalación tipo “Ignition quality tester”. En el artículo también se hace énfasis que la micibilidad de la mezcla GEM es buena.

En la investigación se menciona que en la instalación se obtiene el número RON de manera indirecta ya que la instalación se encuentra modificada sin knockímetro y sensor de detonación, los cuales constituyen los instrumentos esenciales para la evaluación del número RON. Finalmente los autores concluyen que la mezcla GEM aumenta el número RON, sin embargo, cuando la gasolina base tiene un número RON bajo, al aumentar el contenido de metanol disminuye también el número RON de la mezcla, los autores de igual modo observaron que prácticamente es despreciable el efecto de la mezcla GEM en bajas proporciones como E5. Para identificar el knock presente en los ciclos se utilizó un criterio de presión pico a pico de 2 bar.

Turner et al. [83], dan continuidad a la afirmación de que para obtener mejores resultados en las propiedades de la mezcla, las proporciones se deben hacer basados en mezclas iso-estequiométrica GEM con la misma relación A/C que una mezcla gasolina-etanol. De acuerdo con los autores una de las razones para utilizar el criterio anterior de iso-estequiometría es lograr que la mezcla GEM sea imperceptible en un vehículo flex-fuel. En el estudio se argumenta que la principal razón por la cual se plantea el uso de E85 es que este representa el límite de los automóviles flexfuel.

En el estudio se obtiene las propiedades de cada combustible, así como también las propiedades de la mezcla. Además se reportan, las emisiones contaminantes obtenidas en el escape del motor. La metodología para obtener las características fisicoquímicas de las mezclas y los valores de volatilidad obtenidos en la curva de destilación de cada una de las mezclas. Se realiza un estudio de la reactividad con los componentes metálicos del motor, la estabilidad de la mezcla, tolerancia al agua y compatibilidad con material elastómero.

En el estudio se reporta la comparación entre los números RON y MON de las mezclas y las realizadas en un estudio previo, obteniendo que la tendencia es similar y una relación de linealidad de los números de octano dependiendo de la mezcla. El estudio concluye que en lo que concierne a los números de octano se observa una disminución del número RON y MON cuando la gasolina base posee un bajo número de octano.

Sileghem et al. [84], realizaron un estudio de mezclas ternarias GEM similares a E85 la investigación se realiza en un motor de cuatro cilindros comercial donde se miden las emisiones y el desempeño, posteriormente en un motor mono-cilindrico de alta relación de compresión, se evalúa la aparición del knock en la combustión de las mezclas.

Los resultados de las mediciones se compararon con lo obtenido utilizando gasolina y alcoholes puros, la investigación válida el potencial de las mezclas ternarias al obtener resultados similares en tiempo de retraso de ignición y duración de la combustión, en las mezclas GEM a los resultados de E85. En desempeño se observó un aumento de la eficiencia térmica al freno de las mezclas GEM con respecto a la gasolina para un torque fijo de 40 Nm y 80 Nm, así como una disminución de emisiones de CO para regímenes de velocidad de 2200 a 3200 rpm.

Turner et al [85], realizaron un estudio acerca de la mezcla gasolina-etanol-metanol comparando dicha mezcla con una mezcla del E85 para obtener condiciones isoestequiométricas, además se reporta en el trabajo la densidad energética de cada biocombustible y el desempeño energético de cada uno.

Elfasakhany [86], realizó un estudio del desempeño y emisiones de mezclas GEM con contenidos de 3-10 % en volumen de alcohol en un motor monocilindrico con relación de compresión igual a 7 ,evaluado a regímenes de velocidad de 2600- 3450 rpm. El autor reporta un aumento en la eficiencia volumétrica, torque y potencia al freno para las mezclas GEM con respecto a la gasolina, además de un aumento en las emisiones CO₂ de todas las mezclas GEM y una disminución en CO y HC.

En la línea de análisis de las emisiones de las mezclas GEM, Schifter et al. [87], realizaron una investigación de las emisiones de una flota de vehículos de múltiples modelos y años para evaluar sus emisiones en operación. Los autores reportan que si bien se observó una disminución de las emisiones de determinados hidrocarburos, recalcan que la disminución no es significativa, por otro lado, el consumo de combustible se mantuvo constante en la prueba comparando a la gasolina y a las mezclas GEM.

2.3 KNOCK Y AUTOIGNICIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

2.3.1 EL FENÓMENO DE AUTOIGNICIÓN

Para el buen funcionamiento de los motores de combustión interna es necesario que la combustión se lleve a cabo de forma normal, para lograr esto una de las características fundamentales son: las propiedades del combustible y el estado termodinámico de la mezcla aire combustible. De acuerdo con lo revisado en la literatura, el fenómeno de autoignición es aquel en donde una mezcla de aire-combustible comienza a quemarse de manera espontánea sin existir una fuente de ignición que lo encienda [88], lo cual posteriormente genera el knock. Existen varias teorías que apuntan hacia diversos factores que propician la autoignición algunas de las teorías son:

- Puntos calientes en superficies.
- Gases calientes de ignición.
- Aceleración del frente de llama y la posterior detonación.

La autoignición es un fenómeno indeseable de la combustión, ya que por su naturaleza espontánea genera otro frente de llama el cual entra en choque con el frente de flama generado por el disparo de la bujía [88].

La primera característica que detona la autoignición es el estado termodinámico de los gases de combustión, teniendo mayor importancia la temperatura. La segunda característica es la reactividad que tenga el combustible al ser quemado, ya que reaccionaran de diferente manera a la temperatura y presión.

Debido a que la autoignición es una característica de la reactividad de una mezcla a determinadas condiciones de temperatura y presión, algunos autores coinciden en caracterizarla como el parámetro “retraso del tiempo de ignición” que se define como el tiempo que tarda en autoencenderse una mezcla a partir de una perturbación de

la presión, elevándose la temperatura y presión en la cámara que lo contenga. Experimentalmente existen dos equipos comúnmente utilizados para obtener el retraso del tiempo de ignición:

Tubo de choque: el equipo consiste en un tubo de acero inoxidable de gran longitud (5 a 10 m aprox.), el cual se divide en dos cámaras instrumentadas con sensores de presión. Dichos sensores miden la presión a partir de la cual se obtiene el valor de retraso de la ignición (Figura 2.3).

Máquina de compresión rápida: consiste en un equipo que tiene una cámara con volumen variable a partir del movimiento de dos pistones, dentro del volumen se contiene la mezcla, cuando se eleva la presión, se genera la ignición de la mezcla; dentro de la cámara hay sensor de presión, el cual nos permite medir el aumento de presión, a partir de esta variable se obtiene el retraso del tiempo de ignición (Figura 2.3).

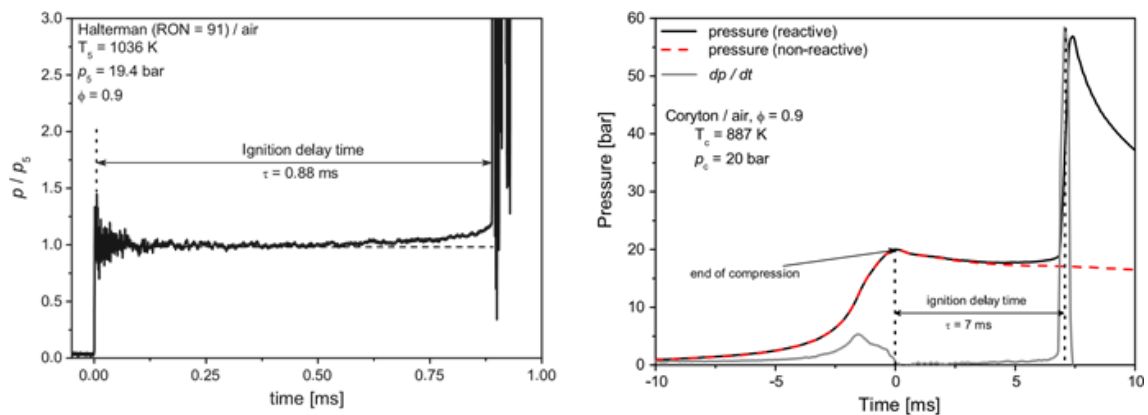


Figura 2.3: Gráfica de retraso de ignición para a)Tubo de choque, y b)Máquina de compresión rápida [8].

En lo que respecta al modelado de la autoignición de mezclas sin quemar en motores de encendido por ignición, suele estar basados en expresiones semiempíricas o en complejos mecanismos químicos de combustión. Existe un enfoque empírico ampliamente empleado que consiste en aplicar el principio de conservación de retraso propuesto por Livengood et al. [89]. De acuerdo con este enfoque, el tiempo total de retraso de ignición puede ser encontrado integrando su valor instantáneo durante la compresión y carrera de combustión. Analíticamente esto se expresa por:

$$\int_{t_{ivc}}^{t_{ko}} \frac{dt}{\tau(t)} = 1 \quad (2.1)$$

donde t_{ivc} y t_{ko} son el momento en el cierre de la válvula de admisión y el inicio del knock respectivamente y $\tau(t)$ es el tiempo de retraso de ignición instantánea.

El tiempo de retraso de la ignición τ (en microsegundos) es el tiempo durante el cual una mezcla aire-combustible debe ser mantenida a una temperatura constante, y una presión constante antes de que se auto-encienda [66].

El tiempo de retraso de la autoignición τ a la presión instantánea del cilindro p (en Pascales), temperatura de la mezcla sin quemar T (en grados Kelvin), y una composición dada es típicamente descrita por una expresión de Arrhenius que representa la tasa de tiempo limitante de la autoignición:

$$\tau = Ap^n e^{\frac{B}{T}} \quad (2.2)$$

donde A , n y B son parámetros que dependen de la composición de la mezcla.

La integral de Livengood-Wu es un indicativo del momento en que la autoignición se producirá en una mezcla completamente homogénea. La suposición de que la mezcla sea completamente homogénea es poco probable en la práctica y la autoignición se activará mediante “puntos calientes” [90]. Los puntos calientes pueden ser regiones térmicas no homogéneas producto de válvulas calientes, transporte turbulento durante compresión y grandes gradientes de esfuerzos viscosos en la capa límite [90]. Sin embargo, este tipo de modelos suelen estar limitados en el sentido de que no permite identificar los puntos calientes o la localización del lugar de la autoignición. Para considerar estos efectos es necesario un modelo multizona o CFD en 3D empleando mecanismos químicos detallados.

Yates et al. [91, 92] propusieron un modelo empírico con una simplificación del tiempo de retraso global de ignición dividiéndolo en cuatro procesos. Estos comprenden (a) un retraso de pre-flama fría a temperatura constante, (b) un incremento instantáneo de la temperatura de flama fría, (c) un retraso adicional a temperatura

constante, y (d) la autoignición final exotérmica. Se asume que esta secuencia de reacción exotérmica puede ser representada por la expresión de Arrhenius simple que representa el paso neto que limita la velocidad, es decir:

$$\tau = \Phi^\beta A_h p^n e^{\frac{E}{T}} \quad (2.3)$$

donde el perfil de temperatura exhibe un paso distinto en el punto de inicio de flama fría. El cálculo del retraso global de ignición debe realizarse en dos etapas, aplicando el principio de conservación del retraso, propuesto por Livengood y Wu, es decir:

$$\int_{t_0}^{t_1} \frac{dt}{\tau_{h,i}} + \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{\tau_{h,CF}} = 1 \quad (2.4)$$

donde t_1 se define por la aparición de la flama fría y su aumento de temperatura asociado, t_2 representa el tiempo de retraso global de ignición. Los retrasos de autoignición, $\tau_{h,i}$ y $\tau_{h,CF}$ representan el retraso de reacción exotérmica característica evaluado en la condición inicial y posterior a la flama fría respectivamente.

Si la presión y la temperatura son aproximadas como constantes durante cada etapa, (y tomando t_0 como cero), la integral se simplifica. Al reorganizar, se obtiene el tiempo total de retardo de encendido, t_2 , como:

$$t_2 = t_1 + \tau_{h,CF} * \left(1 - \frac{t_1}{\tau_{h,i}}\right) \quad (2.5)$$

2.3.2 AUTOIGNICIÓN EN ALCOHOLES Y MEZCLAS.

Algunos combustibles como el metanol, etanol y varias moléculas aromáticas y olefínicas no exhiben la flama fría, por lo cual utilizar la expresión de Arrhenius es inadecuado. Sin embargo, se han generado correlaciones empíricas para ligeros alcoholes a través de experimentos en máquinas de compresión rápida, tubos de

choque y cálculos de cinética química [93]. Sileghem et al. [66], utilizaron una correlación basada la cinética química de la reacción de metanol resultando en tiempos de retraso de la autoignición que se ajustan a la Ecuación 2.2, pero que toman en consideración el gas residual f , como lo publicado por Douaud et al. [94] obteniendo la siguiente ecuación:

$$A = A_0 \varphi^\beta (1 + f)^n \quad (2.6)$$

siendo A un factor exponencial de la Ecuación 2.2, tomando en consideración esta correlación es posible determinar el tiempo de retraso de ignición para alcoholes ligeros.

Sileghem y Vancoillie [66, 60], utilizaron una regla de mezcla basada en la fracción de volumen de cada componente, para predecir el retraso de encendido de una mezcla de metanol y un combustible de referencia primario. De acuerdo con los autores para obtener el tiempo de retraso de ignición se puede utilizar una sumatoria de los tiempos de cada uno de los componentes.

$$\tau_{blend} = \sum_{i=1}^n \alpha_i * \log(\tau_i) \quad (2.7)$$

donde α representa la fracción volumétrica, molar o másica de cada componente y τ el retraso de ignición de cada componente.

2.3.3 EL FENÓMENO DEL KNOCK.

El knock es el sonido asociado con la combustión anormal en donde una mezcla aire-combustible no se ha quemado, comúnmente conocida como “gas final”, se quema en un punto o puntos múltiples en un instante indeseado por delante del frente de llama propagante [88]. Esta combustión anormal generalmente resulta en un aumento pronunciado de la presión local por encima de lo normal, debido a la rápida liberación de energía contenida en el gas final. El rápido aumento de presión posteriormente crea ondas de presión que se propagan a través de la cámara de combustión a alta velocidad. Las ondas de presión no son del todo disipadas cuando entran en contacto por primera vez con la pared del cilindro. En cambio, las ondas son reflejadas de vuelta a través de la cámara. Las oscilaciones de las ondas de presión tienden a poner la totalidad de la cámara de combustión a su frecuencia de resonancia, lo cual resulta en un fuerte silbido metálico, ruido que define el knock. De esta forma se define al knock o las oscilaciones de presión como consecuencia del fenómeno de la autoignición (Figura 3.7).

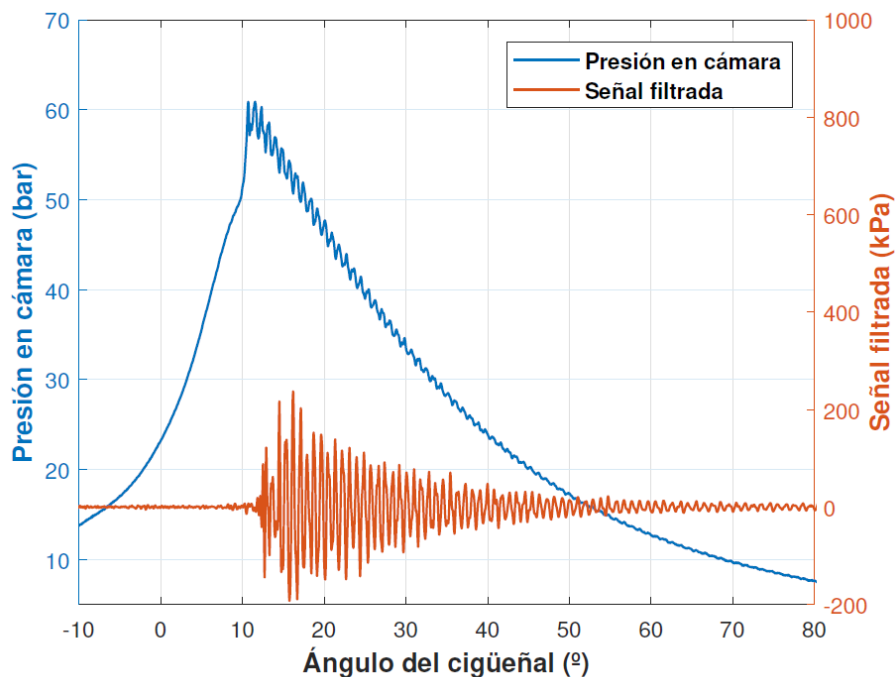


Figura 2.4: Gráfica de presión en cámara y knock en un ciclo de motor [9].

La medición experimental del knock a inicios del siglo XIX representaba una barrera para diseñar vehículos con mayor eficiencia térmica. Sin embargo, en 1922 el comité cooperativo de investigación en combustible CFR (por sus siglas en inglés) dirigió sus esfuerzos para obtener un método que pudiera medir el knock; numerosos estudios fueron conducidos para estudiar el efecto de varios parámetros tales como, la temperatura al inicio, o tiempo de disparo de la bujía en la intensidad del knock.

En 1929 Waukesha Motor Company diseñó el motor de compresión variable tipo CFR, el cual es un estándar para la medición de octanaje. Como resultado, se formuló un procedimiento de medición estandarizado para la evaluación del combustible basado en la escala de 0 a 100 de mezclas de iso-octano y n-heptano, culminando en el método que corresponde al número de octano de investigación (RON por sus siglas en inglés) dicha evaluación se realiza en el motor tipo CFR. Años después se diseñó otro procedimiento para condiciones más severas, dicho procedimiento es: el número de octano de motor (MON por sus siglas en inglés) ambos procedimientos han sido los principales métodos de evaluación de combustibles.

Tanto el RON como el MON están diseñados para medir la propensión de un combustible al knock a una relación de compresión dada. Para determinar el número de octano, se ejecuta el motor CFR con el combustible de prueba, por ejemplo, gasolina sin plomo, en las condiciones especificadas. Basado en la lectura del “medidor de detonación” (una parte estándar del motor CFR), la relación de compresión aumenta hasta que el medidor indique una intensidad de detonación de aproximadamente 50. La prueba es repetida con dos mezclas de combustibles de referencia primarios (PRF por sus siglas en inglés) que tienen número de octano conocido, las cuales determinaran la capacidad nominal del combustible de prueba. El número de octano es entonces obtenido por interpolación basada en los combustibles de referencia [95, 96].

Además del RON y MON, existen otros métodos diferentes de caracterización del knock, los cuales han sido desarrollados y puestos en práctica. En contraste con una medida exclusiva como el medidor de detonación en el motor CFR, los métodos

se basan en el uso de un transductor de presión dentro del cilindro. Sin embargo, uno de los inconvenientes de la caracterización del knock por estos métodos, es que varían mucho dependiendo de la ubicación del transductor de presión y la geometría de la cámara de combustión. A continuación se expone una buena revisión de los diferentes métodos de medición del knock:

1. La amplitud máxima de la oscilación de presión se utilizó para definir la intensidad del knock, por Heywood [88], así como Benson [97]. Un filtro de paso de banda se aplica a la señal de presión con un período de ventana de 30° antes del punto muerto superior a 70° después de PMS.
2. La diferencia entre los valores máximo y mínimo de la oscilación de presión fue utilizada por Swarts et al. [98]. De manera similar, se aplicó un filtro de paso de banda a la señal de presión en un rango de 5 a 25 kHz. La intensidad del knock resultante es el doble del enfoque anterior.
3. Se introdujo la tercera derivada de la señal de presión con respecto al tiempo por Checkel et al. [99]. Aunque afirmaron que este método produjo un mayor valor absoluto cuando se produjo el knock, la intensidad del knock obtenida en realidad depende de la frecuencia de muestreo.
4. La magnitud de las oscilaciones de presión promediadas en un ángulo de ventana de 20 grados de cigüeñal, también conocida como KI20, fue utilizada por König et al. [100]. KI20 se encontró que se correlaciona bien con el ángulo del cigüeñal de inicio del knock.
5. La suma de la señal de presión de pico corregida en varios ciclos fue utilizado por Brunt [101].
6. Métodos de energía que involucran la transformada rápida de Fourier (FFT) y la densidad espectral de potencia (PSD), se han utilizado comúnmente para caracterizar el knock [102, 101]. La frecuencia del knock calculada utilizando estos métodos puede compararse con la estimación teórica de las frecuencias de modo resonante en la cavidad del cilindro, como se describe abajo.

Las ondas de presión inducidas por la ocurrencia del knock pueden modelarse ajustando una solución de la ecuación de onda para el sonido a los límites geométricos de la cámara de combustión [103]. De acuerdo a la ecuación 2.8 f_{mn} es la frecuencia de resonancia estimada (Hz) para el modo m y n , está dada por [101]:

$$f_{m,n} = \frac{C\rho_{m,n}}{\pi B} \quad (2.8)$$

donde C es la velocidad acústica (m/s), $\rho_{m,n}$ es el factor de modo resonante, B es la diámetro interior del cilindro (m), m es el número de modo de oscilación circunferencial y n es el número de modo de oscilación radial. Usando la ecuación anterior y asumiendo la velocidad del sonido a 950 m/s, la primera frecuencia de resonancia circunferencial del motor CFR es aproximadamente 6.7 kHz. No obstante, la frecuencia de knock en los motores modernos debería diferir de la del motor CFR, ya que esta frecuencia depende de la geometría de la cámara de combustión [42].

2.4 EMISIONES CARACTERÍSTICAS EN MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO

Las emisiones contaminantes en los motores de encendido provocado han resultado ser uno de los más importantes desafíos en la evolución de los motores. Para los motores a gasolina las emisiones más representativas resultan ser la siguientes:

CO₂: El dióxido de carbono es el producto de una combustión completa de un hidrocarburo y el oxígeno, la producción de CO₂ depende de diversos factores como el dosado, temperatura o la concentración de oxígeno, a pesar de ser un gas de efecto invernadero lo cual implica que sea regulado, el dióxido de carbono resulta ser preferido en comparación con otros productos incompletos de la combustión debido a que implica una mayor eficiencia de combustión en un motor, sin embargo, también se intenta disminuir.

CO: El monóxido de carbono representa la oxidación incompleta de los productos de la combustión un dosado pobre tiene como efecto altos niveles de CO debido a la lenta tasa de oxidación y corto tiempo de residencia. El hecho de que el CO sea un producto incompleto de la combustión implica una ineficiencia al momento de quemar combustible, por lo cual se intenta disminuir.

O₂: La presencia alta de oxígeno en el escape de los motores puede significar varios fenómenos, por un lado la falta de combustión en mezclas ricas y estequiométricas, lo cual significa que hubo falta de combustión de toda la mezcla, en consecuencia, dispararía los hidrocarburos no quemados, por otro lado, también puede significar la aplicación de un dosado pobre en la mezcla y el sucesivo exceso de oxígeno. El oxígeno no es una emisión negativa, y su presencia simplemente es relativa a otras emisiones presentes en los gases de escape.

HC: La aparición de estas emisiones se debe a la falta de oxidación de los hidrocarburos durante el proceso de combustión, esto sucede por diversas razones, ya sea que el dosado no se encuentre dentro de los valores óptimos, un dosado pobre genera

valores altos de HC. También la formación de compuestos intermedios durante la combustión, los cuales no tienen un tiempo suficiente para oxidarse. Entre los hidrocarburos no quemados se distinguen el metano y los que no lo son, la razón de ello se debe al potencial del daño que tiene el metano en la atmósfera.

NO_x : Es una mezcla de varios compuestos derivados de la oxidación total o parcial del nitrógeno molecular; el monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), óxido nitroso (N_2O), trióxido de dinitrógeno (N_2O_3), tetróxido de dinitrógeno (N_2O_4), y pentóxido de dinitrógeno (N_2O_5). Entre ellos, el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) son los más destacados. El óxido nitroso es un gas incoloro e inodoro. Su concentración ambiental suele ser mucho menor que 0.5 ppm. El dióxido de nitrógeno es un gas corrosivo, tóxico y de color marrón rojizo. La emisión de NO_x puede darse por concentraciones ricas en oxígeno y nitrógeno, que presenta picos de temperatura, y con el tiempo de residencia suficiente para que se produzca su reacción.

PM: El material particulado constituye una emisión que puede estar en dos estados, bien se puede encontrar pequeñas gotas de compuestos formados de hidrocarburos, los cuales no se lograron oxidar, también se puede encontrar material particulado en forma de sólidos con potenciales daños a la salud humana, razón por la cual se han comenzado a regular. El material particulado puede darse en zonas de falta de mezcla aire-combustible, como por zonas frías que generan una oxidación parcial del hidrocarburo.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

El objetivo de este capítulo es la descripción de la metodología seguida para el estudio del knock de la mezcla ternaria gasolina-etanol-metanol, además de describir las herramientas experimentales, y toda consideración ocurrida durante la etapa experimental de la investigación.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La instalación experimental *Motor CFR* es empleada para llevar a cabo esta investigación, la cual tiene como parte principal, un motor mono-cilíndrico de compresión variable CFR, el cual era utilizado para medir el octanaje. La instalación cuenta con los sistemas auxiliares suficientes que permiten su funcionamiento, así como el control y monitorización de las variables de interés (Figura 3.1). El proceso de puesta a punto y automatización de la instalación experimental, así como las características técnicas de todos sus componentes, es explicado en detalle en la tesis de P. Gómez-Gordo [104], y en la tesis G. Rubio [9]. No obstante, en el presente documento se realizará una breve descripción de los principales sistemas que integran la instalación.

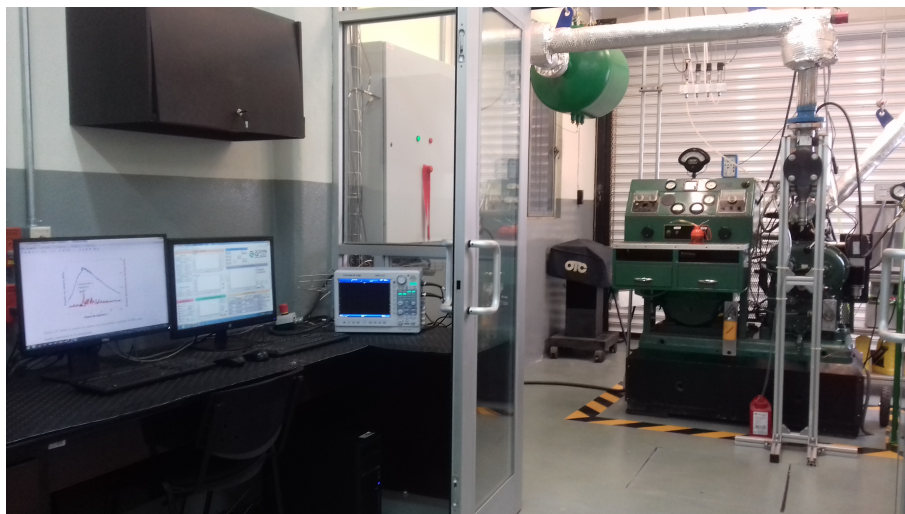


Figura 3.1: Instalación experimental "Motor CFR".

Sistema de Variación de Relación de Compresión: Este sistema cuenta como parte principal con un motor eléctrico a pasos y sensores de inicio y final de carrera. Con este sistema la instalación tiene la posibilidad de variar y controlar la relación de compresión del motor en el rango de 4 a 16.

Sistema de Control de Temperatura: El sistema de control de temperatura tiene como principales componentes, una resistencia de 2 KW y 7 termopares distribuidos en la instalación. A través del uso de este sistema se puede controlar la

temperatura de admisión del aire. La temperatura es monitorizada constantemente para su control según se demande en el experimento.

Sistema de Ignición: El objetivo de este sistema es la energización adecuada y sincronizada de la bujía para efectuar el disparo en el instante correcto. Los componentes principales de este sistema son la bobina de energización y la bujía.

Sistema de Inyección: El objetivo de este sistema es la inyección de la cantidad exacta de combustible al ducto de admisión para su posterior ingreso a la cámara de combustión. Los principales componentes de este sistema son: el inyector y la línea de alimentación de combustible.

Sistema de adquisición de datos: Este constituye uno de los ejes principales del motor, ya que la adquisición de datos se efectúa en la instalación en tiempo real a diferente tasa de adquisición de datos, siendo la señal de presión una de las variables de alta frecuencia y más importantes. Los dispositivos que conforman el sistema son: sensor de presión en cámara, sensor encoder, osciloscopio Yokogawa, modulo CompaqRio, y equipo de computo.

Sistema de refrigeración: El objetivo de este sistema es mantener constante la temperatura del motor de combustión, lo cual se logra a través del uso de un baño térmico.

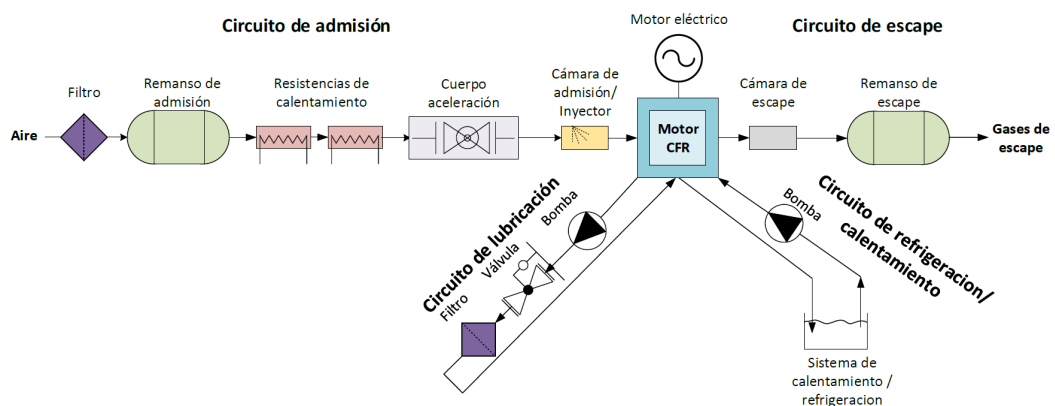


Figura 3.2: Diagrama de los principales sistemas de la instalación experimental “Motor CFR”.

Como se muestra en las Figuras 3.1 y 3.2, la instalación experimental cuenta con todos los sistemas auxiliares necesarios para su correcto funcionamiento, según lo

dispuesto en las normas ASTM D2699 y D2700 [96, 95]. El motor eléctrico mostrado en la Figura 3.2 permite el movimiento del motor en arrastre a una velocidad constante de 900 r.p.m. La instalación cuenta con sistemas de seguridad que pueden detener automáticamente el motor eléctrico en caso de que la presión de aceite en el circuito de lubricación sea inferior a de 25 psig.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS

Los combustibles empleados en la presente investigación han sido gasolina sin plomo tipo Magna, proporcionada por Petróleos Mexicanos (PEMEX), y alcoholes (metanol, etanol) de pureza (99.5 %) de la marca CTR Scientific. Las propiedades de los combustibles puros utilizados en la investigación se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Propiedades de los combustibles puros.

Propiedad	Gasolina	Metanol	Etanol
Formula molecular	-	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH
Poder calorífico (MJ/kg)	43.516	21.7377	28.1387
Temperatura de autoignicion (°C)	250	455	464
Numero de Octano	87	98.6	101
Calor de vaporización (kg/KJ)	340	1100	855
Relación A/C	14.7	6.429	8.9431
Densidad a 20°C	0.7231	0.7915	0.7895

El poder calorífico de las mezclas de GEM se obtiene con base a la norma ASTM D5865, en dicha norma el poder calorífico se obtiene mediante la combustión controlada de 1 gr del combustible dentro de una bomba calorimétrica presurizada con oxígeno, en dicha metodología se visualiza el cambio de temperatura del agua destilada que rodea la bomba calorimétrica. La bomba calorimétrica utilizada es una bomba marca PARR modelo 1341EB ver Figura 3.3.



Figura 3.3: Bomba calorimétrica para obtención del poder calorífico.

La densidad a 20 °C de las mezclas de combustibles se obtienen a partir de la gravedad específica a 20 °C, las pruebas se obtuvieron mediante un densímetro modelo 3510LC070 de la marca Allafrance, en cumplimiento con la metodología conforme a la norma ASTM D4052 [98], y aplicando la Ecuación 3.1:

$$\rho_{15^\circ} = G_{esp20^\circ C} * \rho_{agua20^\circ} \quad (3.1)$$

donde $\rho_{20^\circ C}$ es la densidad del líquido a 20 °C en g/cc, $G_{esp20^\circ C}$ es la gravedad específica obtenida experimentalmente a 20°C y $\rho_{agua,20^\circ C}$ es la densidad del agua a 20 °C dicho valor se toma como 0.998 g/cc.

El número de octano y la temperatura de autoignición de la gasolina fueron obtenidos de la hoja de seguridad del producto, proporcionada por PEMEX [99]. La temperatura de autoignición, el peso molecular, y el calor de vaporización de los alcoholes se obtuvieron del informe de laboratorio entregado por el fabricante, al adquirir los mismos.

3.3 MATRIZ DE ENSAYOS

La matriz de ensayos se diseñó con base en las variables que afectan el proceso de combustión, concretamente, relación de compresión del motor, la mezcla GEM en cuestión y la temperatura de admisión del aire. Dichas variables producirán diferentes resultados en los dos parámetros a medir los cuales son: la presión en cámara y las emisiones. Cabe mencionar que los parámetros derivados del análisis de la presión en cámara, que son la intensidad del knock y la frecuencia de aparición del knock, son variables que no se monitorizan en tiempo real. A continuación se expone en la Tabla 3.2 las variables a modificar.

Tabla 3.2: Matriz de variables a modificar durante la experimentación.

RC	Mezcla	Temperatura de admisión de aire ($^{\circ}$ C)
4.46	G100	38
7.36	G95.8 E2.5 M1.7	60
9.15	G91.5 E5 M3.5	
9.5	G86.5 E9.5 M3.7	
	G83 E10 M7	
	G96 E1.5 M2.5	
	G92 E3 M5	
	G87.5 E4 M7.5	
	G84 E6 M10.2	

La experimentación consta de 72 ensayos, los cuales se repetirán dos veces más de manera que se obtenga datos en tres ocasiones para la combustión, más una para el arrastre, el objetivo de esto radica en el hecho de que la instalación por cada adquisición de datos adquiere lo equivalente a 35 ciclos, en consecuencia, en tres adquisiciones se obtiene datos de 105 ciclos, esto con el objetivo de obtener mediante técnicas estadísticas, el promedio de los fenómenos medidos.

La selección de la relación de compresión se establece con base en la norma ASTM D2700 [95] para medición de octanaje, además, se ha hecho esta selección para comparar directamente con respecto a lo publicado por [9, 105], quienes reportan estudios a tales relaciones de compresión con mezclas gasolina-etanol. Las mezclas GEM fueron seleccionadas con base en las publicaciones realizadas por Waqas et al. y Turner et al. [41, 85], quienes utilizan mezclas similares a E10 y E20 para validar la tesis de la iso-estequiometría.

Las temperaturas se seleccionaron con base en la norma ASTM D2700 [95], donde se muestra que la temperatura para medición de octanaje es de $T=38\text{ }^{\circ}\text{C}$, además [106, 42] exponen las implicaciones que tiene la temperatura de admisión del aire en la combustión de mezclas gasolina-alcohol.

Algunos otros parámetros que influyen durante la experimentación son la densidad de la mezcla y la relación aire-combustible (A/C), ambos valores son definidos por el contenido de la mezcla. La densidad es un valor que se calculó a partir de la gravedad específica, propiedad que se midió experimentalmente y cuyos valores se muestran en la tabla 4.1 en la sección de resultados.

Dos parámetros más que afectan el proceso de combustión son: el tiempo de inyección y el retraso del disparo de la bujía. El tiempo de inyección se mantuvo constante para un mismo ensayo, se modifica entre cada mezcla y a diferente temperatura. Esto se debe a que el programa de control de la instalación calcula automáticamente el tiempo que debe estar abierto el inyector para alcanzar la relación A/C deseada, lográndolo a través de la señal de aire de admisión al motor. Dado que la densidad del aire varía en función de la temperatura, en consecuencia, al modificar la temperatura de admisión del aire se obtiene diferente flujo másico del mismo a la admisión, por lo tanto el programa deberá de modificar el tiempo de inyección para lograr la relación A/C definida con anterioridad.

Finalmente, la apertura del cuerpo de aceleración se posiciona en totalmente abierto, esto se decide debido a que el fenómeno del knock se potencializa al añadir más carga al motor que sucede con la apertura total de la válvula. El dosado para todos los

ensayos se define en 1, lo cual implica que la combustión se realiza en condiciones teóricamente estequiométricas.

3.4 ANÁLISIS DE EMISIONES

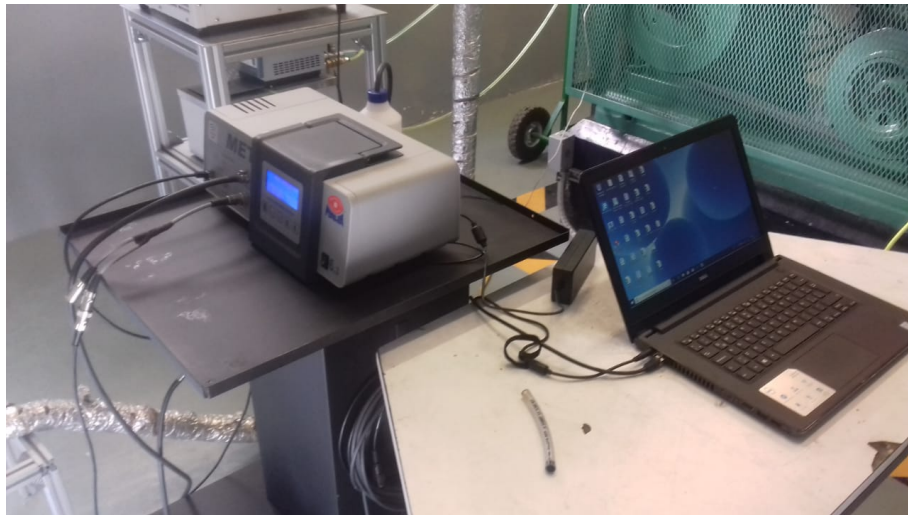


Figura 3.4: Equipo analizador de emisiones MAHA MET 6.3.

La actividad del análisis de emisiones tiene como objetivo cuantificar el contenido de emisiones generadas por el motor, para ello se utilizó un analizador de gases marca MAHA modelo MET 6.3 (Figura 3.4), las características técnicas del analizador se enumeran a continuación:

Para el análisis de las emisiones fue necesario realizar el siguiente procedimiento con el equipo:

- 1.- Encender el analizador de gases y permitir su calentamiento.
- 2.-Realizar el ajuste cero de contenido de HC y componentes de emisiones.
- 3.-Realizar la prueba de hermeticidad de la sonda del analizador de gases.
- 4.-Configurar el equipo en prueba de motor a gasolina en el modo dinámico.

Tabla 3.3: Características técnicas del analizador de gases Maha MET 6.3.

Parámetro a medir	Rango de medición	Precisión
HC (hexano)	0 a 2,000 ppm	4 ppm abs.
HC (propano)	0 a 4,000 ppm	8 ppm abs.
CO	0 a 10 % vol	0.02 % abs.
CO ₂	0 a 15 % vol	0.3 % abs.
O ₂	0 a 25 %	0.02 % abs.
NO _x	0 a 2,000 ppm	3 ppm abs.

5.-Fijar la sonda al punto donde se va a tomar la muestra de los gases.

6.- Se inicia el análisis de emisiones tan pronto comience la combustión en el motor CFR.

Cabe mencionar que el analizador de gases tiene una capacidad limitada de computo para el modo dinámico, de manera que para cada prueba en relación de compresión, es necesario capturar los datos y finalizarlos e iniciar de nuevo en la siguiente prueba. Una vez capturados los datos se procedió a realizar lo siguiente.

El primer paso consistió en acotar los límites de los datos, esto debido a que la adquisición de datos del analizador se hace en un tiempo continuo, de manera que se grabaron las etapas en donde no hay combustión, las cuales no son de interés, así como los ciclos donde sí hay combustión.

A través de la visualización de las gráficas de emisiones se puede observar que la concentración de oxígeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono puede variar si se acortan los tiempos entre quemado y quemado. Cabe mencionar que el hidrocarburo no quemado aumenta cuando no existe la ignición, de manera que se vuelve necesario tomar los valores mínimos. Por tal circunstancia para lograr una adquisición de resultados más uniformes, es necesario que los tiempos de inyección e ignición sean lo más constantes posibles.

El material particulado es función de lo sobrecargado que se encuentre el ambiente en el primer ciclo de combustión, de manera que se omitió la primera lectura.

Para asegurar la correcta metodología de ensayos se realizó un segundo análisis de las emisiones, ya controladas las etapas de combustión y automatizando los procesos, en consecuencia se logró obtener mayor homogeneidad en el análisis de las emisiones. Permitiendo obtener conclusiones del proceso de análisis de la misma. En la Figuras 3.5 y 3.6 se puede visualizar el comportamiento que se obtienen del análisis de las emisiones.

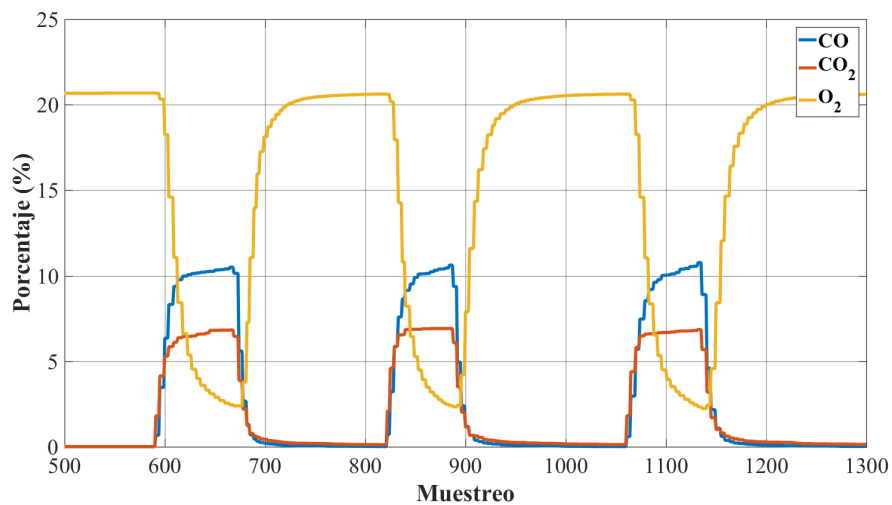


Figura 3.5: Gráfica de emisiones en porcentaje de volumen durante la combustión.

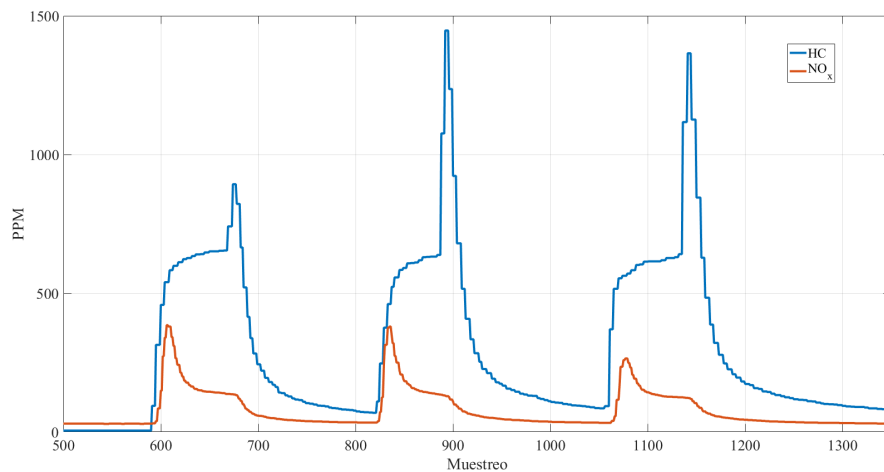


Figura 3.6: Gráfica de emisiones de partes por millón durante la combustión.

3.5 ANÁLISIS DE INTENSIDAD DEL KNOCK

De acuerdo a lo descrito en la Sección 2.4, la aparición del knock durante los procesos de combustión pueden ser detectados y cuantificados mediante diversos métodos, los cuales naturalmente tienen ventajas y desventajas. El método utilizado en el presente trabajo es el que hace uso de la señal de presión en cámara durante la combustión (Figura 3.7). El fenómeno del knock provoca la aparición de fluctuaciones de alta frecuencia, cuya amplitud decae con el tiempo y que están superpuestas a la curva típica de presión durante la combustión. De acuerdo con la literatura consultada [88, 92, 107], las componentes de la señal debidas al knock, tienen una frecuencia comprendida entre 3 kHz y 25 kHz. La componente típica de la presión durante la combustión tiene una frecuencia que es la mitad de la correspondiente a la velocidad del motor, 7.5 Hz, para el caso de 900 r.p.m.

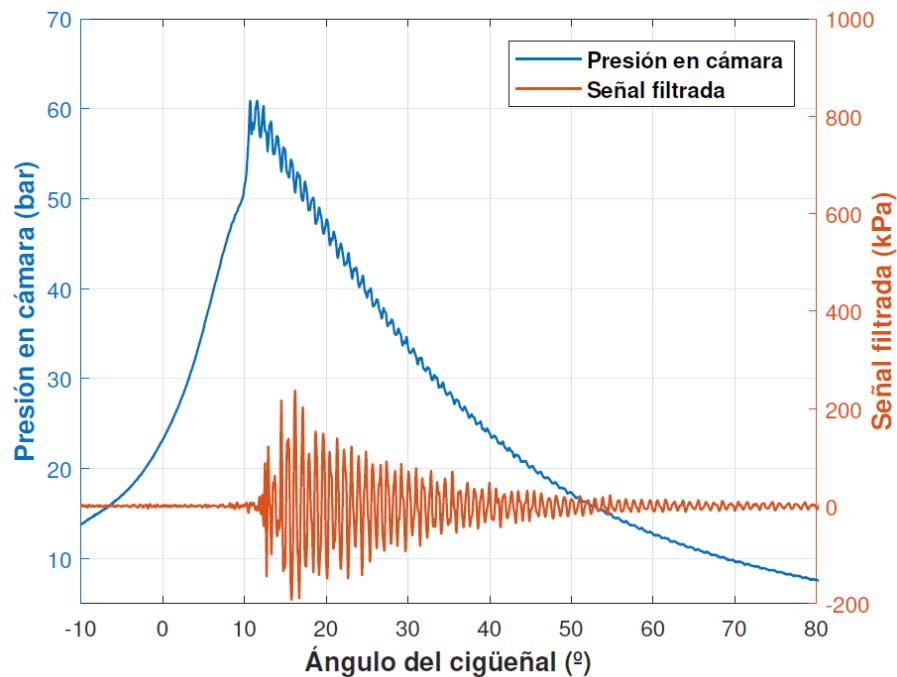


Figura 3.7: Gráfica de presión en cámara y knock en un ciclo de motor [9].

La señal de presión en cámara obtenida en los experimentos realizados es tratada mediante un filtro tipo paso-banda, cuyas frecuencias de corte inferior y superior

son de 4 kHz y 20 kHz, respectivamente [88]. Esto significa que el filtro elimina los componentes de la señal cuya frecuencia está por debajo o por encima de las frecuencias de corte. El filtro se diseñó mediante la aplicación Filter Designer, incluida en Matlab. En la Figura 3.8, se observa la interfaz de análisis de la señal de presión.

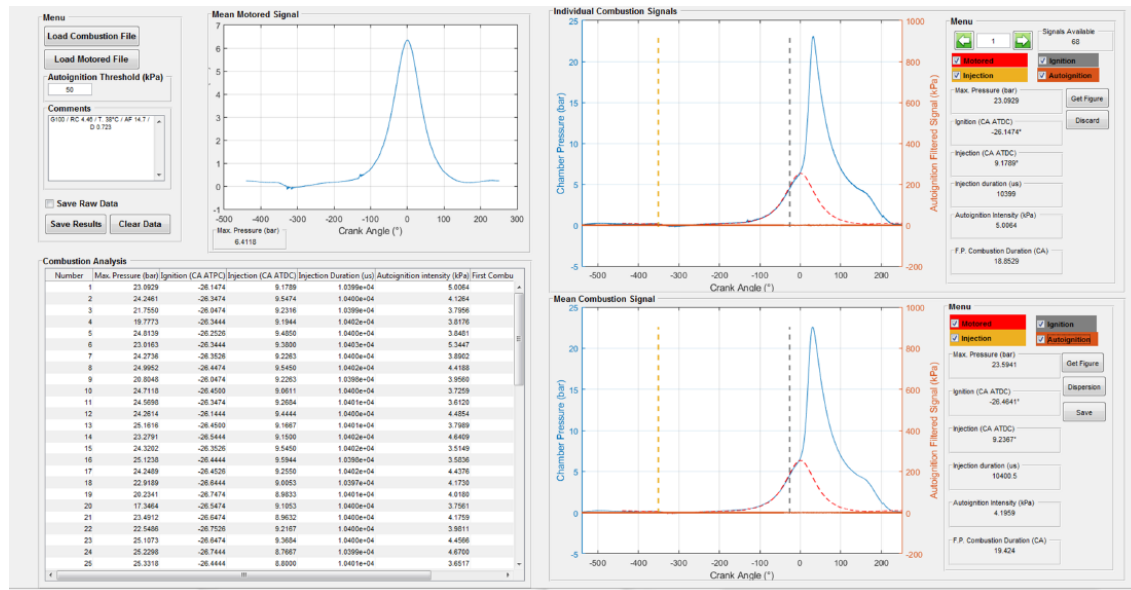


Figura 3.8: Interfaz de la aplicación de análisis de datos de la combustión.

El filtro es de tipo Butterworth y se caracteriza por mantener la ganancia lo más plana posible en la zona de paso, lo que implica que se minimizan los efectos sobre las componentes de la señal cuya frecuencia está en el rango de paso. La implementación del filtro se realiza mediante un modelo en Simulink, generado por la propia aplicación Filter Designer que procesa la señal de presión obtenida, devolviendo la señal resultante de la aplicación del filtro. Para comprobar el correcto funcionamiento del filtro diseñado, se aplica a señales senoidales puras de amplitud 1, cuyas frecuencias van de 10 Hz a 25 kHz, con un paso de 100 Hz, y se observa la máxima amplitud de la señal tras la aplicación del filtro.

Para caracterizar el fenómeno del knock en una mezcla de combustibles, y condiciones experimentales determinadas, el análisis de la señal de presión en cámara se hace para 105 ciclos de combustión, obteniendo el valor promedio de la intensidad de la autoignición. Además, el presente análisis, se obtiene la probabilidad de autoignición:

porcentaje de ciclos del total en los que se registró autoignición. Se considera que un ciclo de combustión presenta autoignición cuando la intensidad de la misma supera el valor de 50 kPa, valor a partir del cual se comprobó experimentalmente que el knock comienza a ser audible en el motor.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

El objetivo de este capítulo es presentar y discutir los resultados obtenidos en la caracterización de los biocombustibles y la combustión en el motor tipo CFR.

4.1 RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES TERMOQUÍMICAS DE LOS COMBUSTIBLES

La importancia del análisis de las propiedades de las mezclas radica en que determinadas propiedades son de especial importancia durante la etapa de inyección y su posterior combustión, algunas como la densidad es una variable necesaria por ingresar en la interfaz de la instalación, el poder calorífico por otro lado brinda una estimación de la energía liberada y su correspondiente transformación en presión dentro de la cámara de combustión. Por ejemplo, en la Figura 4.1, se muestra el aumento de temperatura del agua destilada durante la medición del poder calorífico de la gasolina. Las mezclas GEM de los combustibles se mezclaron y analizaron en el Laboratorio de Biocombustibles del LIITE. Los resultados obtenidos fueron los siguientes.

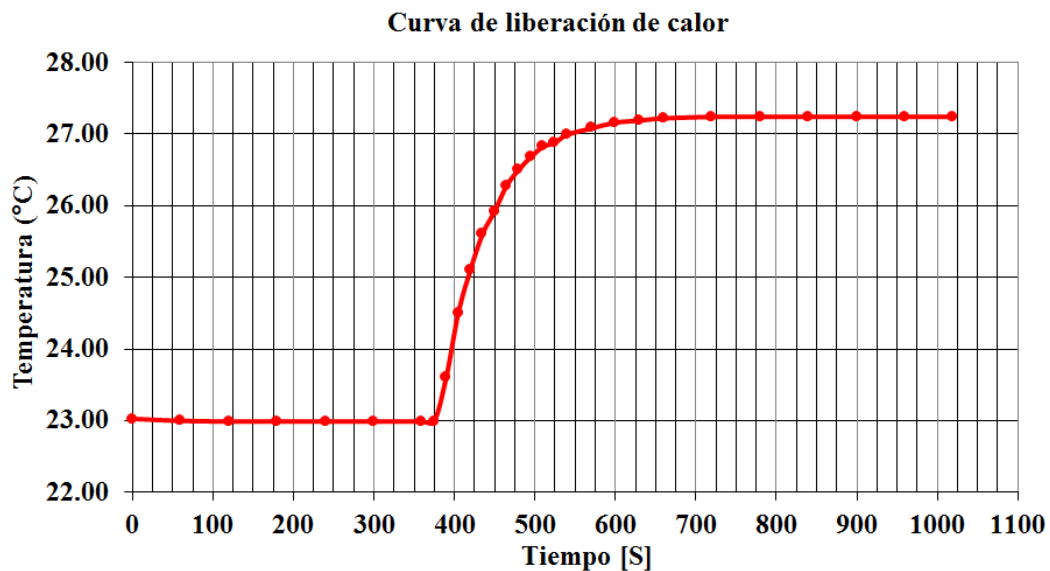


Figura 4.1: Liberación de calor de la gasolina.

Como se puede observar en la Figura 4.2, el aumento en contenido de alcohol disminuye el poder calorífico, comportamiento reportado en la literatura, además, se observa también un mayor poder calorífico en las mezclas con mayor contenido en etanol en comparación con las que tienen mayor contenido de metanol. Esto coinci-

de con la regla de iso-estequiometría [7] en donde se consideran mezclas similares al contenido de etanol.

En la Figura 4.3, se muestra que las mezclas con mayor contenido de metanol poseen mayor densidad. Dado que un menor poder calorífico implica una disminución en la presión máxima que alcanzaría la mezcla durante la combustión, la densidad de las mezclas con mayor contenido de metanol permite igualar la densidad energética de las mezclas durante su uso en el motor.

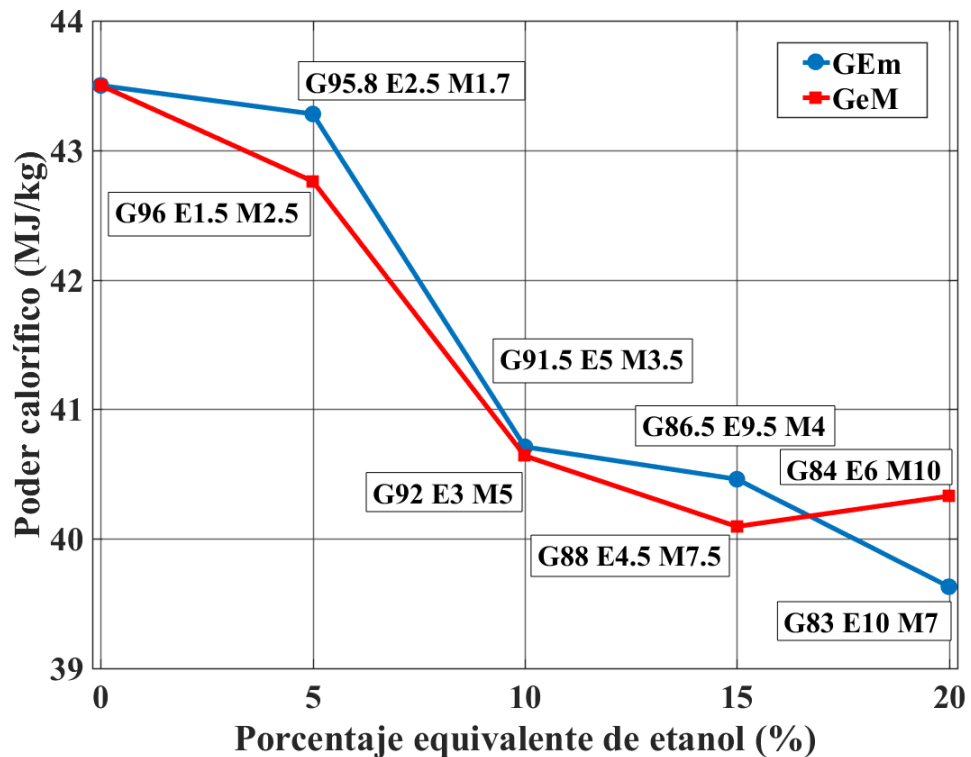


Figura 4.2: Poder calorífico de mezclas gasolina-etanol-metanol con mayor contenido de etanol (azul) y mayor contenido de metanol (roja).

A continuación en la Tabla 4.1 se muestran los resultados de las propiedades calculadas para todas las mezclas GEM:

La curva de destilación brinda información acerca de los componentes que se encuentran en un combustible y su temperatura de ebullición; existe literatura donde a partir de esta curva y mediante correlaciones empíricas se pueden obtener propiedades de los combustibles, sin embargo, para mezclas GEM no se encontró este tipo

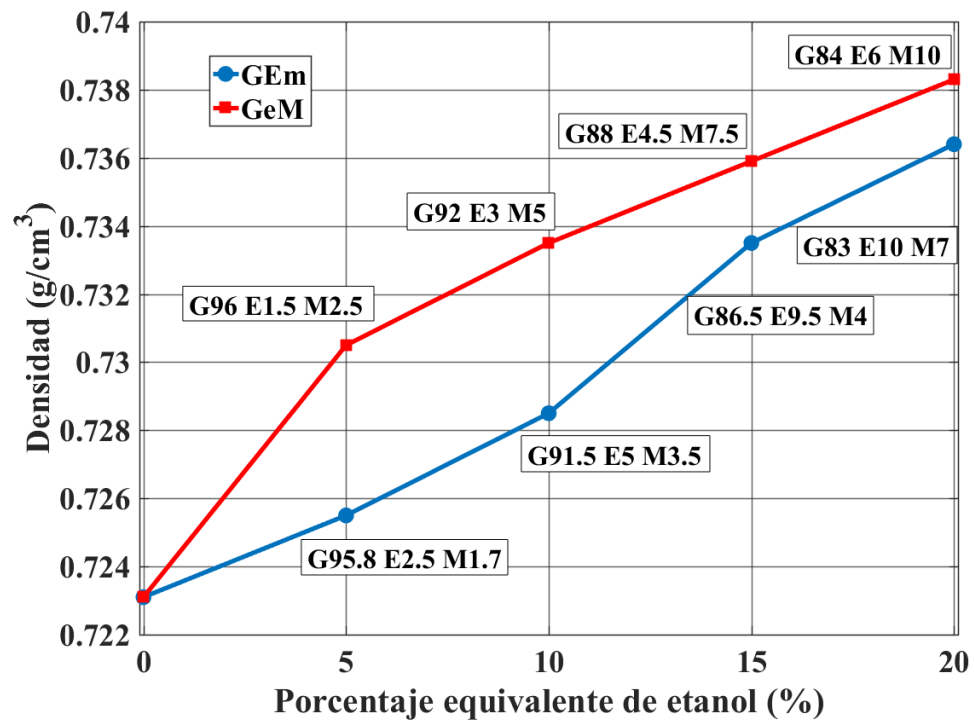


Figura 4.3: Curva de destilación de G91.5E5M3.5.

Mezcla	Poder calorífico (MJ/kg)	Densidad a 20 °C (g/cc)
G100	43.525	0.7231
G95.8 E2.5 M 1.7	43.28	0.7255
G96 E1.5 M2.5	42.76	0.7305
G91.5 E5 M3.5	40.71	0.7285
G92 E3 M5	40.64	0.7335
G86.5 E9.5 M4	40.46	0.7335
G88 E4.5 M7.5	40.092	0.7359
G83 E10 M7	39.63	0.7364
G84 E6 M10	40.33	0.7385

Tabla 4.1: Propiedades de las Mezclas GEM.

de correlaciones. En el presente documento se utiliza la curva de destilación para evaluar la volatilidad de la mezcla. La evaluación se realiza a través de la comparación de las mezclas GEM contra la gasolina de referencia tomando los valores de recuperación de volumen de destilado máximos que estipula la norma NOM-016-CRE. En la Figura 4.4, se muestra que las mezclas GEM están muy lejos de la temperatura máxima de recuperación de volumen de destilado, además se puede observar que existe un decremento en la temperatura a la cual se recuperan los porcentajes de los destilados conforme aumenta el contenido de alcohol.

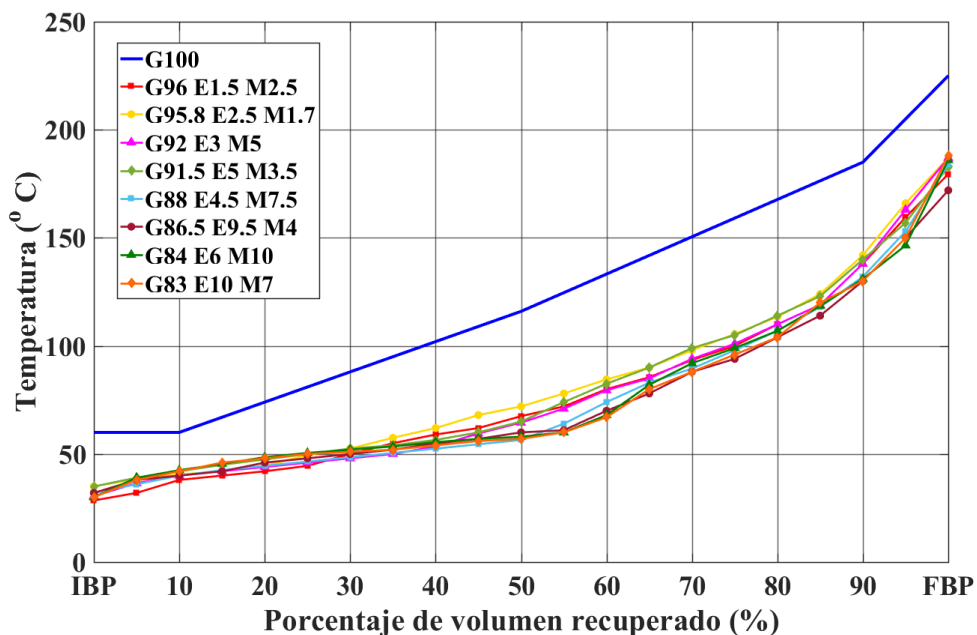


Figura 4.4: Destilación de mezclas GEM y valor máximo de referencia que estipula la NOM-016-CRE.

4.2 RESULTADOS SOBRE LA PRESIÓN EN CÁMARA

Los resultados de presión máxima en cámara se muestran en las gráficas A.1 y A.2 que se encuentran en el Anexo A.1, en dichas gráficas se puede visualizar la presión máxima en cámara a temperatura de admisión del aire de 38 °C y 60 °C, respectivamente. En estas gráficas se muestra que la disminución de la presión máxima en cámara es proporcional al contenido de alcohol, prácticamente sin importar que alcohol (etanol o metanol) esté presente, en mayor proporción. Este comportamiento se había observado en el poder calorífico; a partir de esta observación se puede validar la regla de iso-estequiometría formulada por Turner et al. [83], la cual predice que manteniendo la proporción volumétrica iso-estequiométrica y la misma relación A/C (aire-combustible) las diferencias de presión en cámara para mezclas del mismo contenido de alcohol tendrán diferencias muy bajas, las diferencias para mezclas en tales condiciones son del 5%. Por otro lado, existen también casos donde la presión máxima aumentó con respecto a lo observado en la gasolina en las mismas condiciones experimentales, por ejemplo; la mayor diferencia con respecto a la gasolina se presenta en la mezcla G92 E3 M5, ya que tiene un aumento del 9.49% respecto a la gasolina a RC=7.36 y temperatura de admisión de 60 °C. La desviación estándar para la presión en cámara alcanza un valor máximo de 2.9%.

Con el objetivo de encontrar las mezclas con mejores resultados, se calcularon las diferencias porcentuales con respecto a los resultados de la gasolina, de manera que se seleccionaron las tres mezclas con los mejores resultados tanto en emisiones, presión en cámara y knock; dichas mezclas se discuten a continuación. En la figura 4.5, se puede observar el comportamiento de la presión en cámara a temperatura de admisión a 38 °C y 60 °C de las mezclas GEM con mejores resultados, en dicha gráfica se muestra que prácticamente la presión se mantuvo constante con respecto a la gasolina, mostrando una disminución máxima de 7.5% de la presión en cámara con el uso de la mezcla G83 E10 M7. Las diferencias en la presión en cámara entre los ensayos con diferente temperatura de admisión demuestran que en la mayoría de

los casos los ensayos con temperatura de admisión de aire a 38 °C alcanzan mayor presión que los ensayos a 60 °C, esto se debe a que al aumentar la temperatura del aire de admisión disminuye su densidad, lo cual implica que para mantener la relación A/C es necesario inyectar menos combustible y en consecuencia se libera menor cantidad de energía.

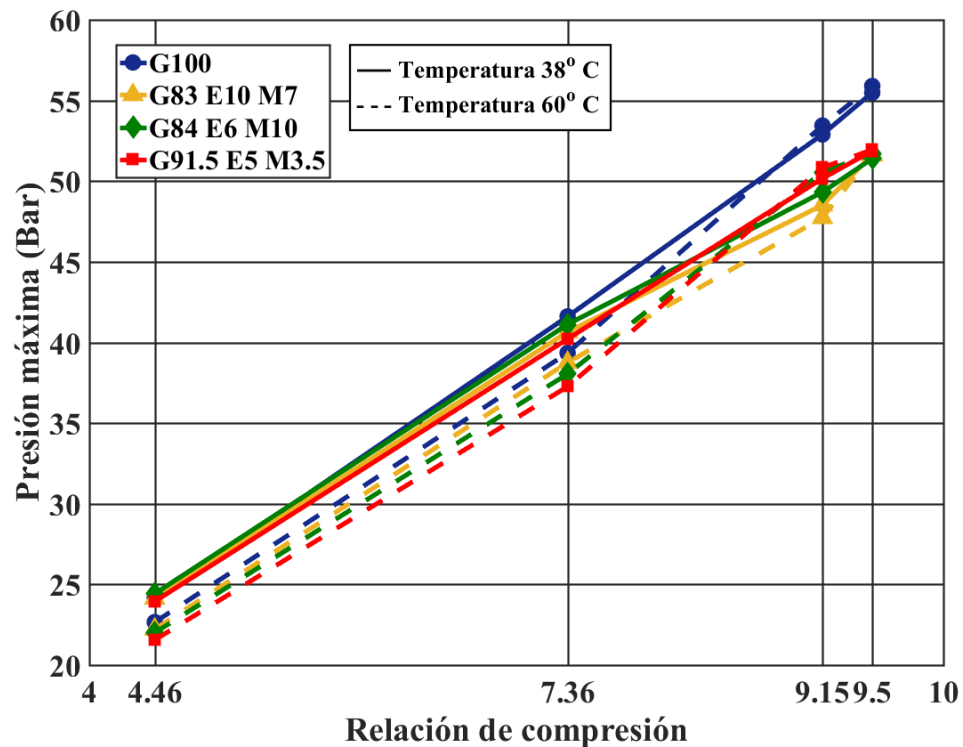


Figura 4.5: Presión máxima en cámara de mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.

Los resultados de la presión en cámara coinciden con lo reportado por Chansauria et al. [51], donde los autores reportan una disminución de la presión en cámara de mezclas con bajo contenido de alcohol con respecto a la gasolina, Eyidogan et al. [108] reportan diferencias de 6 % y 8 % para mezclas con E5 y E10, respectivamente. El resultado de la disminución de presión en cámara tiene efecto en el desempeño del motor, así lo publican Dogan et al. [50], los autores reportan disminuciones 4 % y de 5 % en el torque para mezclas E10 y E20, mientras que en potencia del motor reportan una disminución del 5 % respecto a la gasolina.

La explicación a estas disminuciones en la presión en cámara se debe a varios factores, el primero: los alcoholes contienen menor poder calorífico, en consecuencia menor cantidad de energía es liberada por parte del combustible, además, otros autores reportan que aún cuando la tasa de liberación de energía es mayor (más rápido se libera energía por la velocidad de la llama), el tiempo de residencia de los combustibles es menor durante su combustión.

Comparando los resultados de la presión en cámara a $RC=9.15$ de la gasolina con los resultados de las mezclas GEM a $RC=9.5$, la diferencia máxima es de 3.9% con respecto a la gasolina; en estas condiciones la gasolina ya tiene mucha intensidad del knock y frecuencia de aparición, lo cual hace que los ciclos de combustión no sean eficientes. En contraste, los alcoholes a $RC=9.5$ su desempeño en intensidad de knock y frecuencia es mejor. Los resultados permiten concluir que la presión en cámara de un motor por ignición con bujía, no disminuye considerablemente con la adición de alcohol en mezclas GEM a bajas proporciones.

4.3 RESULTADOS DE INTENSIDAD Y FRECUENCIA DE APARICIÓN DE KNOCK

4.3.1 RESULTADOS DE INTENSIDAD DE KNOCK

Los resultados de intensidad de knock se muestran en las Figuras A.3 y A.4 que se encuentran en el Anexo A.1, en dichas gráficas se puede visualizar respectivamente la intensidad de knock a temperatura de admisión de aire de 38 °C y 60 °C. Es importante recalcar que el umbral para definir los ciclos que tienen knock y los que no, es de 50 kPa (menor a ese valor no se considera knock). En las gráficas se encuentran valores debajo del umbral de 50 kPa, de manera que podemos concluir que no hay knock, pero el valor representado en la gráfica es el promedio lo cual implica que en algunos ciclos sí existió knock y en otros no.

De las gráficas se puede destacar la diferencia que existe en intensidad de knock entre los ensayos a 38 °C y 60 °C, siendo los ensayos a 60 °C los que tienen mayores valores, con una diferencia en promedio de 40 % en comparación con los ensayos a 38 °C.

De igual forma que con la medición de presión en cámara, es posible validar la regla de iso-estequiometría propuesta por Turner et al. [83], como se muestra en las gráficas, la mayoría de las mezclas que son equivalentes en contenido de alcohol tienen valores de intensidad del knock similares, por ejemplo: las mezclas G84 E6 M10 es equivalente en contenido de alcohol a G83 E10 M7 y tienen diferencias de intensidad del knock de 3.5 % para temperatura de admisión de 38 °C y de 22 % para la temperatura de admisión de 60 °C, respectivamente. La mezcla con menor disminución es la mezcla G95.8 E2.5 M1.7 con contenido de alcohol a 5 % y una disminución de intensidad del knock de 7.38 %.

También se puede observar que las diferencias en intensidad del knock entre mezclas con el mismo contenido de alcohol son mayores para contenidos de alcohol bajos y disminuyen las diferencias conforme se aumenta el contenido de alcohol, también se observa que, a la temperatura de admisión de 60 °C las diferencias son mayores en comparación a los ensayos a 38 °C, esto se explica debido a que las propiedades físico-químicas que afectan el knock en los alcoholes, son más notorias a mayor temperatura, sin mencionar que la autoignición actúa de diferente forma para el metanol y etanol, siendo la temperatura una de las variables más importantes en su desarrollo.

En la Figura 4.6, se muestran los resultados obtenidos en la intensidad del knock para las mezclas con mejores desempeños. Claramente se puede ver que la intensidad del knock para la gasolina es mayor en todas las relaciones de compresión, las diferencia con respecto a la gasolina es de 56 % para la mezcla G91 E5 M3.5 equivalente a un porcentaje de alcohol de 10 %, similares resultados reporta Zhang et al. [109] quienes reportan una disminución de 55.2 % en una mezcla E10 con respecto a la gasolina, los autores reportan también la desaparición del knock en la mezcla E20, los

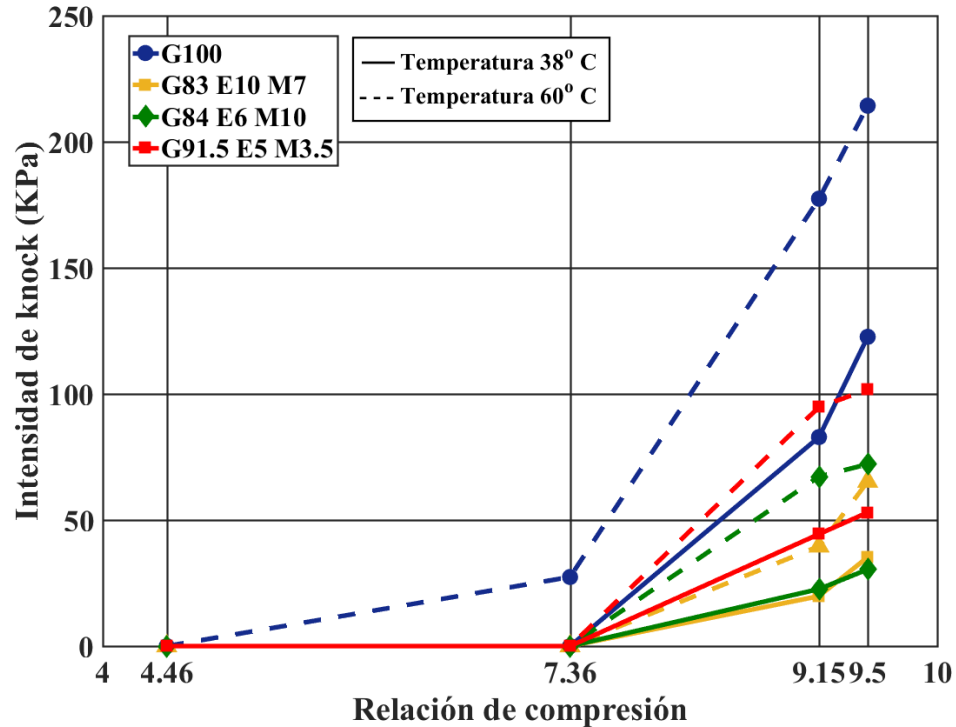


Figura 4.6: Intensidad del knock de mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.

resultados de la Figura 4.6 coinciden con dicho comportamiento, ya que los valores de intensidad de knock para las mezclas G83 E10 M7 y G84 E6 M10 presentan una intensidad del knock de 45-60 kPa que es el límite para los ciclos que se consideran tienen knock.

A partir de la investigación realizada por Waqas et al. [41] quienes reportan los números RON para mezclas GEM con contenidos similares a los propuestos en esta investigación, por ejemplo reportan el número RON de 92 para una mezcla GEM con contenido de alcohol de 10%. Kalghatgi et al. [110], reportan en su estudio la distribución de la intensidad del knock, para combustibles con diferente número RON ahí vemos que para un combustible con número RON de 92 la presión donde aparece el knock es de 57 bar y su intensidad media es: 130 kPa. En ese sentido coincide con los resultados para la mezcla con contenido G91.5 E5 M3.5 que tiene un porcentaje de alcohol de 10% y una intensidad del knock de 100 kPa.

La diferencia entre las mezclas con mayor contenido de etanol y las que tienen más contenido de metanol, también es posible visualizarse ya que como se puede ver en los resultados a 60 °C la mezcla G84 E6 M10 tiene mayor intensidad del knock que la mezcla G83 E10 M7 con una diferencia de 6 % a 25 %, este fenómeno permite validar lo observado por Waqas et al. [41] donde se reportan que conforme existe un aumento en contenido de metanol disminuye el número de octano o lo que es equivalente a que se incrementa la intensidad del knock. Al igual que como sucedió con la presión en cámara, la regla de iso-estequiometría se observa válida para todas las mezclas GEM con una diferencia de 7.4 % en mezclas con similar contenido de alcohol, con excepción de las mezclas G92 E3 M5 y G91.5 E5 M3.5 donde se observa una diferencia de 33 % con respecto de la otra.

4.3.2 RESULTADOS DE FRECUENCIA DE APARICIÓN DE KNOCK

Los resultados en frecuencia de aparición de knock representan un parámetro estadístico de la frecuencia con la cual aparece el knock en una muestra de 101 ciclos de combustión, la importancia de este valor incide en el hecho de que el knock es un fenómeno estocástico, de manera que aún cuando encontramos resultados altos en intensidad de knock no necesariamente implica que aparece el fenómeno en todos los ciclos. Como ejemplo de esta aleatoriedad se encuentra en los resultados de la intensidad del knock los cuales tienen una distribución estándar de 46 % en promedio, esto implica que en tales resultados se encuentran valores un 46 % mayores al promedio reportado, por esta razón resulta necesario un análisis probabilístico de la frecuencia con la que aparece el knock con respecto al 100 % de los ciclos estudiados.

En el presente estudio se obtiene la frecuencia de aparición a partir del promedio de ese valor con respecto a las tres adquisiciones hechas. En las Figuras A.5 y A.6 se muestra la frecuencia de aparición del knock a temperatura de admisión 38 °C y 60 °C. En tales gráficas lo primero que se puede observar es la diferencia que ejerce la temperatura de admisión de aire en la frecuencia de aparición, teniendo

una diferencia de 8 % entre una y otra temperatura para los casos más críticos con mayor frecuencia de aparición (bajo contenido de alcohol o sin alcohol) y una diferencia de 85 % para los casos con contenido de alcohol a 20 %. Los resultados coinciden con lo reportado por Zhang et al. [109], esta observación permite concluir que la adición de alcohol disminuye considerablemente la probabilidad de aparición del knock para prácticamente todos los casos. La regla de iso-estequiometría no válida en este parámetro ya que la diferencias entre mezclas con el mismo contenido de alcohol es entre 2-37 % para mezclas GEM.

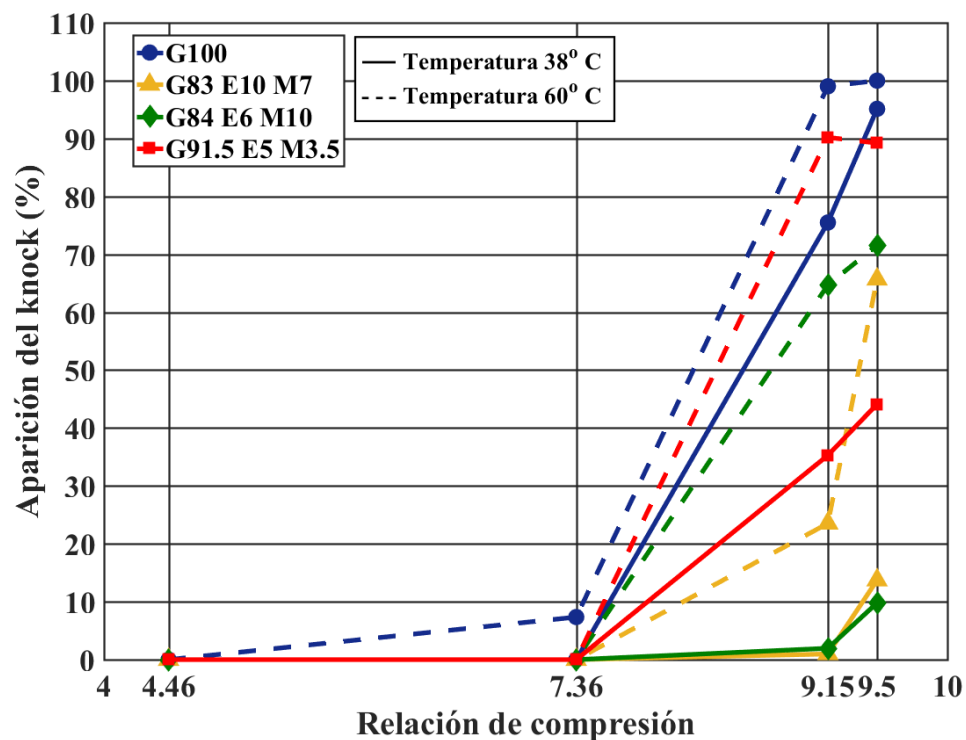


Figura 4.7: Frecuencia de aparición del knock de mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.

En la figura 4.7 se puede ver la frecuencia de aparición del knock para las mezclas con mejores resultados lo cual significa mayores diferencias respecto a la gasolina, los valores van desde 10 % para la mezcla G91.5 E5 M3.5 a temperatura de 60 °C, hasta una diferencia de 89 % para las mezclas G83 E10 M7 y G84 E6 M10, esto demuestra la efectividad de los alcoholes para disminuir la aparición del knock. Sin embargo, aún cuando los resultados mostrados para estas dos mezclas (G83 E10 M7 y G84 E6 M10) son muy similares en aparición del knock se descarta la validez de

la regla de iso-estequiometría, ya que no se presenta el mismo comportamiento en otras mezclas. La capacidad para disminuir la intensidad y frecuencia de aparición del knock en las mezclas con alcohol, se debe al efecto que producen los alcoholes de enfriar la mezcla durante la combustión, además, de la velocidad mayor de llama (esta propiedad es propia de cada combustible y no se calcula en esta investigación) de los alcoholes, lo que permite que no haya tiempo suficiente para que se genere la autoignición.

4.4 RESULTADOS DE EMISIONES CONTAMINANTES.

4.4.1 EMISIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO).

Los resultados de emisiones se describen a continuación, estos resultados son presentados para cada especie química. Los resultados de las emisiones de CO se pueden ver en la Figura A.7 y A.8 a temperatura de admisión de aire de 38 °C y 60 °C. Cabe resaltar que en todos los casos las emisiones CO se vieron disminuidas con respecto a la gasolina, este fenómeno se encuentra ampliamente reportando en la literatura y se debe al radical OH, el cual tiene una alta energía de activación de reacción y permite hacer más eficiente la combustión de los hidrocarburos. Las diferencias con respecto a la gasolina son entre 13 % a 25 %. Cabe mencionar que se ve una influencia determinante de la relación de compresión, lo cual implica que las condiciones termodinámicas durante la combustión ejercen influencia, así como la composición del combustible.

Se observa también que las concentraciones de CO a temperatura de admisión de 38 °C, son mayores con respecto de la temperatura de admisión de 60 °C, entre 30 % a 48 %, esto se debe a que a la temperatura de 38 °C la reacción carece de la energía necesaria para oxidar todo el combustible, en consecuencia, se forma este producto incompleto de la combustión. En las relaciones de compresión 9.15 y 9.5 se observan los efectos de la diferencia de tener más etanol o metanol según la mezcla,

para la mezcla con mayor contenido de etanol se observa un incremento de 3.4 % con respecto a las que tienen mayor contenido de metanol. La desviación estándar para estos resultados, fue de 3.5 % con respecto al valor medio que es el reportado en las gráficas.

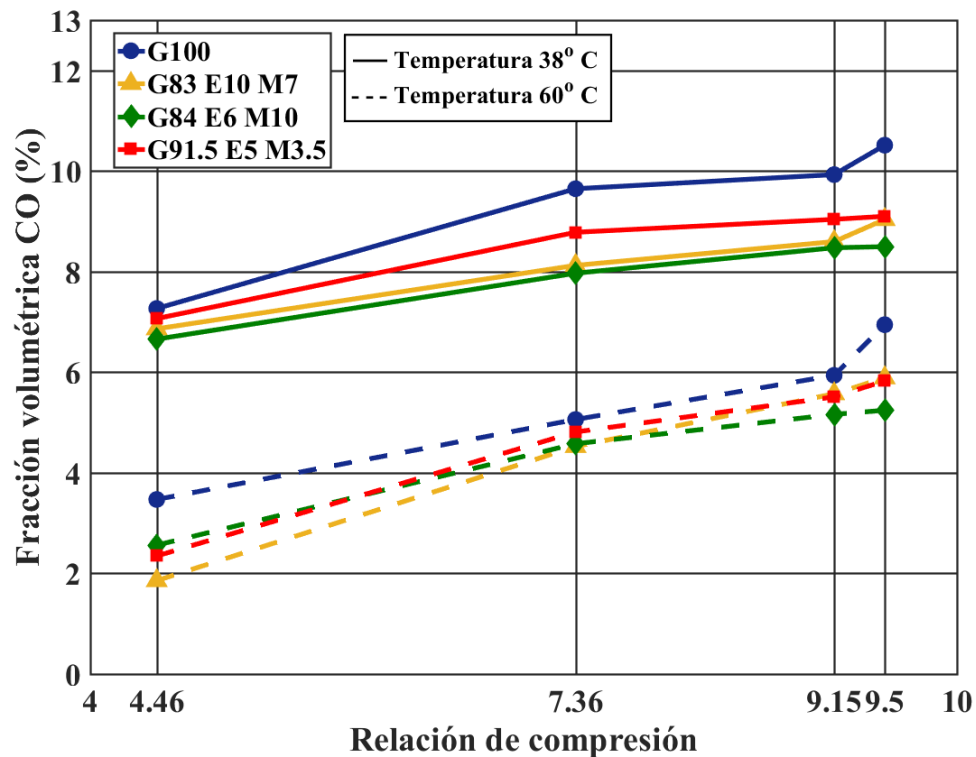


Figura 4.8: Emisiones CO en mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.

En la Figura 4.8, se puede observar las emisiones CO para las mezclas con mejores resultados (con mayor disminución con respecto a la gasolina). Tal como se menciona anteriormente, el CO es un parámetro que se ve afectado por la temperatura de admisión del aire, a bajas temperaturas la combustión es ineficiente, como sucede en la relación de compresión de 4.46, lo que resulta valores altos de CO.

De acuerdo a lo reportado por Ozezen et al. [111, 53] existe una disminución en las emisiones de CO, cuando el contenido de etanol en la mezcla es de 10 % y 20 %, lo que coincide con los resultados de la Figura 4.8, mientras que Yucesu et al. [112] reportan para RC=7.3 0.7 % y 0.8 % en condiciones similares. Este mismo autor reporta para RC=9.1 a condiciones E10 y E20 una diferencia con respecto a la gasolina de 0.68 %

y 0.65 %, respectivamente, para condición de RC=9.5 a contenido E10 y E20 los autores reportan 0.6 % y 0.56 %, respectivamente. Aunque, las diferencias coinciden con los resultados aquí presentados las magnitudes no, ello se debe a las diferencias en las condiciones de operación de los motores, sin embargo, el comportamiento prevalece. Claramente se observa que el comportamiento con la adición de alcohol es que disminuyen la producción de CO con respecto a la gasolina en todas las mezclas GEM.

4.4.2 EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2)

Los resultados de las emisiones de CO_2 se pueden ver en la Figura A.9 y A.10 a temperatura de admisión de aire de 38 °C y 60 °C, respectivamente. El primer aspecto que se puede ver es que en la mayor parte de los ensayos las emisiones CO_2 se vieron incrementadas con respecto a la gasolina, este fenómeno se encuentra ampliamente observado y reportado en la literatura. La razón es la misma que en el caso del monóxido de carbono por el radical OH y el oxígeno en su estructura que ejerce una mayor reactividad durante el proceso de combustión de los hidrocarburos, como consecuencia obtenemos más productos completos de la combustión. Las diferencias con respecto a la gasolina son entre 3.94 % a 44 %.

Se observa algunos casos donde disminuyeron las emisiones, cabe mencionar que no se ve una influencia determinante de la relación de compresión, lo cual implica que las condiciones termodinámicas durante la combustión ejercen menor influencia en comparación con la composición del combustible. Al igual que sucedió con las emisiones CO, podemos ver que la magnitud de la concentración de CO_2 entre temperaturas de 38 °C y 60 °C cambia radicalmente, dado que a la temperatura de admisión de 60 °C los valores son mayores con respecto a la temperatura de 38 °C (entre 4 % a 25 %), La explicación a esto es que a la temperatura de 60 °C la reacción posee más energía, la cual permite oxidar mayor porcentaje del combustible, lo que da como resultado un producto completo de la combustión; el CO_2 . La desviación estándar

para estos resultados fue de 4.6 % con respecto al valor medio que es el reportado en las gráficas.

Se observaron algunos casos a relaciones de compresión 9.15, 9.5 donde las mezclas con mayor contenido de metanol alcanzaron mayores emisiones de CO₂ en comparación con las mezclas con mayor contenido de etanol, esa diferencia es de 1.86 % a 38 %.

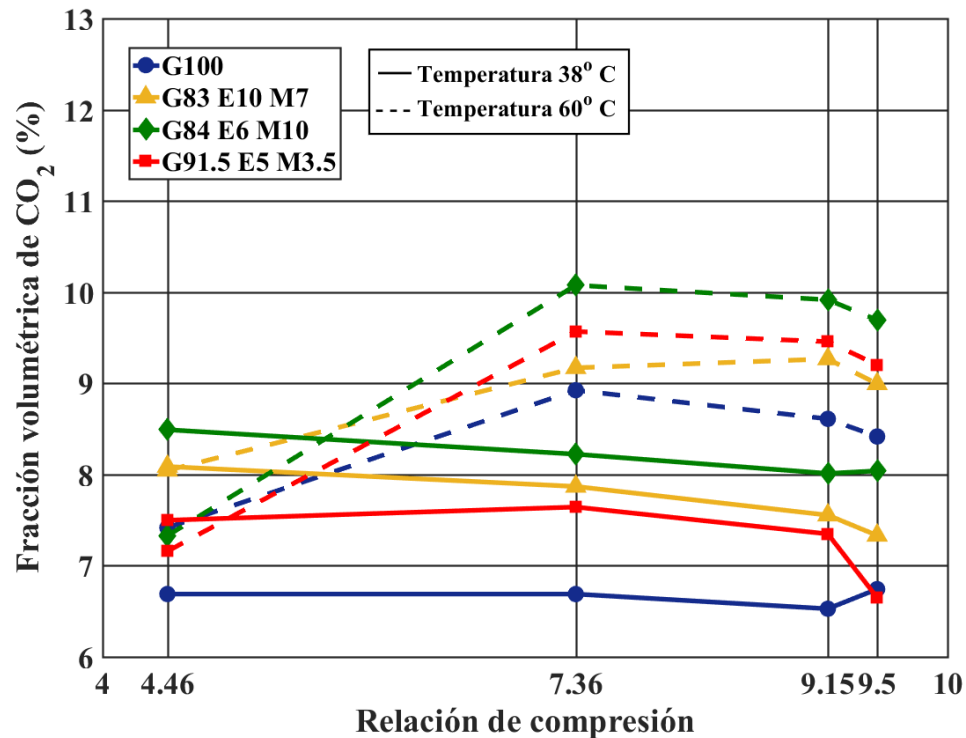


Figura 4.9: Emisiones CO₂ en mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.

En la Figura 4.9 se pueden observar las emisiones CO₂ para las mezclas con mejores resultados. Tal como se ve en la gráfica de concentración de CO₂, este parámetro se ve afectado también por la temperatura, ya que con el aumento de la misma, aumenta la proporción de CO₂. De acuerdo a lo reportado por Al-Hasan [53] para el contenido de etanol de 10 % y 20 % reporta para la RC=9.1 un contenido de monóxido de 11.2 % y 11.6 %, respectivamente. En este estudio se reportan 9.6 % y 10 %, en condiciones similares.

Ozezen et al. [111] reportan para un contenido E0 y E10 una concentración de dióxido de carbono de 9.5 % y 10.3 %, respectivamente, obteniéndose una diferencia de 8.78 %. En similares condiciones, el presente estudio reporta una diferencia de 5.33 %. Es posible observar una curva en los resultados a 60 °C, esto se debe a que existe un valor mínimo para la temperatura durante la combustión, lo que implica que cuando se alcanza el valor más alto, las emisiones tenderían a disminuir, si se continua aumentando el contenido de alcohol. Finalmente, se concluye que el aumento en el contenido de alcohol mejora la eficiencia de la combustión, obteniendo mayor contenido de CO₂ y llegando hasta un punto máximo.

4.4.3 EMISIONES DE OXÍGENO (O₂)

Los resultados de las emisiones de O₂ se pueden ver en las Figuras A.11 y A.12 a temperatura de admisión de aire de 38 °C y 60 °C, respectivamente. La presencia del oxígeno en las emisiones puede tener efectos tanto positivos como negativos, dado que es un elemento fundamental para la combustión, sus altos niveles en compañía de productos incompletos de la combustión implica que la combustión no se realizó de manera eficiente, por otro lado, existe la posibilidad que el oxígeno no reaccione con los hidrocarburos porque ya no existe combustible para oxidar en cuyo caso encontraremos productos completos de la combustión.

En las Figuras A.11 y A.12 se puede observar que existen niveles altos de oxígeno en las relaciones de compresión bajas y en las mezclas con mayor contenido de alcohol, anteriormente se mencionó que la relación de compresión de 4.46 es bastante ineficiente, lo cual explica el porque no reacciona el oxígeno a la relación de compresión baja.

Los valores de O₂ se obtuvieron mayores a los observados en la gasolina en la mayoría de los ensayos realizados, con diferencias de 2 % a 57 % respecto a la gasolina. La temperatura también ejerce un efecto importante en las emisiones de oxígeno ya que como se ve en la Figura 4.10 los niveles son mayores dado que no es necesario

el contenido de oxígeno presente en el aire para comenzar la reacción, esto sucede porque ya existe oxígeno dentro del combustible. La desviación estándar para estos resultados fue de 8.32% con respecto al valor medio que es el reportado en las Figuras.

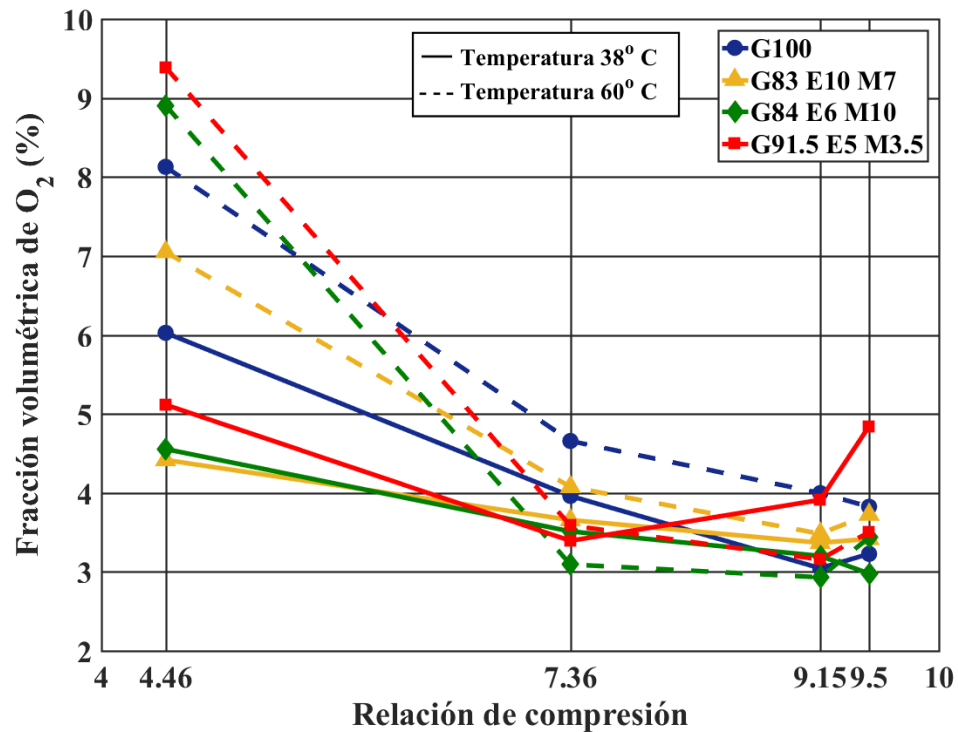


Figura 4.10: Emisiones O₂ en mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.

En la Figura 4.10, se pueden observar las emisiones O₂ para las mezclas con mejores resultados. Podemos observar que los valores más altos se obtienen en la relación de compresión más baja, sin embargo, en la temperatura de admisión de aire de 38 °C, el oxígeno ayuda a la reacción, disminuyendo los valores con respecto a la gasolina. Finalmente, conforme se acerca a valores bajos de oxígeno ya no se puede generar mayor reacción y los valores tenderían a subir otra vez.

4.4.4 EMISIONES DE HIDROCARBUROS NO QUEMADOS (HC)

Los resultados de las emisiones de HC se pueden ver en las Figuras A.13 y A.14, a temperaturas de admisión de aire de 38 °C y 60 °C, respectivamente. En las figuras se puede observar que prácticamente en todos los ensayos los hidrocarburos no quemados disminuyeron su valor con respecto a la gasolina, las diferencias están entre 2.41 % a 45 %, obteniendo mayores diferencias en las mezclas con mayor contenido de alcohol. Se muestra también que la temperatura tiene un efecto positivo, ya que a la temperatura de admisión de aire a 60 °C los valores disminuyen 10 % a 30 %, con respecto a lo obtenido a temperatura de admisión de 38 °C.

En las Figuras A.13 y A.14, es posible ver un comportamiento incremental de las emisiones de HC, conforme se aumenta la relación de compresión, hasta un punto máximo en donde tenderían a disminuir. Esto es consecuencia de que la temperatura durante la combustión disminuye, ya que la energía es transformada en presión y no en calor residual. La desviación estándar para estos resultados fue de 2.74 % con respecto al valor medio que es el reportado en los resultados.

Se observa un aumento de emisiones HC en las mezclas con mayor contenido de metanol con respecto a las mezclas con etanol, este comportamiento es mayor en la RC=9.15, 9.5, eso coincide con los comportamientos reportados en la literatura.

En la Figura 4.11, se puede observar las emisiones HC para las mezclas con mejores resultados. De acuerdo a lo reportado por Yucesu et al. [112], con el incremento de relación de compresión aumenta los HC y la adición de alcohol los disminuye, los autores reportan una disminución de 11 %, para la mezcla E10 y de 14 % para la mezcla E20 con respecto a la gasolina, dichos resultados coinciden con los reportados en la Figura 4.11 donde se reporta para la mezcla G91.5 E5 M3.5 una diferencia de 10.24 %, para las mezclas con G83 E10 M7 y G84 E6 M10 una diferencia de 16 % con respecto a la gasolina. Además los autores destacan que el aumento de las RPM tiene un efecto benéfico, ya que aumenta la temperatura y en consecuencia disminuye los HC.

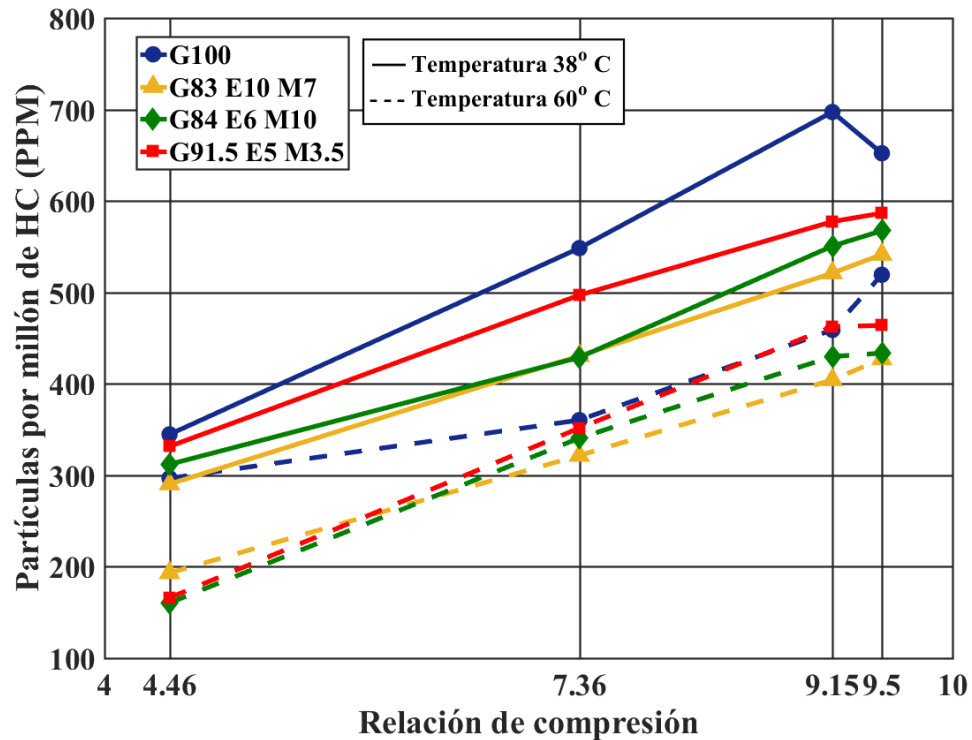


Figura 4.11: Emisiones HC en mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.

Al-Hasam [53] reporta una disminución de 10 % para la mezcla con 10 % de alcohol y una disminución de 21 % para la mezcla con 20 % de alcohol dichos resultados coinciden con lo reportado en este estudio anteriormente.

Dado todo lo mencionado con antelación, se puede validar la disminución de HC en las mezclas GEM con mayor contenido de alcohol, y un posterior aumento conforme elevamos la relación de compresión, sin embargo, se observa que no podemos incrementar mas allá del punto máximo.

4.4.5 RESULTADOS DE EMISIONES ÓXIDOS NITROSOS (NO_x)

Los resultados de las emisiones de NO_x se pueden ver en las Figuras A.15 y A.16 a temperatura de admisión de aire de 38 °C y 60 °C, respectivamente. El incremento de los NO_x depende en esencia de tres factores descritos anteriormente; el nitrógeno que está presente en mayor proporción, en el aire para la mezcla, el oxígeno presente

en el aire, que permite la oxidación del nitrógeno y una temperatura alta para que se desarrolle la reacción.

Claramente se puede ver en las Figuras A.15 y A.16 que en la relación de compresión de 4.46, se obtiene los valores más altos de NO_x y esto coincide con lo mencionado anteriormente sobre la ineficiencia de esta relación de compresión para convertir la energía térmica en energía mecánica. Es posible también observar que en la mayoría de los ensayos las emisiones NO_x son mayores a lo obtenido en la gasolina; en ensayos realizados a temperatura de admisión de aire a 38 °C, con una diferencia de 7% a 43%. Sin embargo, para la temperatura de admisión de aire de 60 °C se observan aumentos de 2% a 18%, respecto a la gasolina, aunque, las mezclas G92E3M5 y G86.5E9.5M4 son excepciones a este comportamiento.

Dicho aumento de NO_x se opone a lo reportado por algunos autores, por ejemplo Dogan et al. [50] reportan una disminución de 10% con respecto a la gasolina y Masum et al. [113] reportan disminuciones de 13.5% para la mezcla E10, pero también existen otros autores que reportan un aumento en las emisiones NO_x con la adición de alcoholes [114].

Otro aspecto que se puede observar es que con el aumento de la temperatura de admisión de 38 °C a 60 °C, se vieron incrementados los NO_x hasta 200% con respecto a la temperatura más baja. La diferencia entre la gasolina y las mezclas GEM es mayor conforme aumenta el contenido de alcohol, a contenido de 5% se obtiene un aumento del 25% y a contenido de alcohol de 20% un aumento del 50%. Finalmente, es posible deducir que las emisiones NO_x tienen un valor más alto en las mezclas de metanol con respecto a las mezclas con etanol. La desviación estándar para estos resultados fue de 4.36% con respecto al valor medio que es el reportado en los resultados.

En la Figura 4.12 se pueden observar las emisiones NO_x para las mezclas con mejores resultados. De acuerdo a lo reportado por Masum et al. [113] la adición de etanol a la gasolina en una mezcla E10 produce un aumento de 6% y en una mezcla E20 un incremento de 12% con respecto a la gasolina, estos resultados coinciden con los

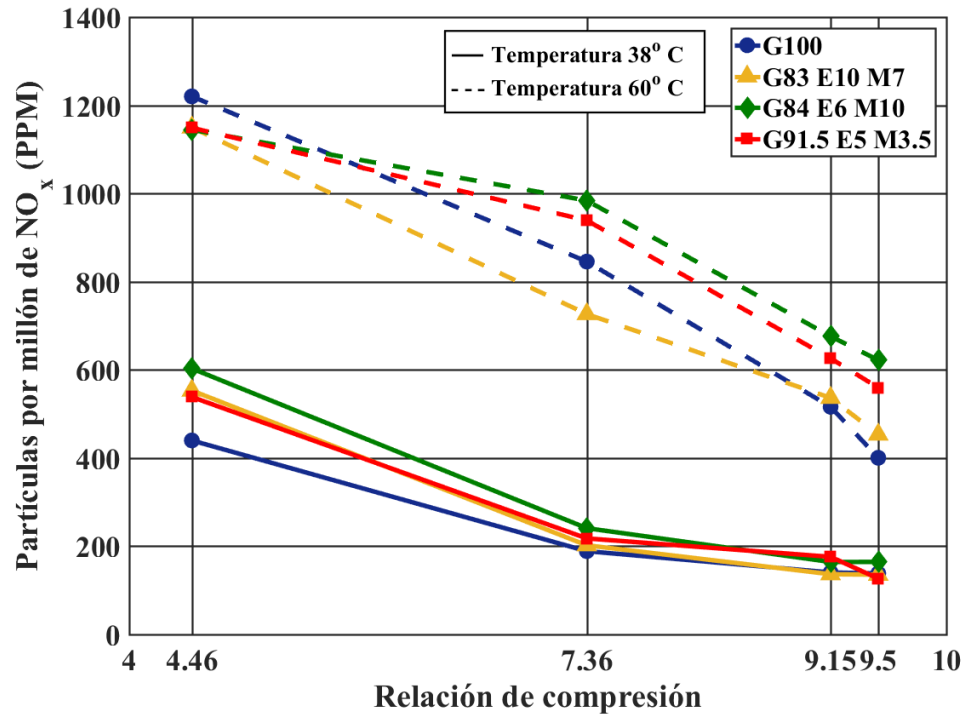


Figura 4.12: Emisiones NO_x en mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.

presentados en la Figura 4.12. Yacoub et al. [115] reportan un aumento en emisiones de NO_x igual a 2 % para las mezclas con 5 % de alcohol, tanto metanol como etanol. En general los autores consideran que puede haber un efecto negativo conforme se incrementa el porcentaje de alcohol en la mezcla producto de que el frente de llama es más rápido, generando un pico de presión y en consecuencia una mayor temperatura durante el ciclo de combustión, lo que implica la oxidación de nitrógeno y generación de NO_x.

4.4.6 RESULTADOS DE MATERIAL PARTICULADO (PM)

Los resultados de las emisiones de PM se pueden ver en las Figuras A.17 y A.18 a temperatura de admisión de aire de 38 °C y 60 °C, respectivamente. En la Figuras mencionadas con anterioridad (A.17 y A.18) se puede observar que las emisiones PM fueron muy altas para la relación de compresión de 4.46, esto debido a que dicha relación fue bastante ineficiente en su combustión, de ahí que aún las bajas

adiciones de alcohol hayan generado mejoras sustanciales. Sin embargo, ese potencial de mejora se ve disminuido conforme aumenta la relación de compresión y la adición de alcohol.

Es posible observar que la temperatura tuvo un efecto positivo al disminuir en todos los casos el material particulado, ya que, con el aumento de la temperatura de admisión a 60 °C, hubo disminuciones de hasta 89% respecto a la gasolina, desafortunadamente en las relaciones de compresión más altas no existen disminuciones considerables, obteniendo diferencias de 3 a 40.47% respecto a la gasolina, producto de que ese sería el límite a partir de donde se volverían a incrementar el material particulado si se incrementa la relación de compresión, en varios casos aumenta las emisiones PM con respecto a la gasolina. La desviación estándar para estos resultados fue de 5.22% respecto al valor medio que es el reportado en los resultados.

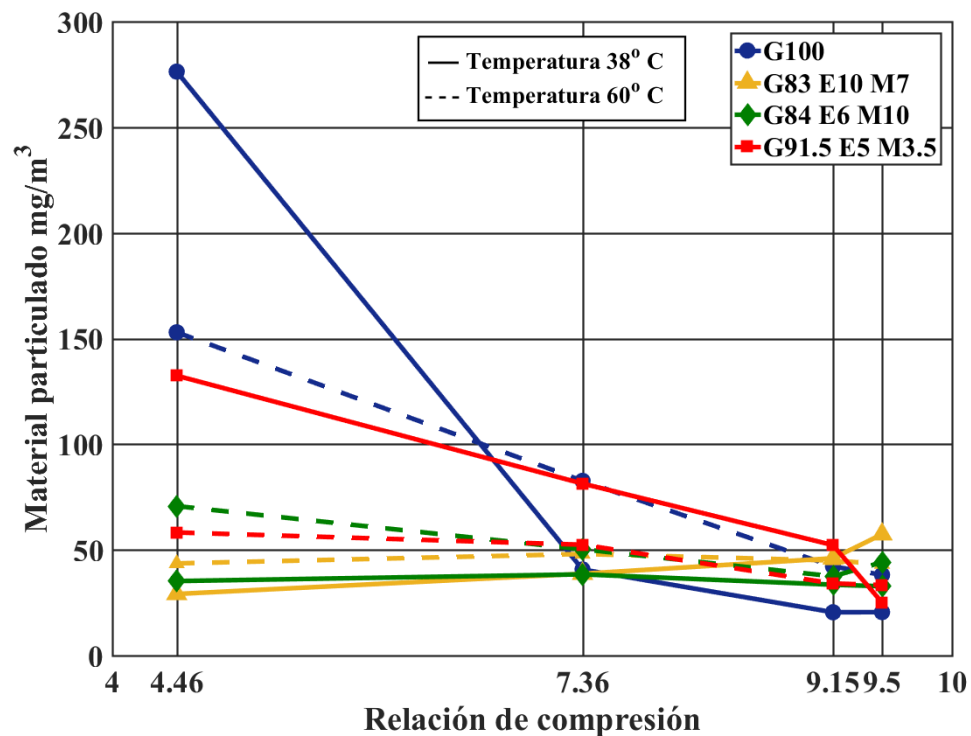


Figura 4.13: Emisiones PM en mezclas GEM a temperatura de admisión de 38 °C y 60 °C.

En la Figura 4.13 se muestra las emisiones PM para las mezclas con mejores resultados. Tal como lo reporta Jin et al. [116] la adición de alcohol disminuye la concentración de partículas para una mezcla E10, la disminución es de 35% como

se ve en las relaciones de compresión bajas, sin embargo, el efecto de la temperatura termina siendo un factor adverso en las relaciones de compresión más altas, debido a que implica un límite el cual no se puede mejorar, aún cuando se adicione más alcohol, y la tendencia sería que se incrementará sus valores, si se aumenta la relación de compresión.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para cada una de las variables analizadas en las diferentes condiciones de operación en que fue configurado el motor CFR. También se incluye en este capítulo un apartado donde se sugiere, los trabajos futuros en este motor.

5.1 CONCLUSIONES

De manera general se puede concluir que las mezclas con gasolina-etanol-metanol obtuvieron mejor desempeño en los parámetros de presión en cámara intensidad de knock, frecuencia de aparición, emisiones CO, HC, y PM, con algunas excepciones que se explicarán a continuación. Un aspecto que se vuelve significativo al momento de ver los beneficios de las mezclas GEM; es evaluar los resultados de la relación de compresión más alta de las mezclas GEM versus los resultados de la gasolina a RC=9.15, en estas condiciones de operación las mezclas tienen mejores resultados ya que la relación de 9.5 no es adecuada para la gasolina y si para los alcoholes. A continuación se listan las conclusiones:

- La presión en cámara para las mezcla GEM se ve disminuida hasta un porcentaje máximo de 7.55 % con respecto a la gasolina, sin embargo existió un caso para la mezcla G92 E3 M5 donde aumentó un 9.49 %.
- A partir de los resultados de presión en cámara e intensidad del knock la regla de iso-estequiometría se válida para todas las mezclas teniendo una diferencia entre mezclas con mismo contenido de alcohol, de 4.8 %, solo existe un caso para las mezclas G92 E3 M5 y G91.5 E5 M3.5, a RC=9.5 en tales condiciones las mezclas tienen una diferencia de 10.4 %.
- La intensidad del knock tiene disminuciones en todas las mezclas GEM, es posible observar esa disminución conforme se incrementa el contenido de alcohol, la disminución mayor alcanza un valor de 77.7 % respecto a la gasolina y se da en la mezcla G83 E10 M7.
- La frecuencia de aparición del knock disminuye conforme aumenta el contenido de alcohol, la disminución con respecto a la gasolina es de 98 % para la mezcla G83 E10 M7, aunque existieron casos donde se observó un incremento de máximo de 5.19 % para la mezcla G95.8 E2.5 M1.7.

- Los valores de CO son menores prácticamente en todos los casos con respecto a la gasolina, la diferencia es de 2.4 % a 25 %, cabe destacar que se observa mayor diferencia con respecto a la gasolina en los ensayos a 38° C en comparación con los ensayos a 60° C.
- La temperatura ejerce influencia sobre los valores de la fracción volumétrica del CO, CO₂, O₂ de manera que a la temperatura de admisión de aire de 38° C los valores de CO aumentan y las emisiones CO₂, O₂ son menores con respecto a lo obtenido a temperatura de admisión de 60° C.
- Los valores de CO₂ se muestran mayores a los obtenidos de la gasolina para prácticamente todos los ensayos realizados, con una diferencia de 3.94 % a 44 % se observa mayor diferencia con respecto a la gasolina en los ensayos a 38 °C en comparación con los ensayos a 60 °C; sin embargo, también se observó que algunos ensayos con menor valor, siendo casos aislados.
- Los valores de O₂ son mayores a los observados en la gasolina en la mayoría de los ensayos realizados, con una diferencia de 2 % a 57 %, los valores más altos se obtienen en las relaciones de compresión baja que son consideradas más ineficientes.
- Las emisiones HC disminuyeron con respecto a la gasolina prácticamente en todos los casos la disminución es de 2.41 % a 45 % con excepción de algunos casos aislados donde se observó un aumento.
- Las emisiones de NO_x se muestran mayores a lo obtenido en la gasolina en la mayoría de los ensayos realizados a temperatura de aire de 38 °C, con una diferencia de 7 % a 43 %, sin embargo, para la temperatura de admisión de aire de 60 °C se observan aumentos de 2 % a 18 % aunque no en todos los casos presentaron estos comportamientos.
- Las emisiones de PM en las mezclas GEM disminuyen con respecto a la gasolina, la disminución es mayor en la RC. de 4.46 con valores de 45-89 %, en las relaciones más altas la disminución es mucho menor en valores de 3 % a

40.47 % y en algunos casos aislados aumenta las emisiones PM con respecto a la gasolina.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

A pesar de obtener resultados muy aceptables los trabajos futuros representan la oportunidad para mejorar lo hecho en una investigación de manera que se enlista a continuación los trabajos que se podrían realizar:

- **Simulación de la combustión de mezclas GEM en un motor CFR:**
El primer punto que vale la pena estudiar es realizar la simulación de la combustión en un motor CFR, dicha simulación idealmente debe de incluir las ecuaciones de transporte de momento, masa, energía y especies químicas. Estudiar esto nos permitiría saber como se interrelacionan las diferentes especies químicas, producidas durante la combustión y el impacto que tienen en los productos de la combustión.
- **Estudio de la combustión de proporciones medias y altas de mezclas GEM:** Importante también es continuar con el estudio de mezclas GEM e incrementar el porcentaje equivalente de alcohol, nada existe en la literatura con respecto de mezclas GEM con 30-85 % de alcohol, su estudio sin duda sería relevante.
- **Estudio de mezcla GEM a relación de compresión alta:** En el presente estudio se trabajó en el límite de RC de las mezclas con bajo contenido de alcohol, sin embargo, como se observó en los resultados de las mezclas con contenido de alcohol de 20 %, existe aún potencial para incrementar la RC, en consecuencia hacer más eficiente el motor.
- **Disminución de emisiones de mezclas GEM:** Uno de los resultados adversos en la investigación radicó en el aumento de NO_x y de PM de manera que es importante revertir este efecto y asegurar su efectividad haciendo uso

de las tecnologías ya existentes para ello.

- **Simulación CFD y detección de knock durante la combustión de mezclas GEM:** Los modelos de predicción y detección del knock representan áreas de investigación con potencial suficiente para aportación científica, el acoplar estos modelos a CFD representan desafíos numéricos por realizar, nada existe en esta área referente a mezclas GEM.
- **Estudio de mezclas cuaternarias en motor CFR:** Es importante asegurar que la mezcla gasolina-alcohol es la opción más óptima como combustible, de manera que es necesario investigar si algún otro alcohol como el butanol o propanol tienen potencial para mejorar la mezcla.

APÉNDICE A

APÉNDICE

A.1 RESULTADOS DE PRESIÓN EN CÁMARA

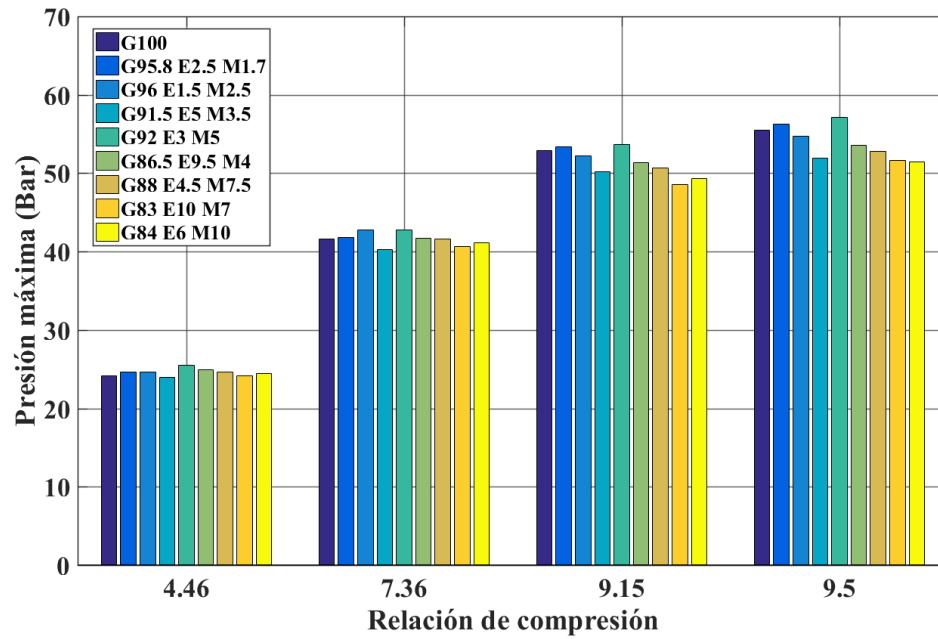


Figura A.1: Presión máxima de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 38 °C.

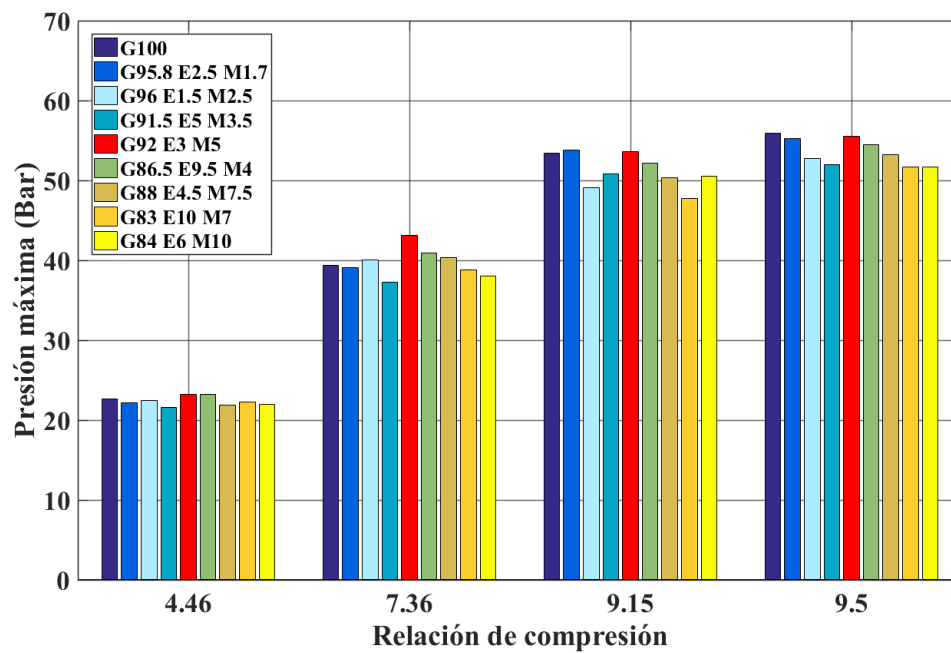


Figura A.2: Presión máxima de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.

A.2 RESULTADOS DE INTENSIDAD Y FRECUENCIA DE APARICIÓN DEL KNOCK

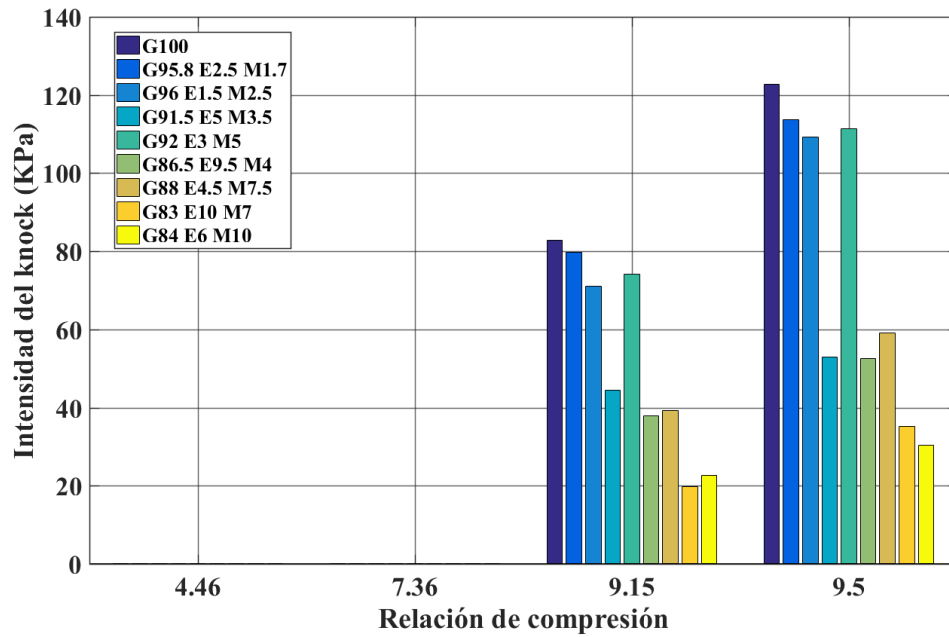


Figura A.3: Intensidad del knock de mezclas GEM; Temperatura de admisión de aire de 38 °C.

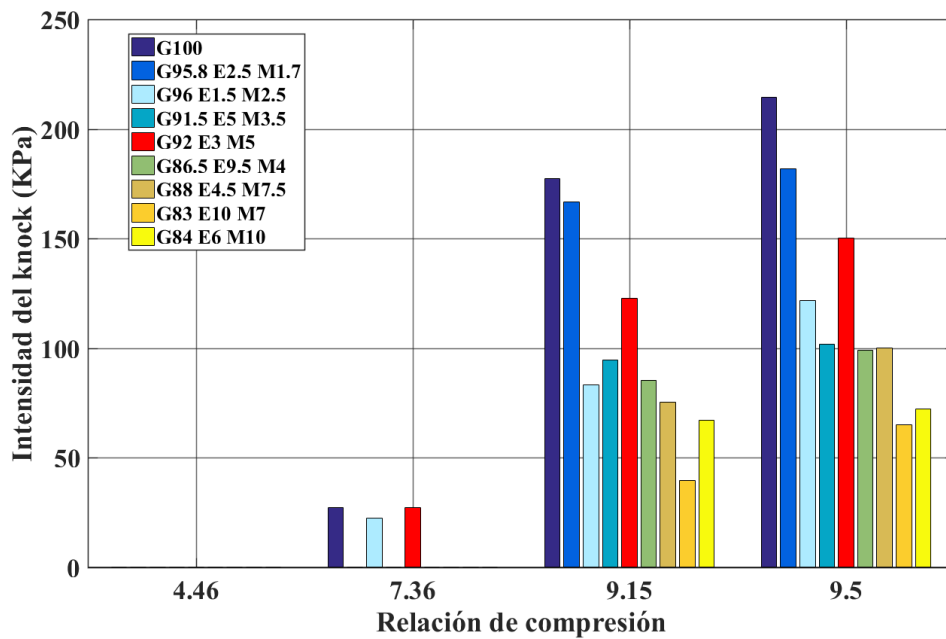


Figura A.4: Intensidad del knock de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.

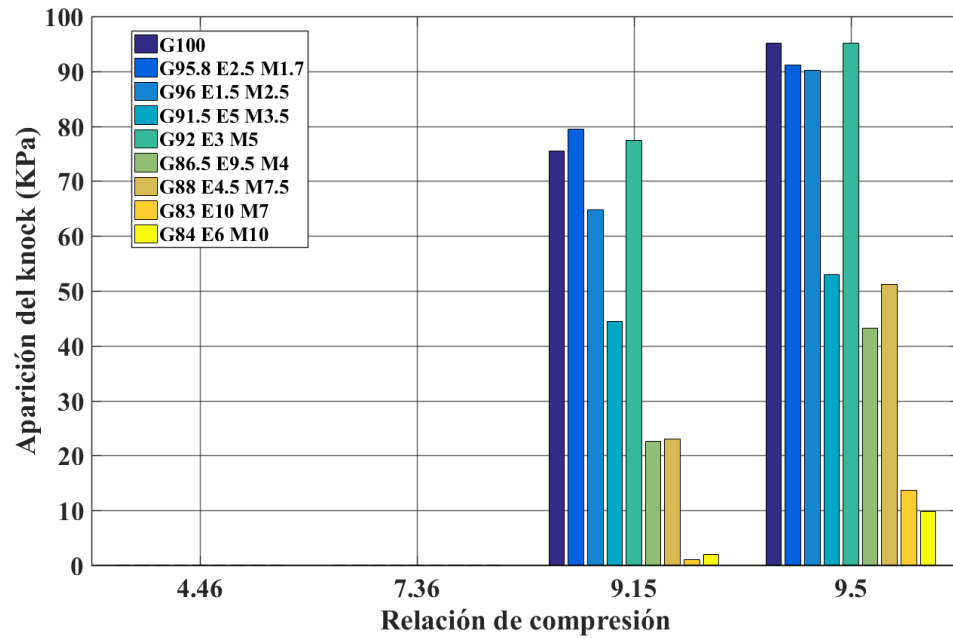


Figura A.5: Frecuencia de aparición del knock de mezclas GEM; Temperatura de admisión de aire de 38 °C.

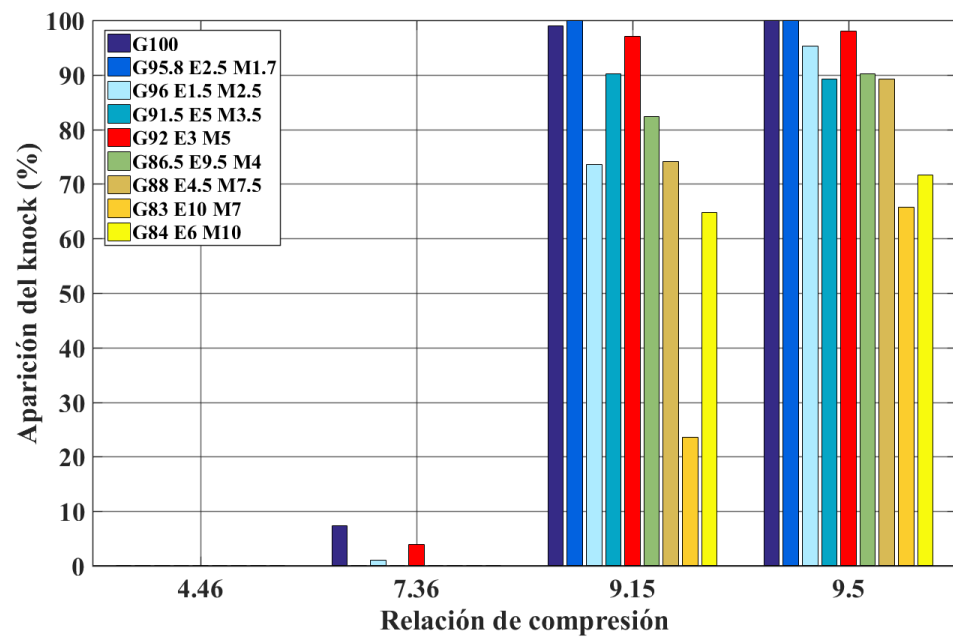


Figura A.6: Frecuencia de aparición del knock de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.

A.3 RESULTADOS DE EMISIONES

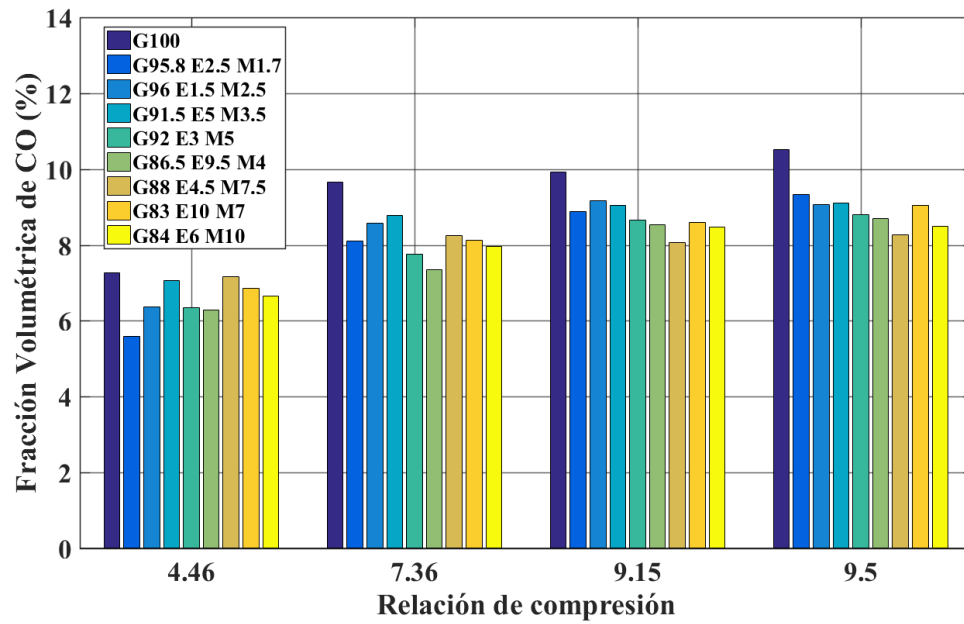


Figura A.7: Fracción volumétrica de CO de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 38 °C.

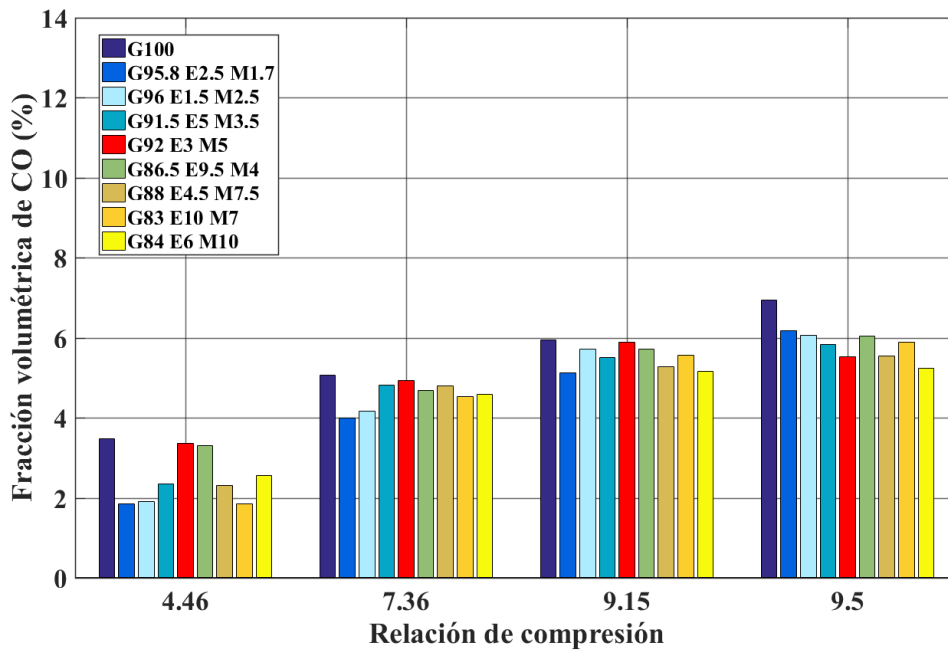


Figura A.8: Fracción volumétrica de CO de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.

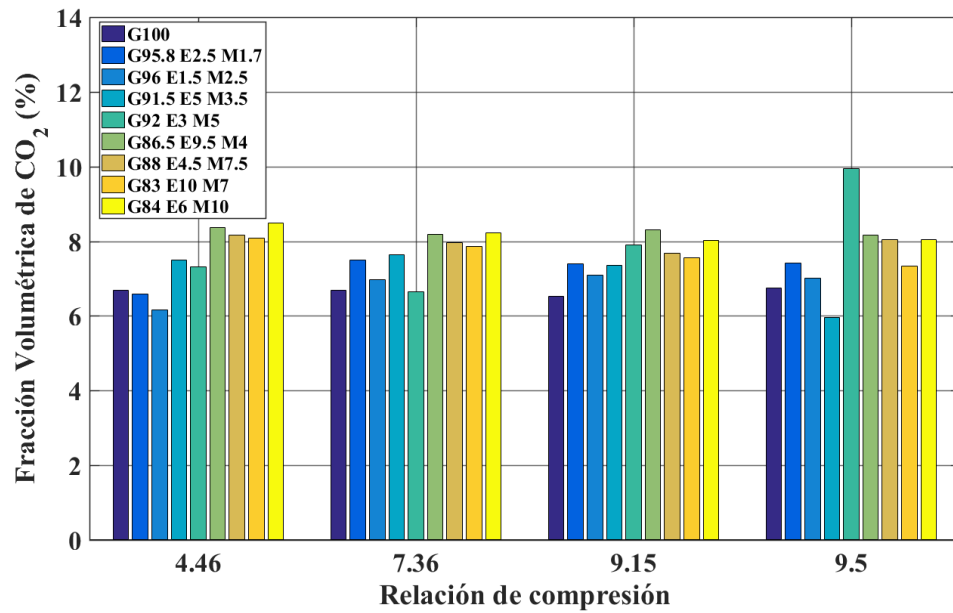


Figura A.9: Fracción volumétrica de CO₂ de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 38 °C.

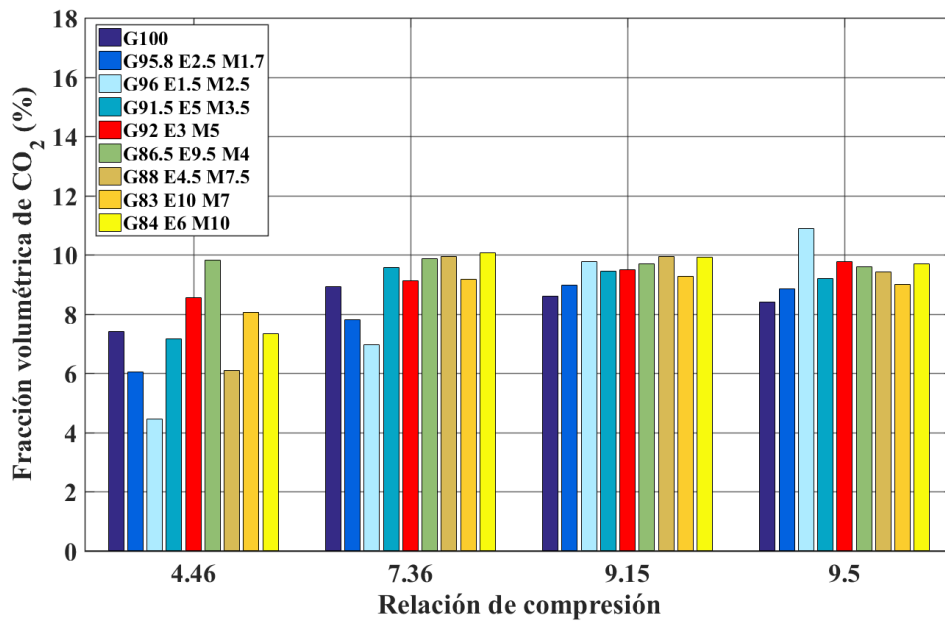


Figura A.10: Fracción volumétrica de CO₂ de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.

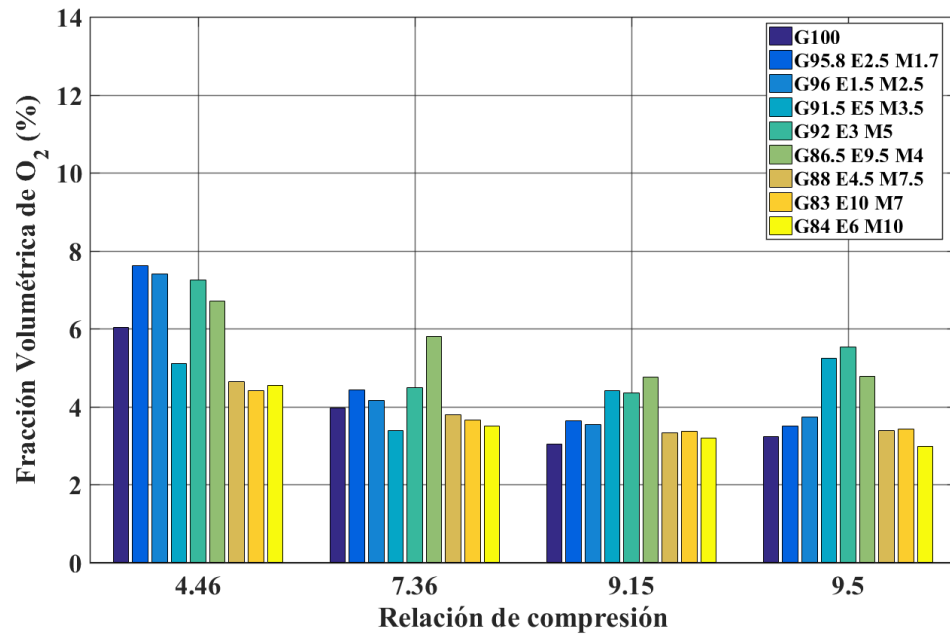


Figura A.11: Fracción volumétrica de O₂ de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 38 °C.

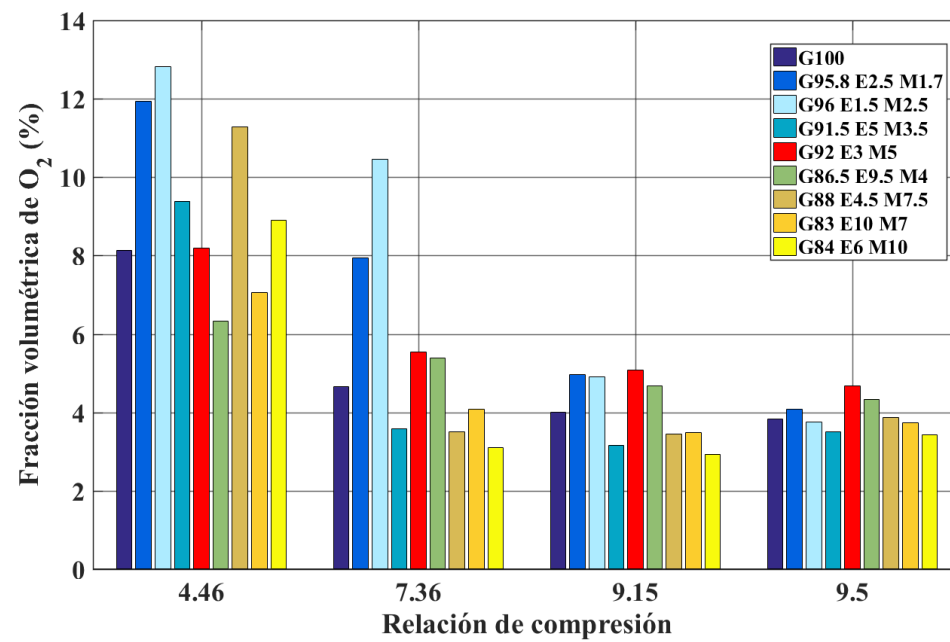


Figura A.12: Fracción volumétrica de O₂ de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.

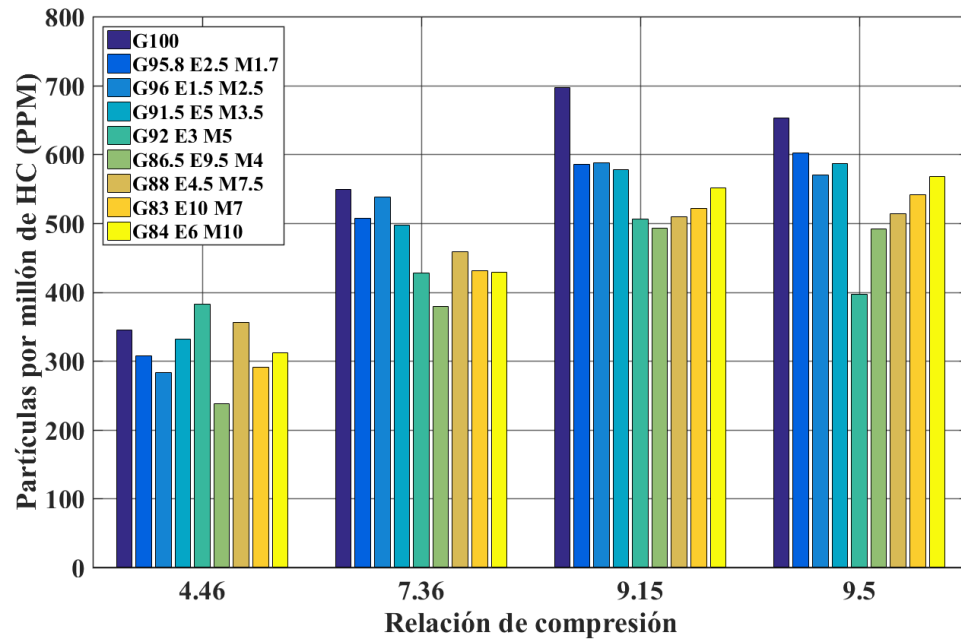


Figura A.13: Partículas por millón de HC de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 38 °C.

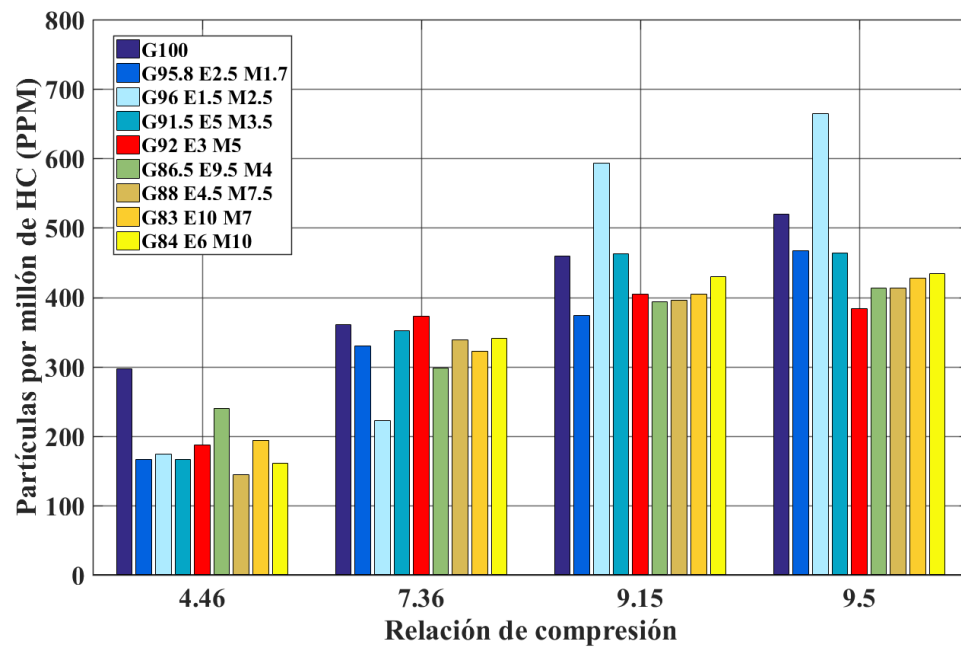


Figura A.14: Partículas por millón de HC de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.

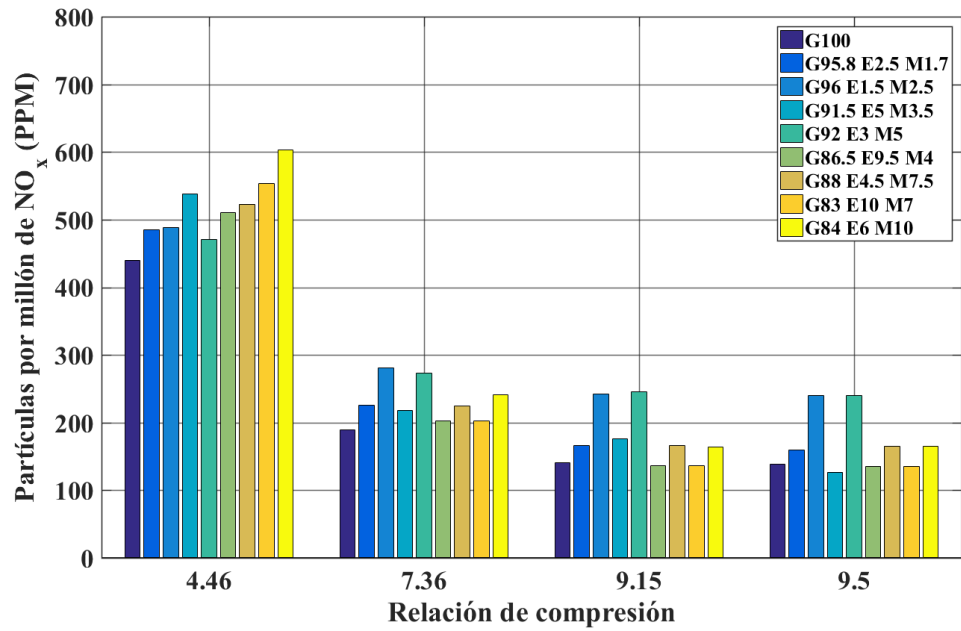


Figura A.15: Partículas por millón de NO_x de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 38 °C.

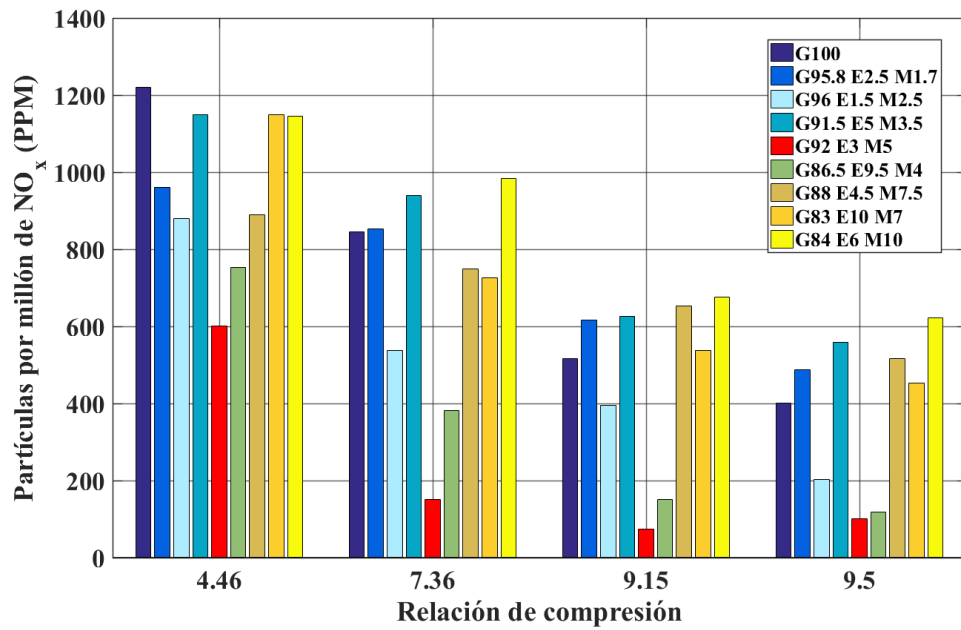


Figura A.16: Partículas por millón de NO_x de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.

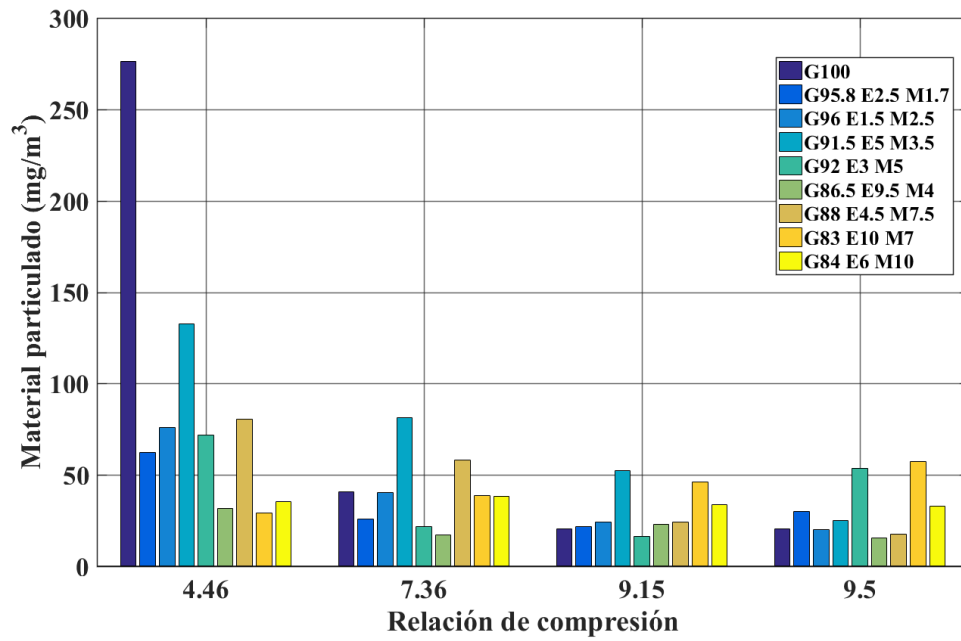


Figura A.17: Concentración de material particulado de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 38 °C.

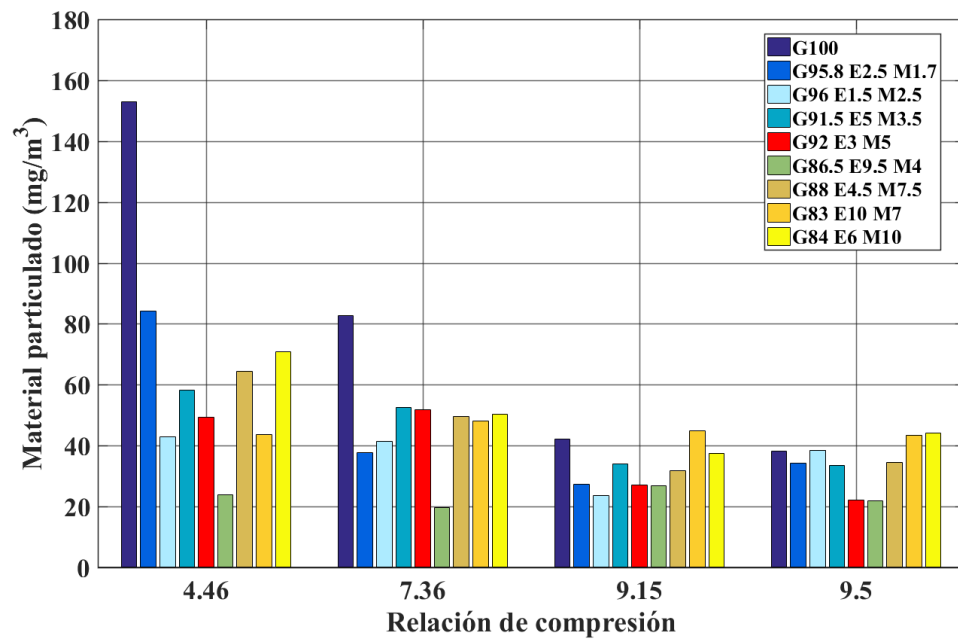


Figura A.18: Concentración de material particulado de mezclas GEM; Temperatura de admisión de 60 °C.

A.4 TABLAS DE RESULTADOS

Tabla A.1: Tabla de resultados para gasolina.

RC	Temp.	Presión	I. K.	F. K.	CO	CO ₂	O ₂	NO _x	HC	PM
4.46	38	24.14	0.00	0.00	7.27	6.69	6.03	439.92	344.75	276.33
7.36	38	41.61	0.00	0.00	9.65	6.69	3.96	188.82	548.44	40.73
9.15	38	52.89	82.90	75.49	9.93	6.53	3.05	140.60	697.26	20.49
9.5	38	55.49	122.65	95.12	10.51	6.74	3.23	138.36	652.18	20.55
4.46	60	22.66	0.00	0.00	3.47	7.42	8.13	1220.20	296.80	152.98
7.36	60	39.35	27.40	7.35	5.06	8.92	4.66	845.64	360.36	82.67
9.15	60	53.44	177.43	99.02	5.94	8.61	4.00	516.18	458.99	42.19
9.5	60	55.89	214.32	100.00	6.94	8.42	3.83	400.62	519.27	38.19

Tabla A.2: Tabla de resultados para mezcla G95.8 E2.5 M1.7.

RC	Temp.	Presión	I. K.	F. K.	CO	CO ₂	O ₂	NO _x	HC	PM
4.46	38	24.61	0.00	0.00	5.59	6.59	7.62	484.71	306.80	62.15
7.36	38	41.84	0.00	0.00	8.10	7.50	4.44	225.65	506.49	25.89
9.15	38	53.36	79.67	79.41	8.88	7.40	3.64	166.54	585.38	21.76
9.5	38	56.27	113.59	91.18	9.33	7.41	3.50	159.48	601.46	29.96
4.46	60	22.16	0.00	0.00	1.86	6.03	11.94	961.47	166.08	84.30
7.36	60	39.05	0.00	0.00	4.00	7.81	7.95	852.46	329.81	37.60
9.15	60	53.79	166.60	100.00	5.12	8.98	4.96	616.75	373.96	27.38
9.5	60	55.21	181.72	100.00	6.17	8.85	4.08	487.00	466.92	34.23

Tabla A.3: Tabla de resultados para mezcla G96 E1.5 M2.5

RC	Temp.	Presión	I. K.	F. K.	CO	CO ₂	O ₂	NO _x	HC	PM
4.46	38	24.65	0.00	0.00	6.36	6.17	7.40	488.29	282.53	76.04
7.36	38	42.76	0.00	0.00	8.57	6.96	4.17	280.83	537.82	40.35
9.15	38	52.24	71.05	64.71	9.18	7.08	3.54	242.60	587.13	24.17
9.5	38	54.68	109.27	90.20	9.06	7.01	3.74	240.47	569.58	19.87
4.46	60	22.48	0.00	0.00	1.90	4.46	12.82	879.37	173.53	42.91
7.36	60	40.02	22.53	98.03	4.16	6.95	10.45	538.02	222.31	41.31
9.15	60	49.10	83.35	73.53	5.72	9.77	4.90	396.15	592.70	23.65
9.5	60	52.78	121.76	95.22	6.05	10.89	3.76	201.97	664.53	38.49

Tabla A.4: Tabla de resultados para mezcla G91.5 E5 M3.5

RC	Temp.	Presión	I. K.	F. K.	CO	CO ₂	O ₂	NO _x	HC	PM
4.46	38	23.95	0.00	0.00	7.07	7.50	5.12	538.48	331.58	132.46
7.36	38	40.22	0.00	0.00	8.78	7.64	3.39	217.79	497.04	81.39
9.15	38	50.17	44.42	35.29	9.04	7.35	4.41	176.02	577.44	52.25
9.5	38	51.88	53.00	44.12	9.10	5.95	5.24	126.70	586.70	25.09
4.46	60	21.56	0.00	0.00	2.35	7.16	9.39	1148.90	166.05	58.26
7.36	60	37.27	0.00	0.00	4.81	9.57	3.59	938.94	351.66	52.46
9.15	60	50.84	94.78	90.20	5.51	9.46	3.16	626.10	462.65	34.12
9.5	60	51.95	101.73	89.22	5.83	9.20	3.50	559.56	463.86	33.39

Tabla A.5: Tabla de resultados para mezcla G92 E3 M5

RC	Temp.	Presión	I. K.	F. K.	CO	CO ₂	O ₂	NO _x	HC	PM
4.46	38	25.53	0.00	0.00	6.35	7.31	7.25	470.10	382.20	71.99
7.36	38	42.81	0.00	0.00	7.76	6.65	4.48	273.35	427.88	21.90
9.15	38	53.61	74.08	77.45	8.66	7.90	4.35	245.57	505.56	16.49
9.5	38	57.16	111.32	95.10	8.79	9.94	5.53	240.17	396.89	53.46
4.46	60	23.25	0.00	0.00	3.36	8.54	8.20	601.00	186.87	49.37
7.36	60	43.08	27.24	3.92	4.94	9.12	5.53	151.83	372.28	51.75
9.15	60	53.58	122.71	97.05	5.88	9.49	5.09	74.43	404.17	27.15
9.5	60	55.53	150.23	98.04	5.52	9.78	4.68	101.40	383.03	22.19

Tabla A.6: Tabla de resultados para mezcla G86.5 E9.5 M4

RC	Temp.	Presión	I. K.	F. K.	CO	CO ₂	O ₂	NO _x	HC	PM
4.46	38	24.89	0.00	0.00	6.29	8.37	6.70	510.81	238.12	31.60
7.36	38	41.68	0.00	0.00	7.35	8.18	5.80	202.14	379.41	17.06
9.15	38	51.33	37.91	22.55	8.54	8.30	4.75	136.63	493.13	22.91
9.5	38	53.56	52.64	43.14	8.70	8.15	4.78	135.48	491.78	15.44
4.46	60	23.21	0.00	0.00	3.31	9.82	6.32	753.41	239.63	23.94
7.36	60	40.89	0.00	0.00	4.68	9.87	5.38	382.25	298.01	19.58
9.15	60	52.20	85.44	82.35	5.72	9.70	4.68	150.93	393.78	26.92
9.5	60	54.45	99.12	90.20	6.04	9.60	4.34	118.54	412.85	21.85

Tabla A.7: Tabla de resultados para mezcla G88 E4.5 M7.5

RC	Temp.	Presión	I. K.	F. K.	CO	CO ₂	O ₂	NO _x	HC	PM
4.46	38	24.68	0.00	0.00	7.16	8.16	4.64	522.63	356.08	80.32
7.36	38	41.58	0.00	0.00	8.25	7.97	3.79	224.52	458.97	58.08
9.15	38	50.62	39.22	22.94	8.06	7.68	3.33	165.68	509.72	24.14
9.5	38	52.79	59.17	51.18	8.28	8.04	3.39	164.98	513.50	17.76
4.46	60	21.85	0.00	0.00	2.30	6.11	11.29	889.09	144.10	64.39
7.36	60	40.31	0.00	0.00	4.79	9.94	3.50	748.94	338.57	49.49
9.15	60	50.37	75.46	74.12	5.27	9.93	3.46	652.47	395.68	31.87
9.5	60	53.27	100.08	89.22	5.54	9.43	3.87	516.88	413.69	34.43

Tabla A.8: Tabla de resultados para mezcla G83 E10 M7

RC	Temp.	Presión	I. K.	F. K.	CO	CO ₂	O ₂	NO _x	HC	PM
4.46	38	24.14	0.00	0.00	6.86	8.09	4.42	553.08	290.39	29.15
7.36	38	40.65	0.00	0.00	8.12	7.87	3.66	202.14	430.65	38.73
9.15	38	48.51	19.82	0.98	8.60	7.55	3.37	136.63	521.15	46.04
9.5	38	51.61	35.28	13.73	9.04	7.33	3.42	135.48	541.43	57.39
4.46	60	22.22	0.00	0.00	1.86	8.05	7.05	1149.60	193.27	43.60
7.36	60	38.75	0.00	0.00	4.52	9.17	4.08	726.43	321.69	48.08
9.15	60	47.73	39.56	23.53	5.57	9.27	3.48	536.59	404.37	44.98
9.5	60	51.67	65.23	65.69	5.89	8.99	3.73	453.32	427.12	43.30

Tabla A.9: Tabla de resultados para mezcla G84 E6 M10

RC	Temp.	Presión	I. K.	F. K.	CO	CO ₂	O ₂	NO _x	HC	PM
4.46	38	24.43	0.00	0.00	6.66	8.49	4.56	603.09	311.98	35.26
7.36	38	41.12	0.00	0.00	7.97	8.22	3.51	240.96	428.92	38.43
9.15	38	49.32	22.62	1.96	8.48	8.01	3.20	164.35	550.72	33.53
9.5	38	51.40	30.42	9.80	8.50	8.04	2.98	164.47	567.41	32.78
4.46	60	22.01	0.00	0.00	2.56	7.33	8.91	1144.60	160.43	70.73
7.36	60	38.05	0.00	0.00	4.58	10.08	3.09	984.00	340.74	50.29
9.15	60	50.56	67.23	64.71	5.16	9.92	2.93	675.90	429.89	37.50
9.5	60	51.70	72.13	71.57	5.24	9.69	3.44	622.11	433.61	44.15

BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Energy Agency. World Energy Outlook 2010. Technical report, 2010.
- [2] International Energy Agency. World Energy Outlook 2017. Technical report, 2017.
- [3] International Energy Agency. Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy 2017. Technical report, 2017.
- [4] SENER. Prospectiva de Petróleo Crudo y Petrolíferos 2017-2031. Technical report, Secretaría de Energía, 2017.
- [5] SENER. Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030. Technical report, Secretaría de Energía, 2016.
- [6] Siti Azmah Jambo, Rahmath Abdulla, Siti Hajar Mohd Azhar, Hartinie Marbawi, Jualang Azlan Gansau, and Pogaku Ravindra. A review on third generation bioethanol feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65:756 – 769, 2016.
- [7] James Turner, Richard Pearson, Ralph Purvis, Eelco Dekker, Kenth Johansson, and Kjell ac Bergström. Gem ternary blends: Removing the biomass limit by using iso-stoichiometric mixtures of gasoline, ethanol and methanol. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 09 2011.
- [8] S. Mani Sarathy, Patrick Oßwald, Nils Hansen, and Katharina Kohse-Höinghaus. Alcohol combustion chemistry. *Progress in Energy and Combustion*

- Science*, 44:40 – 102, 2014.
- [9] Gomez Guillermo Rubio. Estudio de la combustión de mezclas gasolina-bioalcohol en un motor de compresión variable tipo cfr. Master's thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2018.
- [10] World Energy Council. World Energy Issues Monitor 2018. Technical report, 2018.
- [11] Organizacion de las Naciones Unidas. Convención Marco sobre Cambio Climatico 2015. pages 1–40, 2017.
- [12] Shiv Shankar. *Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future*. Springer, Washigton, USA, first edition, 2017.
- [13] Ibrahim Dincer. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4:157–175, 2000.
- [14] J. Drexhage. Sustainable development: from Brundtland to Rio 2012. Background paper prepared for consideration by the High Level Panel on Global Sustainability at its first meeting, 19 September 2010. Technical report, 2010.
- [15] Qianli Chen and Artur Braun. Protons and the hydrogen economy. *Energy and Sustainability*, 4:E14, 2017.
- [16] Ustina Markus. *Oil and Gas:the business and politics of Energy*. Palgrave Macmillan, London, UK, first edition, 2015.
- [17] John A. Alic. *Handbook of International Political Economy Of Energy*. Palgrave Macmillan, Washigton, USA, first edition, 2016.
- [18] United States Deparmet of Agriculture Foreign Agricultural Services. Brazil Biofuels Anual 2017. Technical report, 2017.
- [19] Carlos P. Barros, Luis A. Gil-Alana, and Peter Wanke. Ethanol consumption in brazil: Empirical facts based on persistence, seasonality and breaks. *Biomass and Bioenergy*, 63:313 – 320, 2014.

- [20] N.S. Shamsul, S.K. Kamarudin, N.A. Rahman, and N.T. Kofli. An overview on the production of bio-ethanol as potential renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33:578 – 588, 2014.
- [21] W. Y. Li and K.-C. Xie. The development of methanol industry and methanol fuel in china. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(18):1673–1679, 2009.
- [22] L. Bromberg and Wai Cheng. Methanol as an alternative transportation fuel in the us: Options for sustainable and/or energy-secure transportation. 02 2015.
- [23] Jan Baeyens, Qian Kang, Lise Appels, Raf Dewil, Yongqin Lv, and Tianwei Tan. Challenges and opportunities in improving the production of bio-ethanol. *Progress in Energy and Combustion Science*, 47:60 – 88, 2015.
- [24] Willem van Zyl, Lee Lynd, Riaan Den Haan, and John McBride. Consolidated bioprocessing for bioethanol production using *saccharomyces cerevisiae*. 108:205–235, 02 2007.
- [25] H.B. Aditiya, T.M.I. Mahlia, W.T. Chong, Hadi Nur, and A.H. Sebayang. Second generation bioethanol production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66:631 – 653, 2016.
- [26] Rafael Luque, Sara Pinzi, Juan M. Campelo, Juan J. Ruiz, Iosvani López Díaz, Diego Luna, Jose M. Marinas, Antonio Romero, and M Pilar Dorado. *Biofuels for Transport: Prospects and Challenges*, volume 2. 02 2009.
- [27] Mats Galbe and Guido Zacchi. *Pretreatment of Lignocellulosic Materials for Efficient Bioethanol Production*, pages 41–65. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [28] M.V. Rodionova, R.S. Poudyal, I. Tiwari, R.A. Voloshin, S.K. Zharmukhamedov, H.G. Nam, B.K. Zayadan, B.D. Bruce, H.J.M. Hou, and S.I. Allakhverdiev. Biofuel production: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(12):8450 – 8461, 2017.

- [29] Ping Wei, Li-Hua Cheng, Lin Zhang, Xin-Hua Xu, Huan lin Chen, and Cong jie Gao. A review of membrane technology for bioethanol production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30:388 – 400, 2014.
- [30] Olah George. *The Continuing Need for Carbon Fuels, Hydrocarbons and their Products*, chapter 1, pages 65–79. Wiley-Blackwell, 2009.
- [31] Doğan Güllü and Ayhan Demirbaş. Biomass to methanol via pyrolysis process. 42:1349–1356, 07 2001.
- [32] Ayhan Demirbas. Pyrolysis of ground beech wood in irregular heating rate conditions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 73(1):39 – 43, 2005.
- [33] S.K. Kamarudin, N.S. Shamsul, J.A. Ghani, S.K. Chia, H.S. Liew, and A.S. Samsudin. Production of methanol from biomass waste via pyrolysis. *Biore-source Technology*, 129:463 – 468, 2013.
- [34] Kazuhiro Kumabe, Shinji Fujimoto, Takashi Yanagida, Mamoru Ogata, Tetsuhisa Fukuda, Akira Yabe, and Tomoaki Minowa. Environmental and economic analysis of methanol production process via biomass gasification. *Fuel*, 87(7):1422 – 1427, 2008.
- [35] Tomasz Chmielniak and Marek Sciazko. Co-gasification of biomass and coal for methanol synthesis. 74:393–403, 03 2003.
- [36] P. Galindo Cifre and O. Badr. Renewable hydrogen utilisation for the production of methanol. *Energy Conversion and Management*, 48(2):519 – 527, 2007.
- [37] Yuanji Dong and Meyer Steinberg. Hynol—an economical process for methanol production from biomass and natural gas with reduced co2 emission. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22(10):971 – 977, 1997.
- [38] Sang Gui Lee, Jae Hwan Goo, Hee Gon Kim, Jeong-Il Oh, and Young Min Kim. Optimization of methanol biosynthesis from methane using methylostinus trichosporium ob3b. *Biotechnology Letters*, 26(11):947–950, 2004.

- [39] M. Sahibzada, D. Chadwick, and I.S. Metcalfe. Methanol synthesis from CO_2/H_2 over Pd-promoted Cu/ZnO/Al₂O₃ catalysts: Kinetics and deactivation. 107:29 – 34, 1997.
- [40] Fumio Hasegawa, Shinya Yokoyama, and Kenji Imou. Methanol or ethanol produced from woody biomass: Which is more advantageous? *Bioresource Technology*, 101(1, Supplement):S109 – S111, 2010. Supplement Issue on Recent Developments of Biomass Conversion Technologies.
- [41] Muhammad Waqas, Kai Morganti, Jean-Baptiste Masurier, and Bengt Johansson. Blending octane number of ethanol on a volume and molar basis in SI and HCCI combustion modes. *SAE International*, 10 2017.
- [42] Tien Mun Foong, Kai J. Morganti, Michael J. Brear, Gabriel da Silva, Yi Yang, and Frederick L. Dryer. The octane numbers of ethanol blended with gasoline and its surrogates. *Fuel*, 115:727 – 739, 2014.
- [43] Jihad Badra, Abdullah S. AlRamadan, and S. Mani Sarathy. Optimization of the octane response of gasoline/ethanol blends. *Applied Energy*, 203:778 – 793, 2017.
- [44] Wallner T. Kolodziej C.P. Combustion characteristics of various fuels during research octane number testing on an instrumented CFR F1/F2 engine. *Combustion Engines*, 56:164 – 169, 2017.
- [45] Chongming Wang and Soheil Zeraati-Rezaei and. Ethanol blends in spark ignition engines: RON, octane-added value, cooling effect, compression ratio, and potential engine efficiency gain. *Applied Energy*, 191:603 – 619, 2017.
- [46] J E Anderson, U Kramer, S A Mueller, and T J Wallington. Octane Numbers of Ethanol and Methanol Gasoline Blends Estimated from Molar Concentrations. *Energy & Fuels*, 24(12):6576–6585, dec 2010.
- [47] James Anderson, Thomas G. Leone, Michael H. Shelby, Timothy J. Wallington, Jeffrey J. Bizub, Michael Foster, Michael G. Lynskey, and Dusan Polovina.

- Octane numbers of ethanol-gasoline blends: Measurements and novel estimation method from molar composition. *SAE Technical Papers*, 04 2012.
- [48] M.A. Costagliola, L. De Simio, S. Iannaccone, and M.V. Prati. Combustion efficiency and engine out emissions of a s.i. engine fueled with alcohol/gasoline blends. *Applied Energy*, 111:1162 – 1171, 2013.
- [49] Pang XiaoBing, Mu YuJing, Yuan Juan, and He Hong. Carbonyls emission from ethanol-blended gasoline and biodiesel-ethanol-diesel used in engines. *Atmospheric Environment*, 42(6):1349–1358, 2008.
- [50] Battal Doğan, Derviş Erol, Hayri Yaman, and Evren Kodanlı. The effect of ethanol-gasoline blends on performance and exhaust emissions of a spark ignition engine through exergy analysis. *Applied Thermal Engineering*, 120:433 – 443, 2017.
- [51] Prakhar Chansauria and R.K. Mandloi. Effects of ethanol blends on performance of spark ignition engine-a review. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Part 1):4066 – 4077, 2018.
- [52] Amit Kumar Thakur, Ajay Kumar Kaviti, Roopesh Mehra, and K.K.S. Mer. Progress in performance analysis of ethanol-gasoline blends on si engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69:324 – 340, 2017.
- [53] Effect of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. *Energy Conversion and Management*, 44(9):1547 – 1561, 2003.
- [54] Thomas G. Leone, James E. Anderson, Richard S. Davis, Asim Iqbal, Ronald A. Reese, Michael H. Shelby, and William M. Studzinski. The effect of compression ratio, fuel octane rating, and ethanol content on spark-ignition engine efficiency. *Environmental Science & Technology*, 49(18):10778–10789, 2015.
- [55] Jean Milpied, Nicolas Jeuland, Gabriel Plassat, Sabine Guichaous, Nathalie Dioc, Alexandre Marchal, and Pierre Schmelzle. Impact of fuel properties

- on the performances and knock behaviour of a downsized turbocharged di si engine-focus on octane numbers and latent heat of vaporization. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2, 04 2009.
- [56] Robert A. Stein, Christopher J. House, and Thomas G. Leone. Optimal use of e85 in a turbocharged direct injection engine. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2:670–682, 04 2009.
- [57] Kai Morganti, Marwan Abdullah, Abdullah Alzubail, Yoann Viollet, Robert Head, Junseok Chang, and Gautam Kalghatgi. Improving the efficiency of conventional spark-ignition engines using octane-on-demand combustion. part i: Engine studies. *SAE Technical Papers*, 2016-01-0679, 04 2016.
- [58] John R. Agudelo, Magín Lapuerta, Orin Moyer, and André L. Boehman. Auto-ignition of alcohol/c7-esters/n-heptane blends in a motored engine under hcci conditions. *Energy & Fuels*, 31(3):2985–2995, 2017.
- [59] Vi H. Rapp, J. Hunter Mack, Philipp Tschann, Wolfgang Hable, Robert J. Cattolica, and Robert W. Dibble. Research octane numbers of primary and mixed alcohols from biomass-based syngas. *Energy & Fuels*, 28(5):3185–3191, 2014.
- [60] Jeroen Vancoillie. *Modeling the combustion of light alcohols in spark-ignition engines*. PhD thesis, Ghent University, 2013.
- [61] D. Bradley, M. Lawes, and M.S. Mansour. Explosion bomb measurements of ethanol–air laminar gaseous flame characteristics at pressures up to 1.4mpa. *Combustion and Flame*, 156(7):1462 – 1470, 2009.
- [62] Kazutaka Ohara, Masayoshi Tsukikawa, Yousuke Araki, Akihiro Hayakawa, Shoichi Kobayashi, and Toshiaki Kitagawa. Properties of ethanol laminar and turbulent premixed flames. 1 2009.
- [63] Ömer L. Gülder. Burning velocities of ethanol-isooctane blends. *Combustion and Flame*, 56(3):261 – 268, 1984.

-
- [64] P. Dirrenberger, P.A. Glaude, R. Bounaceur, H. Le Gall, A. Pires da Cruz, A.A. Konnov, and F. Battin-Leclerc. Laminar burning velocity of gasolines with addition of ethanol. *Fuel*, 115:162 – 169, 2014.
- [65] Determination of the laminar burning velocities for mixtures of ethanol and air at elevated temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 27(2):374 – 380, 2007.
- [66] L. Sileghem, T. Wallner, and S. Verhelst. A quasi-dimensional model for si engines fueled with gasoline–alcohol blends: Knock modeling. *Fuel*, 140:217 – 226, 2015.
- [67] Simeon Iliev. A comparison of ethanol and methanol blending with gasoline using a 1-d engine model. *Procedia Engineering*, 100:1013 – 1022, 2015. 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2014.
- [68] Duc-Khanh Nguyen, Louis Sileghem, and Sebastian Verhelst. A quasi-dimensional combustion model for spark ignition engines fueled with gasoline–methanol blends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 232(1):57–74, 2018.
- [69] J Beeckmann, Olaf Röhl, and Norbert Peters. Experimental and numerical investigation of iso-octane, methanol and ethanol regarding laminar burning velocity at elevated pressure and temperature. 06 2009.
- [70] S. Y. Liao, D. M. Jiang, Q. Cheng, Z. H. Huang, and K. Zeng. Effect of methanol addition into gasoline on the combustion characteristics at relatively low temperatures. *Energy & Fuels*, 20(1):84–90, 2006.
- [71] J. Vancoillie, G. Sharpe, M. Lawes, and S. Verhelst. The turbulent burning velocity of methanol–air mixtures. *Fuel*, 130:76 – 91, 2014.
- [72] Xudong Zhen, Yang Wang, Shuaiqing Xu, and Yongsheng Zhu. Numerical analysis on knock for a high compression ratio spark-ignition methanol engine.

- Fuel*, 103:892 – 898, 2013.
- [73] M. Bahattin Çelik, Bülent Özdalyan, and Faruk Alkan. The use of pure methanol as fuel at high compression ratio in a single cylinder gasoline engine. *Fuel*, 90(4):1591 – 1598, 2011.
- [74] Xudong Zhen, Yang Wang, and Yongsheng Zhu. Study of knock in a high compression ratio si methanol engine using les with detailed chemical kinetics. *Energy Conversion and Management*, 75:523 – 531, 2013.
- [75] Lee Björnstrand. Efficiency and emission analysis of a methanol fuelled direct injection spark ignition heavy duty engine, 2017. Student Paper.
- [76] Avinash Kumar Agarwal, Himanshu Karare, and Atul Dhar. Combustion, performance, emissions and particulate characterization of a methanol–gasoline blend (gasohol) fuelled medium duty spark ignition transportation engine. *Fuel Processing Technology*, 121:16 – 24, 2014.
- [77] Ashraf Elfasakhany. Exhaust emissions and performance of ternary iso-butanol–bio-methanol–gasoline and n-butanol–bio-ethanol–gasoline fuel blends in spark-ignition engines: Assessment and comparison. *Energy*, 158:830 – 844, 2018.
- [78] Sebastian Verhelst, James WG Turner, Louis Sileghem, and Jeroen Vancoillie. Methanol as a fuel for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70:43 – 88, 2019.
- [79] R.J. Nichols. The methanol story: A sustainable fuel for the future. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 62(1):97–105, 2003. cited By 46.
- [80] Rafael C. Clemente, Edward Werninghaus, Eugênio P. D. Coelho, and Luis A. Sigaud Ferraz. Development of an internal combustion alcohol fueled engine. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 03 2001.
- [81] Craig D. Marriott, Matthew A. Wiles, J. Michael Gwidt, and Scott E. Parrish. Development of a naturally aspirated spark ignition direct-injection flex-fuel

- engine. *SAE Int. J. Engines*, 1:267–295, 04 2008.
- [82] Muhammad Waqas, Nimal Naser, Mani Sarathy, Jeroen Feijs, Kai Morganti, Gustav Nyrenstedt, and Bengt Johansson. Auto-ignition of iso-stoichiometric blends of gasoline-ethanol-methanol (gem) in si, hcci and ci combustion modes. *SAE Technical Paper Series*, 2017.
- [83] James W G Turner, Richard J Pearson, Arthur Bell, Stefan de Goede, and Christopher Woolard. Iso-stoichiometric ternary blends of gasoline, ethanol and methanol: Investigations into exhaust emissions, blend properties and octane numbers. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 5(3):945–967, 2012.
- [84] L. Sileghem, A. Coppens, B. Casier, J. Vancoillie, and S. Verhelst. Performance and emissions of iso-stoichiometric ternary gem blends on a production si engine. *Fuel*, 117:286 – 293, 2014.
- [85] J.W.G. Turner, R.J. Pearson, E. Dekker, B. Iosefa, K. Johansson, and K. ac Bergström. Extending the role of alcohols as transport fuels using iso-stoichiometric ternary blends of gasoline, ethanol and methanol. *Applied Energy*, 102:72 – 86, 2013. Special Issue on Advances in sustainable biofuel production and use - XIX International Symposium on Alcohol Fuels - ISAF.
- [86] Ashraf Elfakhany. Investigations on the effects of ethanol–methanol–gasoline blends in a spark-ignition engine: Performance and emissions analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(4):713 – 719, 2015.
- [87] Isaac Schifter, Luis Díaz-Gutiérrez, René Rodríguez-Lara, Carmen González-Macías, and Uriel González-Macías. Assessment of environmentally friendly fuel emissions from in-use vehicle exhaust: low-blend iso-stoichiometric gem mixture as example. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 05 2017.
- [88] John B. Heywood. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, New York, EUA, first edition, 1988.

- [89] J.C. Livengood and P.C. Wu. Correlation of autoignition phenomena in internal combustion engines and rapid compression machines. *Symposium (International) on Combustion*, 5(1):347 – 356, 1955.
- [90] D. Bradley and G.T. Kalghatgi. Influence of autoignition delay time characteristics of different fuels on pressure waves and knock in reciprocating engines. *Combustion and Flame*, 156(12):2307 – 2318, 2009.
- [91] Andy Yates, Arthur Bell, and Andre Swarts. Insights relating to the autoignition characteristics of alcohol fuels. *Fuel*, 89(1):83 – 93, 2010.
- [92] Andy D. B. Yates and Carl L. Viljoen. An improved empirical model for describing auto-ignition. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 06 2008.
- [93] Craig T. Bowman. A shock-tube investigation of the high-temperature oxidation of methanol. *Combustion and Flame*, 25:343 – 354, 1975.
- [94] A. M. Douaud and P. Eyzat.
- [95] American Society of Testing Materials. Método de prueba estándar para Número de octano de combustibles para motores de ignición por chispa. Technical report, 2011.
- [96] American Society of Testing Materials. Método de prueba estándar para Número de octano de investigación de combustibles para motores de ignición por chispa. Technical report, 2011.
- [97] G. Benson, E. A. Fletcher, T. E. Murphy, and H. C. Scherrer. Knock (detonation) control by engine combustion chamber shape. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 02 1983.
- [98] Andre Swarts, Andy Yates, Carl Viljoen, and Roelof Coetzer. A further study of inconsistencies between autoignition and knock intensity in the cfr octane rating engine. *SAE Technical Papers*, 05 2005.
- [99] M. D. Checkel and J. D. Dale. Computerized knock detection from engine pressure records. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 03 1986.

-
- [100] G. Konig and C. G. W. Sheppard. End gas autoignition and knock in a spark ignition engine. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 10 1990.
- [101] Michael F.J. Brunt, Christopher R. Pond, and John Biundo. Gasoline engine knock analysis using cylinder pressure data. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 02 1998.
- [102] Gao Xiaofeng, Richard Stone, Chris Hudson, and Ian Bradbury. The detection and quantification of knock in spark ignition engines. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 10 1993.
- [103] C. S Draper. Pressure waves accompanying detonation in the internal combustion engine. *Journal of Aeronautical Sciences*, 10(6), 1938.
- [104] Villa Pablo Gomez-Gordo. Desarrollo de un sistema de control automático aplicado a un motor cfr para el estudio físico-químico de la combustión. Master's thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2017.
- [105] Alex Nibardo De Lucio Lopez. Implementación del sistema de producción de bioetanol en un reactor híbrido tipo batch para su uso en un motor de combustión interna. Master's thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2019.
- [106] Tien Mun Foong. *On the Autoignition of Ethanol/Gasoline Blends in Spark-Ignition Engines*. PhD thesis, The University of Melbourne, 2013.
- [107] Andreas Fleig Elina Brutschin. Geopolitically induced investments in biofuels. *Energy Economics*, 74(1):721–732, 2018.
- [108] Muharrem Eyidogan, Ahmet Necati Ozsezen, Mustafa Canakci, and Ali Turkcan. Impact of alcoholâ“gasoline fuel blends on the performance and combustion characteristics of an si engine. *Fuel*, 89(10):2713 – 2720, 2010.
- [109] Zhijin Zhang, Tianyou Wang, Ming Jia, Qun Wei, Xiangzan Meng, and Gequn Shu. Combustion and particle number emissions of a direct injection spark

- ignition engine operating on ethanol/gasoline and n-butanol/gasoline blends with exhaust gas recirculation. *Fuel*, 130:177 – 188, 2014.
- [110] Vickey Kalaskar, Dongil Kang, and Andre L Boehman. Impact of Fuel Composition and Intake Pressure on Lean Autoignition of Surrogate Gasoline Fuels in a CFR Engine. *Energy & Fuels*, 31(10):11315–11327, 2017.
- [111] Ahmet Necati Ozsezen and Mustafa Canakci. Performance and combustion characteristics of alcohol-gasoline blends at wide-open throttle. *Energy*, 36(5):2747 – 2752, 2011.
- [112] HÅseyin Serdar YÅcesu, Tolga TopgÅl, Can Åřinar, and Melih Okur. Effect of ethanol-gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in different compression ratios. *Applied Thermal Engineering*, 26(17):2272 – 2278, 2006.
- [113] M.A. Kalam I.M. Rizwanul Fattah S.M. Palash M.J. Abedin B.M. Masum, H.H. Masjuki. Effect of ethanol-gasoline blend on nox emission in si engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24(9):209 – 222, 2013.
- [114] I. Schifter, L. Diaz, R. Rodriguez, J.P. GÅmez, and U. Gonzalez. Combustion and emissions behavior for ethanol-gasoline blends in a single cylinder engine. *Fuel*, 90(12):3586 – 3592, 2011. Environmental Modeling of Catalytic Reactions in the Oil Refining Industry.
- [115] Y Yacoub, R Bata, and M Gautam. The performance and emission characteristics of c1-c5 alcohol-gasoline blends with matched oxygen content in a single-cylinder spark ignition engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 212(5):363–379, 1998.
- [116] Dongyoung Jin, Kwanhee Choi, Cha-Lee Myung, Yunsung Lim, Jongtae Lee, and Simsoo Park. The impact of various ethanol-gasoline blends on particulates and unregulated gaseous emissions characteristics from a spark ignition direct injection (sidi) passenger vehicle. *Fuel*, 209:702 – 712, 2017.