



Institución Universitaria

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA MEZCLA
HIDRÓGENO-OXÍGENO (HHO) EN LA
OPERACIÓN Y RENDIMIENTO DE UN
MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN
FUNCIONANDO CON BIODIESEL**

Francisco Alex Pitti Zuleta

Instituto Tecnológico Metropolitano
Facultad de Ingenierías
Medellín, Colombia

2016

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA MEZCLA HIDRÓGENO-OXÍGENO (HHO) EN LA OPERACIÓN Y RENDIMIENTO DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN FUNCIONANDO CON BIODIESEL

FRANCISCO ALEX PITTI ZULETA

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de
Magister en Gestión Energética Industrial

Director (a):

M.Sc. Karen Paola Cagua Madero

Codirector (a):

PhD. Carlos Alberto Acevedo Álvarez

Línea de Investigación :

Energía térmica

Grupo de investigación:

Materiales Avanzados y Energía

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2016

Dedicado a:

A mi Madre e hijos, apoyo y alegría de mi vida.

Cuando enfrentamos situaciones difíciles de resolver, muchas veces nos aburren y las postergamos constantemente, pero cuando hay una mano amiga que nos guía, salimos adelante.

Agradecimientos

A los docentes de la maestría en Gestión Energética Industrial del ITM, a la M.Sc. Karen Paola Cacia Madero, asesor incondicional de mi trabajo, al PhD. Carlos Alberto Acevedo Álvarez por sus valiosos aportes y correcciones a nivel personal como metodológico, al ingeniero Jaime Fernando Zapata López por sus valiosos aportes para el desarrollo de este trabajo, al PhD. Luis Javier Cruz Riaño y a los colegas y amigos, que me ayudaron a sacar esta investigación.

Resumen

En este trabajo de investigación se estudió el efecto de la adición de oxihidrógeno (HHO) en el comportamiento mecánico y ambiental de un motor de encendido por compresión funcionando con Biodiesel. Para el desarrollo del estudio, se implementó un dispositivo de generación de HHO por electrolisis, alimentado con energía eléctrica producida por el alternador del motor de combustión interna. El HHO producido fue introducido en el múltiple de admisión del aire del motor, originándose la succión del HHO (casi a presión atmosférica) debido al vacío del múltiple, obteniendo una operación en modo dual con biodiesel y HHO. El efecto de la adición de HHO, sobre el desempeño mecánico y ambiental del motor, fue evaluado experimentalmente al 50% y 100% de la carga, utilizando biodiesel como combustible primario. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en la ciudad de Medellín (1495 m.s.n.m). Para determinar la máxima cantidad de HHO suministrada, se usó como criterio la estabilidad en el funcionamiento del motor.

El combustible HHO introducido en el ducto de admisión de aire incrementó el consumo de Biodiesel en 1,10%, debido a que la producción por electrólisis del HHO generó un consumo energético adicional al motor. Adicionalmente, cuando se utilizó la mezcla del biodiesel + HHO se observó que la entrega de Óxido de Nitrógeno (NO_x) disminuyó en un 7% comparada con el funcionamiento en modo diésel.

Palabras clave: Oxihidrógeno, biodiesel, motor de encendido por compresión.

Abstract

In this research the effect of the addition of oxyhydrogen (HHO) on the mechanical and environmental behavior of a compression ignition engine running on Biodiesel was studied. For the development of the study, an electrochemical HHO generation device was implemented, powered by electric power produced by the alternator of the internal combustion engine. The produced HHO was added to the engine in the intake manifold, obtaining a dual mode operation with biodiesel and HHO. The effect of the addition of HHO on the mechanical and environmental performance of the engine was evaluated experimentally at 50% and 100% of the load using biodiesel as the primary fuel. The experimental tests were carried out in the city of Medellín (1495 m.s.n.m). In order to determine the maximum amount of HHO supplied, the stability in the operation of the engine was used as criterion.

HHO fuel introduced into the air inlet duct increased Biodiesel consumption by 1.10%, because the production by electrolysis of the HHO generated an additional energy consumption to the engine. Additionally, when the biodiesel + HHO blend was used it was observed that the delivery of Nitrogen Oxide (NO_x) decreased by 7% compared to diesel mode operation.

Keywords: Oxyhydrogen, biodiesel, Compression ignition engine

Contenido

	Pag.
Resumen	IX
Abstract.....	X
Contenido.....	¡Error! Marcador no definido.
Lista de figuras.....	¡Error! Marcador no definido.
Lista de tablas	¡Error! Marcador no definido. IV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XV
Introducción.....	4
Capítulo 1	<u>6</u>
CONTEXTO DE LA TESIS	<u>6</u>
1.1 Antecedentes.....	<u>6</u>
1.2 Descripción del problema.....	<u>6</u>
1.3 Objetivos.....	<u>9</u>
1.3.1 Objetivo General	<u>9</u>
1.3.2 Objetivos Especificos.....	<u>9</u>
Capítulo 2.....	<u>10</u>
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	10
2.1 Motores de encendido por compresión.....	10
2.1.1 Características de emisiones de los motores funcionando en modo dual con hidrógeno.....	14
2.2 Estado del Arte	16
2.2.1 Motor de encendido por compresión dual.....	16
2.2.2 Proceso de combustión de un motor dual.....	<u>26</u>
CAPÍTULO 3.....	29
METODOLOGÍA	29
3.1 Diseño del Prototipo.....	29
3.1.1 Análisis energético.....	34

3.1.1.1	Pérdida de potencia por altura sobre el nivel del mar	<u>34</u>
3.1.1.2	Balance de energía en el sistema de producción de HHO	<u>35</u>
3.1.1.3	Determinación de la energía a portada por los combustibles primarios	36
3.1.2	Procesamiento de datos de emisiones del motor	37
3.1.2.1	Reacciones químicas incluyendo las especies medidas	39
3.1.3	Variables respuesta de la operación del motor	40
3.1.3.1	Eficiencia efectiva.....	40
3.1.4.2	Consumo específico del combustible	40
3.1.3.3	Dosado	41
3.1.3.4	Rendimiento volumetrico	<u>42</u>
3.1.3.5	Nivel de sustitución del biodiesel en operación en modo dual	42
CAPÍTULO 4	.....	44
ANÁLISIS DE RESULTADOS	.....	44
4.1	Desempeño mecánico del motor	<u>45</u>
4.1.1	Dosado, temperatura de operación y rendimiento volumetrico	<u>45</u>
4.1.2	Consumo específico de combustible.....	<u>50</u>
4.1.3	Eficiencia efectiva	<u>51</u>
4.1.4	Nivel de sustitución	<u>53</u>
4.2	Coomportmiento ambiental del motor	54
4.2.1	Índice de emisión de CO ₂	55
4.2.2	Índice de emisión de CO.....	<u>56</u>
4.2.3	Índice de emisión de NO _x	57
4.2.4	Índice de emisión de O ₂	59
CAPÍTULO 5	.....	60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....	60
5.1	Conclusiones	60
5.2	Recomendaciones	<u>62</u>
Bibliografía	.....	63
Anexos	.....	¡Error! Marcador no definido.71

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Ciclo de operación de cuatro tiempos	10
Figura 2. Dispositivo generador de Oxihidrógeno	30
Figura 3. Diagrama de experimentación de un motor dual biodiesel y HHO con generador de potencia eléctrica.	33
Figura 4. Dosado por flujos en función de la salida de potencia.	46
Figura 5. Rendimiento volumétrico en función de la salida de potencia.....	47
Figura 6. Temperatura del refrigerante para los diferentes puntos de operación..	49
Figura 7. Temperatura de los gases de escape versus la potencia generada.	49
Figura 8. Consumo efectivo específico de combustible versus potencia generada.....	51
Figura 9. Eficiencia efectiva como función del grado de carga y el tipo de combustible.	52
Figura 10. Nivel de sustitución de biodiesel con el motor operando en modo dual	53
Figura 11. Índice de emisiones de CO ₂ para los tres combustibles... ..	56
Figura 12. Índice de emisiones de monóxido de carbono para los tres combustibles.	57
Figura 13. Índice de emisiones de NO _x en función del grado de carga del motor.	58
Figura 14. Índice de emisiones de O ₂ para los tres combustibles en los diferentes puntos de operación.....	59

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2.1. Diferencias entre el diésel y biodiésel en motores dual.....	20
Tabla 2.2. Resumen de las metodologías experimentales utilizadas en motores dual diesel	23
Tabla 2.3. Resumen de parámetros experimentales en motores duales diesel H ₂ y diesel HHO.....	25
Tabla 3.1. Caracterización de los niveles de producción de HHO y del consumo de energía eléctrica de la celda electrolítica	30
Tabla 3.2. Características del motor y el generador.....	31
Tabla 3.3. Elementos del diagrama de experimentación.....	33
Tabla 3.4. Propiedades de los combustibles utilizados	36
Tabla 3.5. Fórmulas químicas de los combustibles utilizados	38
Tabla 4.1. Flujos másicos y aporte energético de combustibles.. ..	44
Tabla 4.2. Datos experimentales promedios	45
Tabla 4.3 Emisiones específicas.	55

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m²	
C_paire	Calor específico del aire	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$	
H	Humedad absoluta del aire	$\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$	
HR	Humedad relativa del aire	%	
I	Corriente del motor	A	
m_a	Masa Molecular del aire	uma o g	
m_{comb}	Flujo masico del combustible	$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	
m_{aire}	Flujo masico del aire	$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	
m_w	Masa Molecular del agua	uma o g	
M_{comb}	Peso molecular del combustible	g/mol de combustible	
M_{aire}	Peso molecular del aire	g/mol de aire	
(N_{aire})_{st}	Número de moles de aire estequiométricas	moles aire/mol combustible	
BSFC	Consumo efectivo específico de combustible	g _{comb} /kW.h	
η_e	Eficiencia efectiva	%	
P_{elect}	Potencia eléctrica	kW	

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
N_e	Potencia efectiva en sitio a un régimen de giro determinado		
$N_{e,0}$	Potencia efectiva entregada por el motor a nivel del mar		
p	Presión atmosférica en sitio		
p_v	Presión de vapor en sitio		
p_0	Presión atmosférica de referencia	1 Bar	
$p_{v,0}$	Presión de vapor de referencia	0,01 Bar	
T_0	Temperatura ambiente de referencia	293 K	
P	Presión parcial	Pa	
PCI_{comb}	Poder calorífico inferior del comb	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	
Q	Caudal	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	
Q	Caudal de aire	$\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$	
R	Constante universal de los gases	$0.81 \frac{\text{atm} * \text{l}}{\text{mol} * \text{K}}$	
T	Temperatura absoluta	K	
T_{aa}	Temperatura del aire ambiente	K	
T_i	Temperatura del medio ambiente	°C	
γ	Peso específico del agua	$\frac{\text{N}}{\text{m}^3}$	
z	Nivel de sustitución	%	

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ΔP	Perdida de presión	mm. c. a	Ec. 4-1
η_t	Eficiencia térmica	%	
ρ_{aire}	Densidad del aire	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Ec. 3-5
ρ_{comb}	Densidad del combustible (Hidrógeno)	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Ec. 3-5
Φ	Dosado		

Introducción

Como consecuencia del impacto ambiental y la disminución de las reservas de los combustibles fósiles a nivel mundial se buscan soluciones que permitan su sustitución parcial o total. El hidrógeno constituye una de las alternativas energéticas más prometedoras y estudiadas, principalmente por sus características como combustible renovable, reciclable y no contaminante. Es posible obtener hidrógeno mezclado con oxígeno a partir de la electrólisis del agua, pudiéndose así utilizar directamente en motores de combustión interna.

Los motores de encendido por compresión utilizan principalmente diesel como combustible. No obstante, el biodiesel, un combustible renovable, ha sido utilizado como combustible alternativo permitiendo tener sustituciones de hasta 100%, (Bedoya 2007). Sin embargo, dicha sustitución ha ocasionado problemas asociados con la disminución de potencia con respecto al funcionamiento del motor con diesel y en la literatura se proponen diferentes alternativas entre las que se encuentra utilizar otro tipo de combustibles como gas natural e hidrógeno, entre otros.

En este trabajo se estudió el efecto que tiene el oxihidrógeno HHO en la operación y rendimiento de un motor de encendido por compresión, funcionando con biodiesel como combustible. Se diseñó y acopló un sistema de producción de HHO mediante electrólisis y este combustible se introdujo por el ducto de admisión de aire del motor. El motor funcionó con 100% de biodiesel y con adición de HHO y se evaluó su rendimiento y sus emisiones contaminantes.

Esta tesis está dividida en 5 capítulos: en el capítulo 1, se realiza una descripción del problema y los objetivos generales y específicos.

En el capítulo 2 se presenta el marco teórico, en dónde se presentan los conceptos y teorías más importantes para el estudio de los motores de encendido por compresión. También se presenta la revisión del estado del arte. En el capítulo 3 se describe la metodología utilizada en el diseño del prototipo experimental, y la realización del análisis energético, el procesamiento de los datos, determinación de variables respuesta de la operación del motor y el diagrama de experimentación.

En el capítulo 4, se muestra el análisis de los resultados obtenidos con respecto al efecto de la adición de HHO al motor funcionando con biodiesel.

El capítulo 5, se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

CAPÍTULO 1

1.1 Antecedentes

1.2 Descripción del problema

En Colombia, la generación de gases contaminantes, el alto costo de los combustibles tradicionales para motores de combustión interna y la gran cantidad de región no interconectada con energía eléctrica, da pie a intensificar la investigación en torno a los combustibles alternativos. La adición del oxihidrógeno es una propuesta de interés gracias a las propiedades que caracterizan al hidrógeno, como un poder calorífico muy superior al del biodiesel, pudiendo recuperarse así el porcentaje de potencia perdida en la combustión del biodiesel con respecto al diesel (que es de un 6% aproximadamente). Sin embargo, esto dependerá de la eficiencia de producción de HHO con que cuente el sistema generador, dado que para su producción se requiere un consumo adicional de energía eléctrica, la cual debe ser suministrada por el motor, por esto se debe encontrar la adecuada para un correcto funcionamiento, sin problemas de estabilidad con la cantidad de HHO para adicionar al motor mientras funciona con biodiesel como combustible primario. Adicionalmente, la adición de hidrogeno en forma de HHO es una clase de combustible renovable verde, sus productos de combustión son el agua principalmente y emisiones de NO_x. El hidrógeno tiene ventajas sobresalientes en comparación con otros combustibles alternativos, ya que está libre de carbono, lo que da como resultado que no genera emisiones de HC, CO y CO₂. El HHO se puede utilizar en un motor diesel sin modificaciones en el motor. La velocidad de la llama laminar es una de las propiedades de combustión más importantes de una mezcla combustible. Es un objetivo importante para la validación y el desarrollo del mecanismo químico, especialmente en las condiciones de alta presión, por esto cuando la proporción de hidrocarburos vaporizados del combustible en el momento de la ignición era baja, la inclusión de

hidrogeno en la combustión acelero la quemadura de combustión, la cual se mantiene aproximadamente constante. El hidrógeno no se puede utilizar directamente en el motor de CI debido a una mayor autoignición de temperatura. pero puede utilizarse como combustible secundario Con aceite vegetal en modo de combustible dual. Es un gas no tóxico, no odorante y también puede quemarse completamente (Kale y col. 2016). La adición de HHO a la mezcla aire combustible (diésel o biodiesel), que ingresa al motor, tiene un efecto significativo sobre las características de combustión de la mezcla y el desempeño del motor, debido a la influencia del hidrógeno (H_2) en el proceso de combustión y como resultado de que sus características de combustión son significativamente diferentes en comparación con otros combustibles de hidrocarburos, entre ellas; límite de inflamabilidad más amplio de 4-75% en volumen en aire comparado con el diesel 0.7-5%, la energía mínima requerida para el encendido de la mezcla hidrogeno aire es 0,02 mJ solamente, esto permite que el motor con hidrógeno funcione bien en mezclas magras y asegura una ignición rápida, Kumar y col. (2012).

Con la adición de HHO al biodiesel se origina un aumento de potencia debido al incremento en la concentración de oxígeno, lo cual produce una combustión mejorada por el mezclado del HHO con el aire y el combustible. El HHO produce un menor tiempo de encendido por la alta velocidad de llama laminar y un periodo de combustión más corto, lo cual da pérdidas de calor más bajas, mucho más cerca de una combustión de volumen constante ideal, que da como resultado un aumento de la relación de compresión y por lo tanto en la eficiencia térmica.

La alta velocidad de combustión del HHO suministra un aumento más veloz de la presión y de la temperatura, lo que puede disminuir el golpeteo principalmente en condiciones de ralenti (baja o nula carga). Los resultados muestran que la adición de HHO puede aumentar significativamente la región inflamable y extender el límite de inflamabilidad a relaciones de equivalencia más bajas. Dado que el HHO tiene una energía de ignición baja y una velocidad de llama rápida, la mezcla HHO-biodiesel puede ser encendida más fácilmente y quemada rápidamente que el combustible biodiesel puro. El bajo límite de inflamabilidad del gas HHO permite una

combustión estable en condiciones muy diluidas. Sin embargo, se observa que el HHO no puede tener un efecto positivo en la producción de potencia en condiciones aproximadamente estequiométricas (más ricas). Dado que la densidad energética del hidrógeno en base al volumen es mucho menor que la del combustible biodiesel (Masjuki H.H. y col, 2016). Por esto, particularmente, se busca encontrar la cantidad ideal de HHO que se debe adicionar al proceso de combustión de un MEC trabajando con biodiesel como combustible primario, garantizando que el desempeño mecánico-ambiental del motor, conserve unas condiciones de operación adecuadas, en términos de estabilidad y nivel de emisiones, en comparación al funcionamiento original con diésel.

Para lograr unas estrategias de mejoramiento que reduzca las emisiones de gases contaminantes, y alcance una potencia similar o mejor a la ofrecida por combustible diésel tradicional, mientras se utiliza biodiesel con adición de oxihidrógeno como combustible, será necesario conocer los siguientes aspectos:

- Porcentaje de adición de oxihidrógeno al biodiesel para evitar el la inestabilidad en la operación del motor, la cual puede ser producida por el anticipo de la ignición del combustible dual, por altos porcentajes de adición de oxihidrógeno, y una elevada carga. (Saravanan y col, 2008).
- Método para adicionar el oxihidrógeno con el biodiesel y la toma de medida del porcentaje de la adición.
- Propiedades físico-químicas del combustible biodiesel con la adición de Oxihidrógeno, para controlar la seguridad de este. (Saravanan y col. (2008); Liew (2010); Szwaja (2009); Miyamoto (2011)).
- Comportamiento de las emisiones contaminantes con la adición de oxihidrógeno, (Korakianitis 2010; Sarana y col 2009).

En Colombia es muy poca la documentación sobre la experiencia en el análisis del comportamiento mecánico y ambiental de motores funcionando con biodiesel y HHO en modo dual.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Estudiar el efecto de la adición de oxihidrógeno en el comportamiento mecánico y ambiental de un motor de encendido por compresión funcionando con Biodiesel.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar los máximos porcentajes de Oxihidrógeno a utilizar, teniendo como criterio la estabilidad en el funcionamiento del motor.
- Evaluar experimentalmente la operación y rendimiento del motor con adición de Oxihidrógeno, para varios niveles de carga.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Motores de encendido por compresión

Los motores de encendido por compresión (MEC) actúan bajo el ciclo diesel, haciendo fluir aire a través del ducto de admisión y comprimiéndolo a alta presión y temperatura para provocar la inflamación del combustible inyectado y el comienzo del proceso de combustión. Después, los gases producto de la combustión se expanden en el cilindro realizando trabajo mecánico y por último, son expulsados a menor temperatura en la carrera de escape de la cámara de combustión (Ver Figura 3) (Bedoya, 2007).

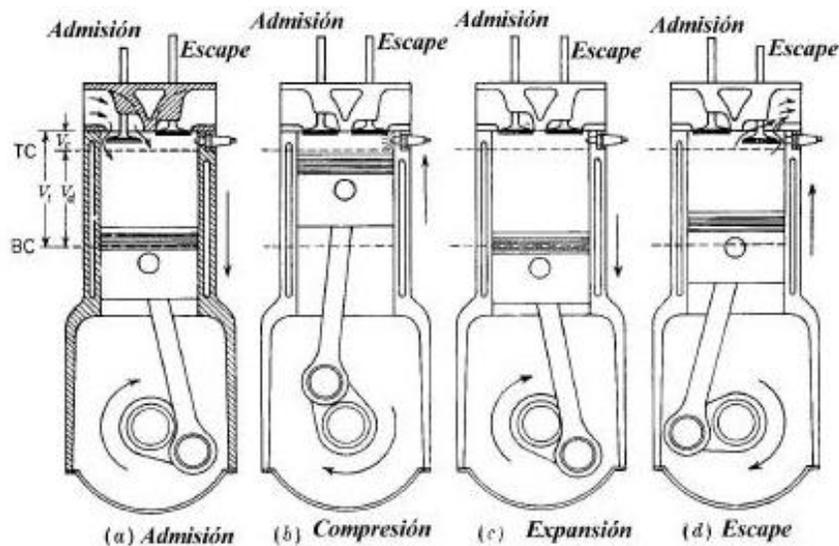


Figura 1. Ciclo de operación de cuatro tiempos. Fuente: (Agudelo, 2000)

Cuando se aplican combustibles alternativos como el biodiesel, biomasa, biocarburante, entre otros, es probable percibir la modificación de los sistemas exteriores del motor: al trabajar un motor MEC en forma dual, le empalmamos al ducto de admisión de aire una boquilla para crear la facilidad de mezclar el combustible gaseoso que está ingresando, para posteriormente pasar a la cámara de combustión, donde se comprime hasta producir el inicio de la combustión con la inyección del combustible líquido, un instante antes del punto muerto superior de la carrera del pistón. La ignición de la carga se da por la alta compresión y la inyección de una fracción del diesel, indispensable para lograr el adecuado desempeño del motor, esta porción de diesel se le denomina como la inyección piloto (Bedoya 2007)

La reducción de esta fracción es la que permite que se sustituya una cantidad considerable de combustible diesel, así como ocasionará una alteración importante en el proceso de combustión, que obedece a las propiedades físicas y químicas del nuevo combustible. Además, el llamado combustible secundario también tiene un efecto importante en la duración de la combustión, que influye considerablemente en el tiempo de retardo para inflamarse. Este se conoce como tiempo de retraso ocasionada por un intervalo de tiempo, que ocasiona cambios de consideración en el funcionamiento total del motor MEC (Bedoya, 2007).

Para la parte experimental en los motores de combustión interna se ha trabajado de forma dual con la mezcla del combustible primario diesel y el combustible a experimentar ingresa en forma gaseosa a través del ducto de aire a la cámara de combustión. El propósito de esta investigación es la de experimentar un motor de encendido por compresión con biodiesel como combustible primario que es inyectado a una presión muy alta para pulverizarlo ya que está en estado líquido, a la cámara de combustión (precámara ya que la inyección es directa en este motor) y la adición de HHO por el ducto de aire hacia la cámara de combustión, donde está llena de aire.

Cuando el motor comienza el segundo tiempo (proceso de compresión), la temperatura alcanzada es superior a la temperatura de autoignición (entre 700 y 900°C) iniciando la combustión cuando el combustible es inyectado en la parte

superior de la cámara de combustión a alta presión mediante unos orificios pequeños que tiene el inyector, atomizándose y se mezcla con el aire que también está a alta presión. Esta mezcla se inflama rápidamente, expandiéndose el gas en la cámara e impulsando el pistón hacia abajo. Este es un proceso adiabático (idealmente) que genera un desplazamiento rectilíneo a lo largo de la carrera del pistón. Este movimiento rectilíneo es transformado a un movimiento de rotación generado por el cigüeñal que es transmitido por la biela ensamblada al pistón. Proceso que se adaptara para la generación de energía eléctrica por medio de un generador (Bedoya, 2007).

Muchas compañías automotrices están investigando para desarrollar motores con la combustión dual, utilizando el hidrógeno, ya que éste es uno de los combustibles más importantes en un futuro próximo para cumplir con las actuales exigentes normas de emisión, el cual es preparado sin utilizar insumos de combustibles fósiles, mejorando la reducción de la emisión de dióxido de carbono (CO_2), y otros contaminantes como el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos sin quemar (THC) y material particulado, ayudando de esta forma a el mejoramiento ambiental (Boretti, 2011).

Fajardo y colaboradores (2006) realizaron un estudio experimental en el que utilizaron biodiesel y mezclas biodiesel-diésel, encontrando disminuciones en la potencia del motor de hasta 5% debido al menor poder calorífico del biocombustible con respecto al del diesel convencional. También encontraron una disminución en la opacidad de los humos a medida que se adiciona biodiesel a la mezcla y el consumo de combustible fue mayor.

Motores de combustión interna funcionando con oxihidrógeno

El hidrógeno (H_2) es uno de los más prometedores combustibles alternativos por sus características de combustión limpia (Saravanan y col, 2008). Es el elemento más abundante del Universo, es incoloro, inodoro e insípido, en la tierra existe como gas diatómico, pero en estado gaseoso es muy escaso, en la atmósfera terrestre se encuentra tan solo una fracción de 1 ppm en volumen. La fuente más común de H_2

es el agua (H_2O), otras fuentes de H_2 son la mayoría de los compuestos orgánicos, los combustibles fósiles y el gas natural. (Eckermann, 2001).

Alemania ha sido uno de los impulsores en la investigación y desarrollo de vehículos operando con combustibles alternativos como el hidrógeno, con las empresas automotrices BMW y Mercedes Benz, lo mismo en el Japón las industrias Toyota y Honda, con publicaciones de artículos en revistas científicas. La mayor parte de los motores Diesel hidrógeno de combustible dual se ha desarrollado hasta ahora hidrógeno en el colector de admisión o en el puerto de admisión, y luego inyectando el combustible Diesel en el cilindro para encender allí una mezcla homogénea. En este artículo se establece un nuevo proceso de cómo se puede cambiar la alimentación tradicional, modificando al sustituir el inyector diesel por un inyector doble como los formulados por Westport desde hace más de 20 años para gas natural comprimido (CNG) y para CNG e hidrógeno para proporcionar mejores resultados (Boretti, 2001).

El hidrógeno es uno de los más prometedores combustibles alternativos. Por sus características de combustión limpia y mejor rendimiento. La velocidad de combustión laminar del hidrógeno es de $1,9 \text{ m/s}$ en presión y temperatura estándar, y es casi cinco veces mayor en comparación con los demás combustibles, de $0,4 \text{ m/s}$ (Szwaja y col, 2009).

La velocidad de deflagración del Oxihidrógeno estudiado es aproximadamente tres veces mayor que la del biodiesel debido a la naturaleza misma de sus componentes, en especial del hidrógeno, cuyo alto porcentaje en la mezcla se traduce en una velocidad de deflagración más alta. El hidrógeno, al ser una molécula simple, se puede oxidar rápidamente aumentando la velocidad de reacción en el frente de llama (Karim GA y col, 1996).

Saravana y colaboradores, en Agosto del 2008, estudiaron el análisis de la combustión de un motor diesel de inyección directa con hidrógeno (DI), se utilizó hidrógeno con diesel e hidrógeno con Dietil éter (DEE) como fuente de ignición. El hidrógeno fue inyectado a través del puerto de admisión, el éter dietílico fue inyectado

a través del colector de admisión y el diesel fue inyectado directamente dentro de la cámara de combustión. Se trabajó optimizando los tiempos de inyección para el hidrogeno y el DEE en función de las características de rendimiento, combustión y emisión del motor. Entre los resultados más importantes encontraron que el hidrógeno en forma dual como con el DEE mostró un aumento de la eficiencia térmica del freno en un 22% y 35%, respectivamente, en comparación con el diesel. Durante la operación del motor con de hidrógeno-DEE, se observó un golpeteo severo que superaba el 75% de carga debido a la combustión instantánea de hidrógeno a altas cargas. También se nota la reducción de NOx y de humos con ambos combustibles experimentales.

2.1.1 Características de las emisiones de motores funcionando en modo dual con hidrógeno

En el estudio realizado por El-Kassaby y col. (2015) sobre un motor de combustión de gasolina con la elaboración de un sistema sencillo de generación de HHO, tuvo como objetivo ver como mejora el rendimiento y las emisiones del motor al adicionar a la gasolina el HHO. Se utilizaron dos catalizadores el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de sodio (NaOH) para la generación del HHO, instalado en un motor de gasolina Skoda Felicia de 1,3 GLXi. El rendimiento térmico del motor se incrementó hasta un 10%, reduciendo el consumo de combustible hasta un 34%. Las emisiones de NOx, CO y HC disminuyeron en un 15%, u18% y 14%, respectivamente. Adicionalmente, encontraron que el mejor catalizador fue el KOH, con una concentración de 6 g /l.

Una investigación experimental de Liew C. en 2010, sobre el proceso de combustión de un motor diesel de servicio pesado enriquecida con H₂, demostró que la adición en una pequeña cantidad de H₂ produce un efecto suave sobre la presión del cilindro y el proceso de combustión, pero cuando se adiciona una gran cantidad de H₂ a alta carga se aumenta inesperadamente la presión máxima del cilindro y la velocidad máxima de liberación de calor. Entre los resultados más

importantes encontraron que la adición de H_2 a carga elevada (70%) debe ser limitada para dirigir la presión máxima del cilindro, por su seguridad como por su consistencia mecánica, también se redujo radicalmente la duración de la combustión y se incrementó la velocidad de liberación de calor observada en el centro de la combustión por difusión con respecto al diesel.

Debido a los grandes inconvenientes establecidos con la producción y almacenamiento de Hidrógeno en el estado puro, se ha dado pie a diversas investigaciones, entre ellas la de Bari y colaboradores en diciembre 2008. El objetivo era lograr el almacenamiento del hidrógeno como combustible de abastecimiento a bordo de un motor. Se genera el hidrogeno mezclado con oxígeno por medio de la electrolisis del agua, esta mezcla es llamada Oxihidrógeno (HHO). Basando el objetivo de la investigación en mirar la mejora en el rendimiento de un motor de combustible diesel convencional adicionando un porcentaje de HHO al diesel. Se utilizaron como parámetros en la investigación: velocidad constante, carga variable y la variación del porcentaje de HHO en el diesel.

La velocidad de la llama generada por el combustible diesel es nueve veces más lenta que la velocidad de llama del combustible hidrógeno. Por lo tanto al adicionar 6.1% de HHO de la mezcla equivalente en diesel, se logra una combustión de la mezcla más rápida y completa. Debido a esto se producen picos de presión más altos cerca del punto muerto superior, generando una mayor eficacia de la presión, siendo mejor el desarrollo de trabajo, logrando así que la eficiencia térmica del frenado aumente 2,6%, 2,9% y 1,6% con las cargas 19 kW, 22 kW y 28 kW respectivamente, como también un ahorro de combustible de 15.07%, 15.16% y 14.96% respectivamente. Sin embargo, la adición de HHO más allá del 5% no tiene un efecto significativo en la mejora del rendimiento del motor. Las emisiones de HC, CO_2 y CO se redujeron por una mejor combustión, mientras que los NO_x aumentaron debido al aumento de la temperatura durante la combustión. (Bari y col, 2008).

2.2 Estado del arte

2.2.1 Motor de encendido por compresión Dual

Para Enero 2017 se publicó la investigación de Mustafa Ozcandi y colaboradores, la cual tenía como objetivo analizar los efectos del gas puro de hidrógeno e hidróxido (HHO) añadido a una mezcla de éster metílico de aceite de ricino-diesel, sobre el rendimiento del motor y las emisiones, ya que este tipo de mezcla (HHO + Biodiesel) no se han investigado ampliamente para el motor de encendido por compresión

Se observó que el hidrógeno puro o el gas de aire por el ducto de admisión enriquecido con hidróxido aumentaron ligeramente la potencia y el par de torsión, los consumos específicos de combustible de hidrogeno puro + CME20 y HHO + CME20 se reducen significativamente de acuerdo con la muestra de CME20 y diesel, también se observa la reducción de las emisiones de CO con H₂ + CME y HHO + CME20 hasta de un 27% y un 20% respectivamente. Caso contrario con las emisiones de NO_x, ya que estas aumentaron con las adiciones de H₂ y HHO.

En Enero de 2017 Uludamar Erinc y colaboradores basados en que hay dos razones principales para la búsqueda de combustibles alternativos, la ambiental y reservas limitadas de crudo. Se dieron a la tarea de investigar el biodiesel y el hidrogeno. En un motor Mitsubishi de cuatro tiempos, cuatro cilindros de inyección directa, alimentado con diesel bajo en azufre, 20% y 40% de biodiesel de flor de sol, Canola y de Maíz. Este estudio determinó la influencia del nivel de vibración del motor entre 1200 a 2400 RPM al adicionar HHO al biodiesel de maíz con tasas de flujo de 2, 4 y 6 LPM. La adición de HHO tiende a disminuir la aceleración de la vibración del motor, la adición de HHO-2, HHO-4 y HHO-6, disminuyo la aceleración de vibración en de 1,23%, 2,34% y 3,54%, respectivamente. El combustible mostro una combustión mejorada.

El estudio realizado por Yilman Ali Can y colaboradores en Agosto del 2010, con la producción de HHO por medio de electrólisis de diferentes Electrolitos Hidróxido de potasio (KOH), Hidróxido de Sodio (NaOH) y Cloruro de Sodio (NaCl); la cual tenía como objetivo el Efecto de la adición de gas Oxihidrógeno (HHO) sobre el rendimiento y las emisiones de escape en los motores de encendido por compresión con diesel puro, se observó que si el HHO de NaOH en solución superaba el 1% en masa, la corriente eléctrica suministrada por la batería aumentó dramáticamente debido a la excesiva reducción de la resistencia eléctrica. La adición del sistema HHO al motor sin ninguna modificación dio como resultado un aumento de la producción de par motor de un promedio del 19,1%, reduciendo las emisiones de CO en un promedio de 13,5%, las emisiones de HC en un promedio de 5%. También se observó que a velocidades medias y altas del motor; El sistema HHO con combustible diesel produce una mayor potencia de par motor en comparación con el funcionamiento con motor diesel puro. La alta velocidad de combustión y la baja energía de ignición de la mezcla de gas HHO minimizan el efecto del flujo de carga del cilindro debilitado y el aumento de la fracción de gas residual que bloquea el combustible para ser rápido y completamente quemado a altas velocidades.

En la India Nalgundwar y colaboradores en Enero del 2016 realizaron un estudio experimental, utilizando una mezcla dual de biodiesel con diésel en un motor de encendido por compresión, utilizando dos tipos diferentes de biodiesel. Los resultados para una menor mezcla de biodiesel (es decir, 90% de diesel y 10% de biodiesel) mostraron un aumento promedio del 4,65% en la potencia al freno en el motor con respecto al funcionamiento en modo diesel. Las muestras, D60JB20PB20 y D20JB40PB40 mostraron un aumento promedio del 12% y 15,4% respectivamente en la eficiencia térmica en comparación con el diesel convencional. Las reducciones de CO se estimaron en 7,1%, 17,7% y 14,5% para las muestras D90JB5PB5, D80JB10PB10 y D70JB15PB15, respectivamente, en comparación con el diesel convencional. . Con muestras de trabajo de B5 y B10 se obtuvieron

datos de aumento promedio del 5,3% y 9,2% en las emisiones de NO_x, respectivamente comparadas con el funcionamiento en modo diesel.

Turan y colaboradores en Febrero del 2016 usaron mezclas de Oxihidrógeno (HHO) y gas natural comprimido (CNG) como combustible secundario en un motor diésel. Adicionaron 5,1 LPM de HHO y en una mezcla del 25% de HHO y 75% de CNG (5,1 y 15,3 LPM) con el motor funcionando a una velocidad entre 1200 y 2600 rpm. El gas HHO contiene hidrógeno y oxígeno que permiten una combustión más potente y eficiente en los cilindros y se obtuvo un promedio de 2.7% y 4.75% de mejoría del par de frenos para las mezclas de combustible HHO + diesel piloto y 25HHOCNG + diesel piloto, para la mezcla de 25HHOCNG con respecto a la emisión de CO se incrementaron con un 16% en comparación con el funcionamiento del combustible diesel y como el HHO + diesel piloto está libre de carbono se da la disminución de las emisiones de CO con un 15% con respecto al diesel. El GNC reduce las emisiones de NO_x en un 28.4% con respecto al diesel.

Es necesario buscar combustibles alternativos que puedan ser producidos a partir de recursos disponibles localmente en el país como el alcohol, el biodiesel, los aceites vegetales, etc. Este trabajo realizado por Durairaja y asociados en investigación en el 2012, se centran en la producción y caracterización del biodiesel como puede ser ayudado con el Oxi-hidrógeno gaseoso que se produce por el proceso de electrólisis del agua. Este gas oxi-hidrógeno ha sido precalentado con la ayuda del calor residual recuperado del escape del automóvil. El uso de biodiesel con la adición de HHO en motores convencionales resulta en una reducción sustancial en la emisión de: hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y partículas. Además este calentamiento previo del aire mejora el rendimiento térmico y reduce la vibración del motor. Se observó que la combustión de la mezcla se relaciona con una eficacia termal más alta.. Debido a esto el proceso de combustión se hará de manera eficiente y el hidrógeno es cuatro veces muy eficaz cuando se compara con los combustibles ordinarios

Según Kaan y colaboradores en marzo del 2016, realizaron una investigación del estudio sobre un biodiesel de girasol (*Helianthus annuus*) en la cual se observó una

comparación de las características en un motor diesel de 3,6 litros, cuatro cilindros y cuatro tiempos operando con la inyección piloto de diesel, y se le adicione combustibles alternativos como hidrogeno puro (H_2), Oxihidrógeno (HHO) y biodiesel (B10). El H_2 puro y el HHO se introdujeron por el colector de admisión de aire del motor sin modificaciones. Según las comparaciones con el diesel con respecto al Biodiesel B10 con H_2 y con HHO se observó que en el CO fueron del 29% y el 29 % respectivamente, debido a la libertad de carbono y más oxigenación. Con respecto al CO_2 se vio también una gran diferencia con respecto del B10 + HHO con respecto al H_2 , de 8,72% Y 22,3% respectivamente. Se encontró mejor los resultados de rendimiento del motor mejor para la aplicación de HHO + B10 con respecto a H_2 + B10 y diesel limpio (como ignición de baja energía, velocidad más rápida de llama y potencia de frenado). Como también la mejora de las emisiones de escape

En la investigación e Rajaram y colaboradores en el 2014, sobre la eficiencia del gas HHO enriquecido en oxígeno al ser adicionado al motor diesel de inyección directa, sobre las características de rendimiento, emisiones y combustión. Aquí el gas hidrógeno-HHO enriquecido con oxígeno fue producido por el Proceso de electrolisis del agua. El gas producido fue aspirado dentro del cilindro Con aire de admisión a los caudales de 1 lpm y 3,3 lpm. Los resultados dan a conocer que cuando el gas HHO enriquecido fue instalado el rendimiento térmico del freno del motor aumentó en 11,06%, el monóxido de carbono disminuyó 15,38%, el hidrocarburo no quemado disminuyó 18,18% y el dióxido de carbono aumentó 6,06%. Las emisiones de NO_x aumentaron en un 11,19% y el humo se redujo sustancialmente en un 26,19%. Esto fue con el caudal de 3,3 lpm, sin embargo con el caudal de 1 lpm el gas HHO la eficiencia térmica del freno disminuyó un 4,15%. La emisión de NO_x disminuye de 226 ppm a 191 ppm lo que ofrece una disminución de 15, 48%, la emisión de humos y de CO aumento en promedio en un 7,69%.

En la tabla 2.1 se encuentran los aspectos más relevantes con respecto a los objetivos específicos de la investigación en curso, como es el análisis de la emisión

de los gases contaminantes, en la reducción del CO y SO₂, el incremento del NO_x, la reducción del material particulado y la menor opacidad en el humo de escape, con respecto a los aspectos relacionados con el funcionamiento del motor; se nota el efecto lubricante al interior del motor, pérdida de potencia del motor al utilizar biodiesel con respecto al diesel y sobre los gases tóxicos cancerígenos que genera el biodiesel. Estos aspectos son base fundamental para el mejoramiento de la adición del biodiesel con HHO, en el desempeño del funcionamiento del motor MEC en forma dual de inyección directa.

Tabla 2.1 Diferencias entre el diesel y biodiesel en motores dual. Fuente: Elaboración propia

Título y autor	Aspectos relacionados con las emisiones	Aspectos relacionados con el funcionamiento	Aspectos relacionados con la seguridad
Particulate emission characterization (Dwivedi y col, 2006)	Reducción de emisiones metálicas producidas por el desgaste del motor	Efecto lubricante al interior del motor, dada su naturaleza estérica	Gases de escape tóxicos. Se requiere más investigación
Particulate emissions from biodiesel (Agarwal y col, 2011)	El menor tamaño de material particulado, inhibe su difusión al ambiente	Se ve la disminución del rendimiento del motor en 6%	-
Effects of soybean biodiesel (Özener y col, 2012)	Reducción de emisiones de CO entre un 28% y un 46%	Reducción del torque en un 1-4%, aumento del consumo en un 2-9%	-
Biodiesel production (Öner y Altun, 2009)	Reducción de emisiones de SO ₂ y el incremento del NO _x hasta en un 56.8% Menor opacidad en el humo de escape	La potencia efectiva del motor es comparable con la obtenida a partir de diesel	-

Korakianitis y colaboradores (2010) en su investigación observaron que el biodiesel emulsionados aumentan la eficiencia térmica con respecto al biodiesel puro cuando son utilizados como combustible pilotos durante la operación de combustible dual. El aumento de la eficiencia térmica es más evidente a velocidades más altas del

motor, mientras que la reducción de NOx es más evidente a velocidades más bajas. Las emisiones de CO₂ se reducen para todos los combustibles experimentados, El operando hidrógeno como combustible dual con los combustibles piloto produce la reducción en la eficiencia volumétrica cuando el combustible gaseoso se introduce a través del colector de admisión de aire, y esto afecta la potencia de salida del motor. Cuadrado (2006) comenta que al generar la emulsión del combustible piloto, se reduce la temperatura, y a su vez emisiones de NOx.

Saravanan y colaboradores (2008), encontraron que el rendimiento térmico de un motor al utilizar diesel enriquecido con un caudal de 10 l/min de hidrógeno, y con una velocidad de motor a 1500 rpm se incrementó en 5,8% en comparación con un motor funcionando con diesel

Por los problemas asociados a la producción y almacenamiento del hidrógeno puro en la actualidad, surgieron otras investigaciones como la de Bari (2008) que se enfoca alrededor de la producción de oxihidrógeno (HHO), por medio de electrólisis en agua. Ésta generó la mezcla HHO utilizando 24 V de energía, y empleando la entrada de energía por medio del motor para obtener la potencia requerida en la producción de HHO. Los resultados mostraron que al no exceder la adición de HHO en 6%, con un caudal de 30 l/min y una carga de 22 kW, la eficiencia térmica aumentó cerca de un 3%, el ahorro de combustible fue del 15,2% y las emisiones de HC, CO₂ y CO disminuyeron, con un aumento de las emisiones NOx. Sin embargo, la adición de HHO más allá de un 5% no tiene importantes efectos en la mejora del rendimiento del motor. Se afirma que sería mejor trabajar con hidrógeno puro, pero el problema que tiene esta aplicación es el almacenamiento, costoso, e inseguro y poca autonomía que tienen en los MEC.

Se encuentra un obstáculo muy serio con respecto a realizar el funcionamiento de un MEC en forma dual con el hidrógeno, ya que se presentan fenómenos de pre-ignición, ignición espontánea, golpeteo y retro llama (Escalante & Fernandez, 2010). Es claro también que al utilizar este combustible, se permiten distintas relaciones de equivalencia en la combustión, en particular mezclas pobres, lo que trae como consecuencia un beneficio para el motor de combustión interna por compresión. Se

determina como una ventaja al utilizar el hidrógeno como combustible en los MEC, la fácil adaptación para trabajar en el motor, ya que sólo es necesario realizar un pequeño cambio en el ducto de admisión del aire. Además, el hidrógeno puede ser utilizado como aditivo para hidrocarburos o como combustible único (Escalante, 2010).

Lata & Misra, (2011) realizaron el estudio y análisis del periodo de retraso en la ignición de un motor de 62,5 kW dual diesel con hidrógeno o GLP o hidrógeno más GLP como combustibles secundarios. Trabajando con 4 cilindros turboalimentado con intercooler. Los experimentos se realizaron para medir el período de retraso en la ignición, en condiciones de carga diferentes y diversos porcentajes de sustitución. El retraso en la ignición en el motor diesel en modo dual, depende del tipo de combustibles gaseosos (Hidrógeno y GLP) utilizados y su concentración en la carga del cilindro, también influye en la temperatura de carga, la presión y la concentración de oxígeno. El retraso de ignición en el motor en modo dual con, GLP e hidrógeno más GLP muestra una variación de hasta un 33,3% con una mayor sustitución cuando se compara con la ecuación de HardenbergeHase para el motor diesel puro, mientras que el encendido del motor diesel dual está dentro del 6,56% hasta el 30% de sustitución de hidrógeno, mientras que el 14,6% al 50% de sustitución de hidrógeno cuando se compara con la ecuación de Prakash y otros para el motor dual con biogás

Wen & Yi, (2012) estudiaron las características de combustión para motores diésel con puerto de inyección de hidrógeno, Este estudio se trabajó con la matriz ortogonal L9 del método de Taguchi para obtener el mejor instante en realizar la inyección del hidrogeno por medio de una unidad de control electrónico (ECU) aplicada a un controlador de flujo para varias cargas. Entre los resultados más importantes encontraron que con las cargas del 45% y del 60% los resultados mostraron que con el hidrógeno inyectado se incrementó la eficiencia térmica del freno del motor y se disminuyeron las emisiones, especialmente el NO_x al inicio de la inyección a 5° ATDC, con un caudal de 7,5 lpm de hidrógeno, sin embargo el NO_x aumentó mientras que el caudal de hidrógeno aumentó a cargas más altas.

Cacua y colaboradores en el 2012 muestran en su trabajo el efecto de la adición de O_2 al aire ingresado a un motor dual alimentado con diesel y biogás (60% CH_4 y 40% CO_2): se hizo evidente la disminución del retraso en el tiempo de ignición y las emisiones de CH_4 , así como también el incremento en la eficiencia térmica, al enriquecer el aire con oxígeno. El enriquecimiento en pequeñas cantidades de O_2 mejora la estabilidad de combustión, y ayuda a la disminución de los efectos negativos del CO_2 en la combustión, de igual forma a mitigar la temperatura global de la mezcla gas-aire y las bajas velocidades de combustión que tiene el biogás con respecto al CH_4 .

Las metodologías experimentales utilizadas por varios investigadores para las diferencias entre el Diésel y el Biodiesel, en el funcionamiento del motor en modo dual y la introducción de hidrógeno se muestran en la tabla 2.2

Tabla 2.2. Resumen de las metodologías experimentales utilizadas en motores dual diesel.

Título del trabajo	Metodología	Autor y fecha
Análisis del período de retraso de encendido de un motor diesel de doble combustible con hidrógeno y GPI como combustibles secundarios	La experimentación se realizó en 4 cilindros turbo alimentados, el análisis termodinámico del proceso de compresión, los procesos en el motor de combustión interna se considera Proceso politrópico donde $PV^n = \text{constante}$,	Lata D. & Misra Ashok., 2011
Características de la combustión y determinación óptima de los factores con el método de taguchi para los motores diesel que inyectan en el puerto hidrógeno	Análisis experimental por matriz ortogonal L9 por método de taguchi, relación señal ruido menor el mejor, utilizo EGR, ángulo de giro del cigüeñal, análisis termodinámico	Wen Horng. & Yi Zhan, 2012
Efecto de la adición de hidrógeno al gas de admisión en las características de combustión y emisión de gases de escape de un motor diesel	Se utilizó un solo cilindro del motor, con un sistema EGR, el hidrógeno se inyecta, presión en el cilindro se midió por el captador Kistler 6052B y la tasa de liberación de calor 1°	Miyamoto <i>et al.</i> , 2011

	ley de la Termodinámica y las emisiones de gases analizador	
Efecto de la adición de H ₂ /O ₂ y el aumento de la eficiencia térmica de un motor diesel	Motor Hino 4 cilindros, diesel + HHO, Secado a HHO al entrar al ducto del aire, medidor de flujo gas RMC, ionización de llama (FID), analizador de gases infrarrojo (NDIR), método de quimioluminiscencia para detección del NO _x , la carga fue aplicada por un banco de resistencia.	Bari M. & Mohammad Esmaeil., 2008
Combustión de hidrógeno en un motor diesel de encendido por compresión	El hidrógeno se entregó por inyección ajustado al ángulo 0,5° deseado del cigüeñal, la presión del cilindro, el cigüeñal y la presión del colector se tomaron con el National Instruments USB6251	Szwaja et al., 2009
Una investigación experimental sobre el rendimiento y las emisiones de un motor dual hidrogeno diésel sobrealimentado	Se utilizó un motor de un solo cilindro, fuente primaria el hidrogeno. Presión constante en la inyección del combustible piloto, se utilizó N ₂ para la reducción del NO _x , se utilizó un 6052A, Kistler, Un transductor de presión piezoeléctrico.	Roy et al., 2010

En la tabla 2.3 se muestran diferentes estudios experimentales sobre el rendimiento y las emisiones de motores duales con HHO, Utilizando como parámetros relevantes el tipo de motor trabajado, la cantidad de cilindros, su rango de flujo de la capacidad del motor, el equipo de medición del HHO, las características de la forma de entrega del H₂ o el HHO al motor, sistemas de retrollama, cambios o modificaciones al ducto de admisión.

Tabla 2.3. Resumen de parámetros experimentales en motores duales diesel H₂ y diesel HHO. Fuente: elaboración propia.

Tipo de motor	# cilindros	Rango flujo	Equipo medición HHO	Características máquina entrega H ₂ ó HHO	Sistemas retrollama	Modificaciones admisión	Autor y fecha
Motor Diesel cuatro tiempos, con potencia de 62.5 kW a 1500 rpm. De encendido por compresión, turboalimentado, enfriado por agua e interenfriado, con un grupo electrógeno.	4 (cilindraje 3839.67 cc)	10-20-30-40-60-80% de la capacidad del motor	Medidor de flujo másico	Tanques para gas, con un mezclador previo al motor	Trampas para llamas, ubicadas antes de los medidores de flujo.	Inyección directa de combustible. Válvula de control a la salida del cilindro de H ₂ , regulador de presión, válvula solenoide y trampa para llamas, medidor de flujo de gas y mezclador.	Análisis del periodo de retardo de encendido de un motor dual de combustible diésel con hidrogeno y Glp secundario (Lata y Misra, 2011)
Motor Diesel cuatro tiempos, enfriado por agua. Potencia de 9.2 kW a 2400 rpm.	1 (cilindraje 624 cc)	30-45-60% de la capacidad del motor	Termocontrolador de flujo másico para H ₂ , con precisión de $\pm 1.5\%$	Tanque proveedor de H ₂ , controlador de flujo e inyector de H ₂ (presión de inyección: 250 kPa)	Parallamas a la salida del cilindro de H ₂ y previo al controlador de flujo. Trampa para llamas luego del controlador	Inyectores de H ₂ y combustible, más un sensor de presión	Característica de combustión y Determinación de factores óptimos para motores diésel con hidrogeno método Taguchi (Hornng-Wen y Zhan-Yi, 2012)
Motor Diésel cuatro tiempos, enfriado por	1 (cilindr	-	Controlador de flujo másico	Inyector de gas, conectado a	-	Inyección directa de combustible por riel	Efecto de la adición de hidrogeno al gas de

recirculación de gas de escape (controlados por una válvula EGR). Potencia de 9.2 kW a 1500 ±30 rpm.	aje 551 cc)			una unidad controladora		común. Tanque de compensación luego del controlador de flujo másico a la salida del tanque de H2	entrada sobre combustión y características de emisiones (Miyamoto et al, 2011)
Motor Diésel cuatro tiempos, en línea, enfriado por agua. Potencia de 38 kW a 1500 rpm	4 (cilindr aje 4.009 l)	10-20 l/min	Medidor de flujo modelo Dwyer (precisión de ±0.5 l/min)	Generador de H2/O2. Secador a la salida del mezclador de gases, medidor de flujo y colector	Dos parallas ubicados en la línea de H2/O2 para	Boquilla en la línea de H2/O2, para ingreso de aire antes de entrar gas al motor.	Efecto de la adición Oxi-hidrogeno (H2/O2) en el aumento de la eficiencia térmica de un motor diésel (Bari y Esmaeil, 2010)
Motor dual (adaptado a Diesel y gas), en línea, enfriado por aire.	2 (cilindr aje 1.65 l)	-	Medidor de flujo conectado a alta presión (5 bar)	Puerto de inyección de combustible, controlado por una ECU	-	-	Combustión de hidrogeno en un motor diésel de encendido por compresión (Szwaja y Grab-Rogalinski, 2009)
Motor Diésel.	1 (cilindr aje 1996cc)	-	Controladores de flujo másico	Reformador de gas al inicio de la línea (inyector y mezclador)	-	Inyección de combustible por riel común.	Influencia de hidrogeno gas enriquecido en el rendimiento de un catalizador enriquecido (Park et al, 2010)

Motor Diésel cuatro tiempos, en línea, con sistema EGR. Potencia de 107 kW a 4000 rpm	4	-	Controlador de flujo másico	Tanque para gas, previo al controlador de flujo másico	-	Inyección de combustible por riel común	Investigación de los Efectos del hidrogeno en la presión del cilindro en un motor diésel (Shin et al, 2011)
Motor dual cuatro tiempos, enfriado por agua	1	-	Controlador de flujo másico	Tanque para gas, y mezclador con aire salido de compresor	Inyección de N2	Inyección de combustible por riel común. Ingreso de N2 al cilindro, mezclado con el H2 y el aire	Una investigación experimental sobre el rendimiento y las emisiones de un motor dual hidrogeno diésel sobrealimentado (Roy et al, 2010)

2.2.2 Proceso de combustión de un motor dual

El motor dual es aquel en el cual se realiza un proceso de combustión al realizar una modificación al ducto de admisión de aire, a través del cual se introduce el nuevo combustible y queda aportando a la cámara de combustión la mezcla de aire más HHO, para la ignición por compresión, siendo el diesel el combustible primario logrando una combustión dual (Saravana y col, 2008).

También se ha investigado un proceso de combustión con motores de tipo diesel con una inyección múltiple de pequeñas cantidades de hidrógeno en un motor

Diesel tradicional. Estos motores funcionan con combustible dual Diesel e hidrógeno (Borretti 2011)

El ciclo dual está diseñado para aprovechar algunas ventajas del ciclo Otto y diesel, es la mejor aproximación a la operación real de la máquina de ignición por compresión. En los motores duales la combustión se describe mediante la medida de liberación de calor por tres componentes esenciales:

La primera componente, se realiza por la liberación de energía por la combustión del combustible piloto.

La segunda componente, se realiza por la combustión del combustible primario que está en la cercanía del centro de ignición del combustible piloto.

La tercera componente, se realiza por cualquier reacción de pre - ignición dentro del saldo de mezcla generalmente pobre que incrementa la propagación turbulenta de la llama. (Bedoya 2007).

Capítulo 3

Metodología

3.1 Diseño del Prototipo

Se traza en este capítulo el montaje experimental realizado para la formalización de los objetivos planteados. Para el generador de Oxihidrógeno (HHO), se utilizaron tres recipientes de PVC de un litro cada uno, conectados en paralelo, cada recipiente constaba de siete tubos de 10 cm de dos tubos concéntricos de acero quirúrgico, separados por 2 anillos de plástico en los extremos de cada tubo, los cuales equidistan medio milímetro, los tubos se colocaron verticalmente sumergidos en una solución de ácido fosfórico al 90% (electrolito) y agua pura. La disposición de los tubos y la concentración del ácido permiten mayor conducción de la electricidad (más amperaje) y mayor consumo de energía para producir HHO. Se energiza por medio del borne positivo de 12 V y el borne negativo de la batería del motor de la planta de eléctrica de Diesel para realizar el proceso de la electrolisis del agua y así producir el Oxihidrógeno en estado gaseoso. Por medio del método del desplazamiento de volumen se tomó el dato del caudal constante del HHO. Se instaló un sistema de seguridad de retrallamas en la manguera por la cual se desplazaba el HHO para ser conectado al ducto de admisión de aire del motor. Para realizar la máxima adición de sustitución de HHO al biodiesel se procedió con la preparación de la solución de ácido fosfórico (electrolito) y el agua, por medio de diferentes cantidades de gotas del electrolito se experimentó por ensayo y error cuatro veces; 850 ml/min, 600 ml/min, 400 ml/min y 250 ml/min (25, 20, 19, y 18 gotas de ácido fosfórico en el sistema del electrolisis de agua respectivamente). Se le adicionaba al biodiesel el HHO y se observaba la operación y rendimiento del motor. Se encontró que con la solución de 250 ml/min de HHO el motor funcionó sin problemas con la carga de 6 kW, y se procedió a la toma de los datos, luego al

aumentar la carga a 12 kW su operación y rendimiento fueron de inestabilidad y pérdida de potencia hasta dejar de operar.

Tabla 3.1 Caracterización de los niveles de producción de HHO y del consumo de energía eléctrica de la celda electrolítica. Fuente Elaboración propia

Mezcla	Ácido fosfórico (# de gotas)	Caudal de HHO (ml/min)	Corriente (Amp)	Voltaje (vol)	Potencia (W)
1	25	850	53,6	13,7	734,3
2	20	600	40,6	13,7	556,2
3	19	400	23,4	13,7	320,6
4	18	250	15	13,7	205,5



Figura 2. Dispositivo Generador de Oxihidrógeno. Fuente: elaboración propia.

Se trabajó con un motor de encendido por compresión (MEC) y se acopló a un generador por medio del cual se pudo medir el comportamiento del motor en diferentes cargas de trabajo. Se ilustran las características del motor y el generador en la tabla 3.1

Tabla 3.2 Características del motor y el generador. Fuente: elaboración propia

EQUIPO	CARACTERISTICA	ESPECIFICACION
Motor de combustión	Tipo	YANMAR 3TNE84, DI, cuatro tiempos, Tres cilindros, aspirado naturalmente, Enfriado por agua, motor encendido por compresión.
	Desplazamiento	$1.496 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
	Carrera/Diámetro	0.084 x 0.090 m
	Potencia nominal	14.8 kW
Generador	Tipo	MECC ALTE - ECO28 3L/2
	Potencia de reserva	31 kVA (24,8 kW)
	Eficiencia	88% a plena carga
	RPM	1800

La potencia máxima para la cual se puede cargar el motor es de 12 kW. Con el fin de variar la carga del generador, se utilizó un banco de resistencias eléctricas con taps de 6 kW. El motor operó a 50% y 100% de la carga.

El banco de resistencia se encuentra conectado en serie con el generador mediante un tablero de control instalado en la parte posterior de la planta de generación, en el cual se toman los datos de voltaje, la temperatura del refrigerante, las RPM y los valores de potencia solicitados por medio del banco de resistencia. Por medio de un termohigrómetro EXTECH INSTRUMENTS HD500: con termómetro de infrarrojos. Termopar tipo K y termómetro de infrarrojos 30:1, se obtuvieron los datos de la temperatura de los gases de escape.

Para medir los amperios se utilizó un medidor de abrazadera digital (pinza multiamperimétrica automotriz) 1000^a AC/DC Amp + frecuencia modelo DCM-2605, la cual se colocó en el cable de corriente positiva del electrolizador de agua que

generaba el Oxihidrógeno (HHO), este proceso fue suministrado por medio de un equipo el cual consiste en 2 tubos concéntricos de acero quirúrgico separados por 2 anillos de plástico en los extremos los cuales separan los 2 tubos medio milímetro, los tubos se colocaron en paralelo sumergidos en una solución de ácido fosfórico y agua pura. La disposición de los tubos y la concentración del ácido permiten mayor conducción de la electricidad (más amperios) y mayor consumo de energía para producir HHO. Se lograron buenos resultados con series de 3 tarros cada uno con 7 tubos de 10 cm en paralelo a 12v obtenidos del positivo y negativo de la batería. Por medio del método del desplazamiento de volumen se tomó el dato del caudal constante del HHO. Se instaló un sistema de seguridad de retrollamas en la manguera de adición de HHO al ducto de admisión de aire del motor.

Para medir el flujo de combustible líquido, se utilizó medidor bajo el principio de Coriolis, SITRANS FC MASS 2100 DI 1.5

La cantidad de aire inducida por el motor fue medida por un Anemómetro con tubo de pitot Modelo HD350. Para la toma de datos de las emisiones de gases contaminantes CO, CO₂, NOX y O₂ se utilizó un analizador de gases SICK GMS810. Para evaluar la operación y rendimiento del motor se utilizó un diseño experimental factorial 3². Los factores son tres combustibles; El diesel, el Biodiesel y el Biodiesel + Oxihidrógeno (HHO), y son dos niveles los cuales son; La carga y las variables respuestas indispensables para la especificación de los diferentes parámetros de funcionamiento del motor.

Las particularidades técnicas más relevantes de los equipos empleados, la incertidumbre de los equipos de medición y los cálculos de eficiencia térmica se han recopilado en un anexo al final de este informe.

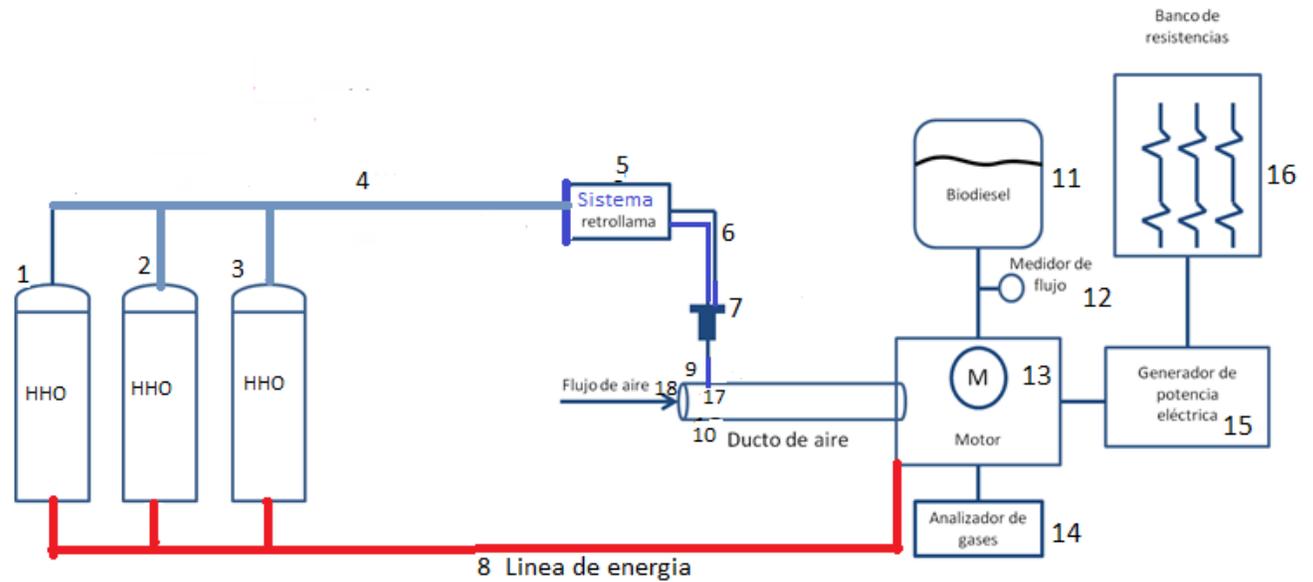


Figura 3. Diagrama de experimentación de motor dual biodiesel y HHO, con generador de potencia eléctrica. Fuente: elaboración propia

Descripción de los elementos mostrados en el diagrama de experimental:

Tabla 3.3. Elementos del diagrama de experimentación. Fuente: elaboración propia

#	Concepto
1	Cilindro HHO
2	Cilindro HHO
3	Cilindro HHO
4	Manguera se suministró del HHO
5	Sistema de Retrollama
6	Manguera de retrollama
7	Adaptador para la entrada del HHO al ducto de aire del motor
8	Línea de energía para generar HHO por electrolisis de agua con catalizador de ácido fosfórico
9	Medidor de consumo de aire
10	Toma de la temperatura del aire
11	Tanque de Biodiesel Aceite de Palma

12	Medidor de flujo Biodiesel
13	Motor de encendido por compresión
14	Analizador de gases
15	Generador de Potencia Eléctrica
16	Banco de Resistencia
17	Unión de T simple
18	Filtro de aire

3.1.1 Análisis energético

3.1.1.1 Pérdida de potencia por altura sobre el nivel del mar:

Los motores de combustión interna presentan una pérdida de potencia con la altura sobre el nivel del mar, debido a que la disminución en la presión atmosférica causa una disminución en la densidad del aire y por ende una reducción en el flujo másico de aire que es admitido por el motor. Para la estimación de la pérdida de potencia por altura sobre el nivel del mar, el fabricante del motor recomienda la utilización de la correlación contenida en la norma JIS D 1005 – 1986, dicha recomendación se encuentra en el manual de servicio del motor YANMAR DIESEL ENGINE CO.LTD, APPLICATION MANUAL INDUSTRIAL DIESEL ENGINE MODEL TNE Series, Julio 1971.

La expresión para el cálculo de la potencia corregida es la siguiente:

$$\frac{N_e}{N_{e,0}} = \left[\frac{(p - p_v)}{(p_0 - p_{v,0})} \right] \left(\frac{T_0}{T} \right)^{0.75} \quad (1)$$

Dónde:

N_e = Potencia efectiva en sitio a un régimen de giro determinado

$N_{e,0}$ = Potencia efectiva entregada por el motor a nivel del mar

p = Presión atmosférica en sitio

p_v = Presión de vapor en sitio

p_0 = Presión atmosférica de referencia, 1 bar

$p_{v,0}$ = Presión de vapor de referencia, 0.01 bar

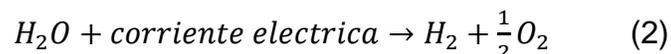
T_0 = Temperatura absoluta del ambiente de referencia, 293 K

T = Temperatura absoluta del ambiente en sitio en K

Según el manual técnico del motor, la máxima salida de potencia entregada por el motor a 1800 RPM a nivel del mar es de 14.8 kW (*Max. Rating*). Aplicando la corrección de potencia para unas condiciones ambientales típicas en Medellín se obtiene una máxima potencia entregada por el motor de 12.1 kW, lo que representa una pérdida de potencia de 18% aproximadamente. Al motor se le generó una carga mediante un banco de resistencias de 6 y 12 kW, es decir al 50% y 100% de la carga total.

3.1.1.2 Balance de energía en el sistema de producción de HHO

El gas de oxihidrógeno fue producido en una celda electrolítica, a partir de la separación de la molécula del agua (H_2O) por electrólisis, según la siguiente reacción:



Después del proceso de electrólisis el HHO fue introducido en el motor en fase gaseosa a razón de 250 ml/min. La corriente eléctrica requerida por la celda electrolítica para la producción de HHO fue suministrada por el alternador del motor, lo que produjo una carga eléctrica adicional al mismo. Para la producción de los 250ml/min de HHO la celda tuvo un consumo de 15 A con 13.7 V, lo que representa un consumo de energía de 205.5 VA (205.5 W con un factor de potencia de 1). El aporte de energía debido a la adición de HHO fue determinado a partir del poder calorífico del hidrogeno (120 MJ/kg) y el flujo másico del hidrogeno presente en el HHO, lo que representó un aporte energético de 23 W al proceso

de combustión. Por lo tanto, el balance de energía aplicado al sistema de adición de HHO utilizado en el estudio entrega un resultado de 182.5 W. Por consiguiente, no hay un aporte energético con la adición de HHO, sino que por el contrario este genera un consumo adicional de energía de 182.5 W. Sin embargo, tanto el hidrógeno (H_2) como el oxígeno (O_2) son especies muy influyentes en el proceso de combustión, ya que la alta velocidad de quemado laminar y la mayor reactividad del hidrógeno favorece tanto la velocidad de quemado como la autoignición de la mezcla, ayudando a una combustión más completa. De la misma manera, la presencia de oxígeno en el HHO adicionado al motor afecta la cinética química de la mezcla propiciando una mejor oxidación del combustible.

3.1.1.3 Determinación de la energía aportada por los combustibles primarios

Para la determinación de la energía ingresada al motor por parte del biodiesel de palma y el diesel convencional, se realizó la medición del flujo másico de cada uno de estos combustibles y adicionalmente se hizo una revisión bibliográfica con el fin de obtener los poderes caloríficos característicos de estos combustibles. El poder calorífico utilizado para el biodiesel de aceite de palma fue de 39400 kJ/kg (Hoekman et al., 2011) y el poder calorífico del diesel convencional fue de 43000 kJ/kg (Agudelo y col, 2006)

Tabla N° 3.4 Propiedades de los combustibles Utilizados. Fuente Bedoya 2007

Propiedad	Diesel	Biodiesel de Palma de aceite	Hidrógeno
Densidad (kg/m^3)	847	875	0,0838
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	43	39,55	120
Temperatura de auto ignición (K)	530	451,82	858
Numero de Cetano (CN)	44	57	-----
Índice de Woobe Inferior (kWh/Nm^3)	-----	-----	10,73

3.1.2 Procesamiento de los datos de emisiones del motor

Las emisiones contaminantes entregadas por los motores de combustión interna son comúnmente medidas en partes por millón (ppm) o en porcentaje en volumen en base seca (% vol.), por la mayoría de los analizadores de gases utilizados. Sin embargo, las emisiones contaminantes en motores son comúnmente expresadas en términos de emisiones específicas en g/kWh, o en términos del índice de emisiones en unidades de g/kg_{combustible} (Heywood, 1988), ambos en base húmeda.

Para la evaluación del desempeño ambiental del motor, los datos de emisiones en base seca recolectados en la fase de experimentación fueron expresados en términos del índice de emisiones de cada especie, mediante el procedimiento que se explica a continuación:

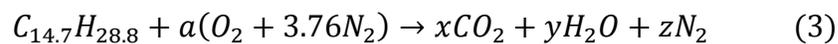
Para calcular las emisiones en base húmeda fue necesario plantear las reacciones químicas considerando el O₂, NO_x, y el CO como especies adicionales a las conocidas en la reacción estequiométrica. Por otro lado, fue necesario determinar las composiciones químicas para los tres combustibles analizados. Para el caso del diesel (comercializado en Colombia) la composición química utilizada fue la reportada por Agudelo y colaboradores (2006). La composición química del biodiesel de aceite de palma fue calculada a partir de la participación en composición de los diferentes ácidos grasos que lo componen, según datos reportados por Hoekman y colaboradores (2011). Finalmente, la composición aproximada del Biodiesel + HHO fue calculada a partir de la determinación del número de moles, haciendo una relación de proporcionalidad de acuerdo a los flujos medidos para cada componente en cada punto de operación del motor. Las composiciones de los combustibles obtenidas y utilizadas se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Fórmulas químicas de los combustibles utilizados. Fuente: elaboración propia

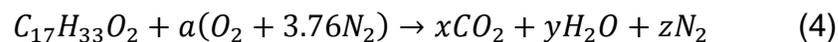
COMBUSTIBLE			
FÓRMULA QUÍMICA	Diesel	Biodiesel	Biodiesel + HHO
		$C_{14.7}H_{28.8}$	$C_{17}H_{33}O_2$

Las reacciones químicas que gobiernan el proceso de combustión, utilizadas para la determinación de los índices de emisiones y la relación aire combustible estequiométrica, para las diferentes mezclas de aire – combustible estudiadas fueron las siguientes:

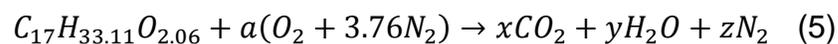
Diesel



Biodiesel



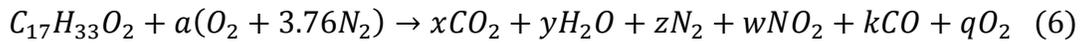
Biodiesel + HHO



La única diferencia en las reacciones estequiométricas para el biodiesel + HHO es la fórmula química del combustible para los demás grados de carga. La relación aire – combustible estequiométrica para cada combustible es calculada a partir del balanceo de las anteriores reacciones.

3.1.2.1 Reacciones químicas incluyendo las especies medidas

Para la estimación del índice de emisiones fue necesario plantear las ecuaciones para las reacciones incluyendo las especies de interés medidas (CO_2 , O_2 , NO_x y CO) en la fase experimental en cada punto de operación. A continuación se presenta la ecuación 6 para la reacción de la combustión del biodiesel con aire. Las reacciones para el diesel y el biodiesel +HHO fueron planteadas de manera similar para la determinación del índice de emisiones en cada punto de operación



Para establecer los valores de las incógnitas (a, x, y, z, w, k, q) es necesario conformar un sistema de siete (7) ecuaciones con siete incógnitas. A partir del balanceo del carbono (C), el hidrógeno (H), el oxígeno (O) y el nitrógeno (N) se pueden obtener las primeras cuatro (4) ecuaciones. Las tres ecuaciones restantes se plantean relacionando los valores de emisiones de tres de las especies medidas experimentalmente, las de mayor confiabilidad en la medida, con la definición de porcentaje en volumen (% Vol.) en base seca; por ejemplo para el CO_2 se tiene:

$$\text{Emisiones de } CO_2[\%Vol] = \frac{x}{x + z + w + k + q} * 100 \quad (7)$$

Con la solución al sistema de ecuaciones se obtienen el número de moles por mol de combustible quemado en base húmeda para cada una de las especies medidas, las cuales pueden ser llevadas a términos máscicos si se conoce el flujo máscico de combustible en cada punto de operación. Para el cálculo del índice de emisiones, la relación aire combustible estequiométrica y el dosado (es la relación masa de combustible/masa de aire) en cada punto de operación, se desarrolló un código de

programación en MATLAB, el cual se presenta como anexo a este trabajo. Los resultados obtenidos son analizados más adelante.

3.1.3 Variables respuesta de la operación del motor

A partir de los datos experimentales recolectados se determinaron la eficiencia efectiva (η_e), el consumo efectivo específico de combustible (BSFC), el dosado (φ), el rendimiento volumétrico (η_v) y el nivel de sustitución de biodiesel (Z), con el objeto de hacer una evaluación del desempeño mecánico del motor.

3.1.3.1 Eficiencia efectiva

La eficiencia efectiva calculada por el motor para los diferentes puntos de operación estudiados, fue determinada a partir de la siguiente expresión.

$$\eta_e = \frac{P_{elect}}{\dot{m}_{comb} * PCI_{comb}} * 100 \quad (8)$$

Dónde:

η_e = Eficiencia efectiva [%]

P_{elect} = Potencia eléctrica [kW]

\dot{m}_{comb} = Flujo másico de combustible [kg/s]

PCI_{comb} = Poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg]

3.1.3.2 Consumo específico de combustible

Para encontrar los valores del consumo efectivo específico de combustible se utilizó la siguiente ecuación.

$$BSFC = \frac{\dot{m}_{comb}}{P_{elect}} * 3600 \quad (9)$$

Dónde:

$BSFC$ = Consumo efectivo específico de combustible [g_{comb}/kWh]

\dot{m}_{comb} = Flujo másico de combustible [g/s]

P_{elect} = Potencia eléctrica [kW]

3.1.3.3 Dosado

El dosado es el parámetro que caracteriza la mezcla aire-combustible, ósea es la relación combustible aire combustible – aire real (medida) dividida por la relación combustible – aire estequiométrica. Para efectos del cálculo del dosado en este trabajo se utilizó la siguiente relación.

$$\phi = \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{aire}} / \frac{M_{comb}}{(N_{aire})_{st} * M_{aire}} \quad (10)$$

Dónde:

ϕ = Dosado

\dot{m}_{comb} = Flujo másico de combustible [g/s]

\dot{m}_{aire} = Flujo másico de aire [g/s]

M_{comb} = Masa molecular del combustible [g/mol de combustible]

M_{aire} = Masa molecular del aire [g/mol de aire]

$(N_{aire})_{st}$ = Número de moles de aire estequiométricas [moles aire/mol combustible]

En los motores de encendido por compresión el grado de carga es controlado mediante la variación del dosado relativo. (Bedoya 2007)

El dosado relativo en un MEC.

La relación entre el dosado (F/A) y el dosado estequiométrico (F_{est}) se conoce como dosado relativo (F_r). Esta relación se expresa a continuación:

$$F_r = \frac{F/A}{F_{est}} \begin{cases} Fr > 1 & \text{(exceso de combustible)} \\ Fr = 1 & \text{(Estequiométrico)} \\ Fr < 1 & \text{Pobre (defecto de combustible)} \end{cases} \quad \text{(Hernández 2006)}$$

3.1.3.4 Rendimiento volumétrico

El rendimiento volumétrico se define como el flujo volumétrico de aire admitido (medido) por el motor en el sitio de operación a un determinado régimen de giro y el flujo volumétrico máximo de aire que idealmente puede ser admitido por el motor al mismo régimen de giro. La relación para el cálculo del rendimiento volumétrico utilizada en el presente estudio fue.

$$\eta_v = \frac{2 * \dot{m}_{aire}}{\rho_{ref} * V_d * n} \quad (11)$$

Dónde:

η_v = rendimiento volumétrico

\dot{m}_{aire} = Flujo másico de aire [kg/min]

ρ_{ref} = densidad del aire en el sitio, a presión y temperatura de admisión [kg/m³]

V_d = Cilindrada del motor [m³]

n = régimen de giro del motor [rpm]

3.1.3.5 Nivel de sustitución del biodiesel en operación en modo dual

Uno de los parámetros de operación más importantes en motores duales es el nivel de sustitución. Este es el porcentaje (en términos másicos) de combustible original que es sustituido por el combustible alternativo, cuando el motor opera en modo

dual en un punto de operación determinado, comparado con el modo de encendido por compresión convencional (Bedoya, 2007). La expresión para la determinación del nivel de sustitución es la siguiente.

$$Z = \frac{\dot{m}_B - \dot{m}_{BD}}{\dot{m}_B} * 100 \quad (12)$$

Dónde:

Z= Nivel de sustitución [%]

\dot{m}_B = Flujo másico de biodiesel en modo convencional [g/s]

\dot{m}_{BD} = Flujo másico de biodiesel en modo dual (biodiesel + HHO) [g/s]

Capítulo 4

Análisis de Resultados

El análisis de resultados se desarrolla en dos partes fundamentales, en determinar los máximos porcentajes de oxihidrógeno a utilizar, teniendo como criterio la estabilidad en el funcionamiento del motor y en evaluar experimentalmente la operación y rendimiento del motor con adición de oxihidrógeno, para varios niveles de carga. Los resultados son examinados haciendo un análisis comparativo entre los valores obtenidos para las variables respuesta a partir de la experimentación en el motor utilizando como combustible biodiesel, biodiesel + HHO y diesel como línea base de comparación.

La energía aportada por los combustibles es necesaria para el cálculo de la eficiencia efectiva. La tabla 4.1 muestra los resultados de las estimaciones de los flujos máxicos de los combustibles utilizados y sus respectivos aportes energéticos.

Tabla 4.1. *Flujos máxicos y aporte energético de combustibles. Fuente: elaboración propia*

Estimación de flujos máxicos y energía aportada por los combustibles							
Combustible	Carga (kW)	flujo máxico H2 (mg/s)	flujo máxico O2 (mg/s)	flujo máxico HHO (mg/s)	energía aportada por HHO (kW)	energía aportada por Biodiesel (kW)	Aporte energético HHO (%)
Diesel	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0
Biodiesel	0	0	0	0	0	26,815	0
	6	0	0	0	0	41,913	0
	12	0	0	0	0	54,320	0
Biodiesel + HHO	0	0,19223	1,52881	1,72104	0,0230	26,8210	0,0860
	6	0,19223	1,52881	1,72104	0,0230	41,8610	0,0550
	12	0,19223	1,52881	1,72104	0,0230	54,9270	0,0420

Los datos experimentales promedio, recolectados para las diferentes variables medidas en el motor operando en modo dual con biodiesel + oxihidrógeno, y en su modo original de encendido por compresión utilizando biodiesel y diesel, se presentan en la tabla 4.2. Adicionalmente a los datos presentados, es importante señalar que cuando el motor fue operado en modo dual, la adición de oxihidrógeno (HHO) fue de 250 ml/min (constante) para los niveles de carga evaluados, con la carga de 6 kW se logró una sustitución del 0,13%.

Tabla 4.2. Datos experimentales promedio. Fuente: elaboración propia

Combustible	Carga (kW)	Emisiones				Flujo másico de combustible líquido (g/min)	Flujo de aire (CFM)	T° del refrigerante (°C)	T° de los Gases (°C)	T° del aire (°C)
		CO (PPM)	CO ₂ (%Vol)	NOx (PPM)	O ₂ (%Vol)					
Diesel	0	1195,7	3,5	129,6	16,5	38,29	49,09	65,5	248,6	33,9
	6	787,5	5,1	295,4	14,4	53,96	45,37	71,3	323,6	35,6
	12	308,8	7,6	606,1	11,5	73,96	43,43	77,8	426,9	37,4
Biodiesel	0	416,7	2,9	232,1	17,3	40,85	47,89	68,0	286,3	33,7
	6	353,1	4,3	325,2	15,6	63,85	43,97	72,0	384,4	36,0
	12	780,0	6,5	534,5	12,7	82,75	42,16	77,0	439,7	37,4
Biodiesel + HHO	0	409,8	2,9	224,9	17,4	40,86	47,81	68,0	286,8	33,6
	6	345,4	4,3	326,2	15,5	63,77	43,78	72,0	384,2	36,4
	12	777,9	6,5	499,2	12,7	83,68	42,11	77,0	440,1	37,4

4.1 Desempeño mecánico del motor

4.1.1 Dosado, temperaturas de operación y rendimiento volumétrico

La Figura 4 muestra el dosado calculado a partir de la medición de los flujos másicos de aire y combustible y la determinación de la relación de combustible - aire estequiométrica para cada uno de los combustibles en los diferentes grados de carga estudiados a un régimen de giro de 1800 RPM.

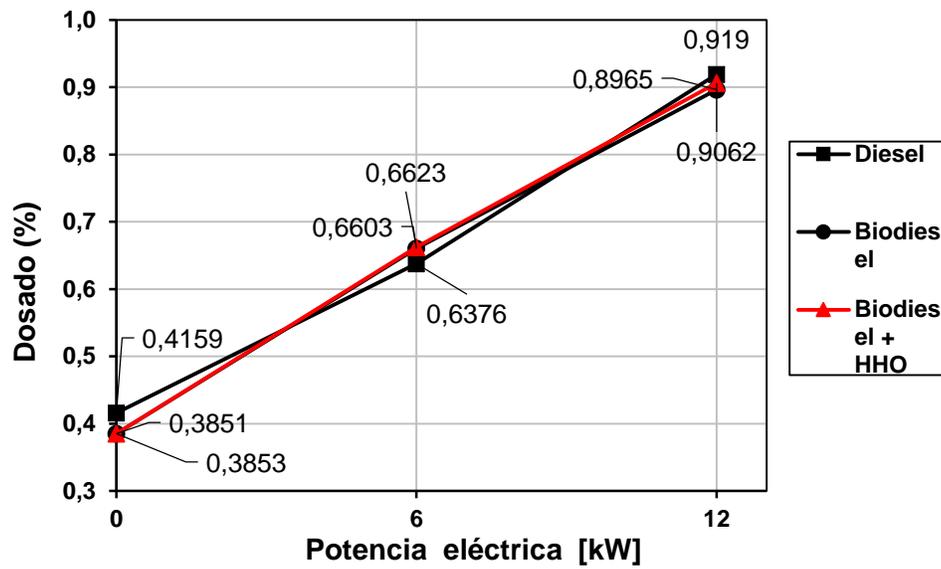


Figura 4. Dosado por flujos en función de la salida de potencia. Fuente: elaboración propia

Como es conocido el dosado tiene un crecimiento lineal con el aumento del grado de carga en el motor (Heywood, 1988). Esta tendencia se evidencia para los tres combustibles utilizados en este estudio y además los valores encontrados tienen mucha similitud, a pesar de que los flujos máxicos de combustible son mayores y los flujos de aire son menores en todos los puntos de operación, para el biodiesel y el biodiesel + HHO. Esto es debido a que la presencia de oxígeno en la composición del biodiesel y el HHO disminuyen el valor de la relación aire combustible estequiométrica para estos combustibles, compensando de esta manera el flujo adicional de combustible requerido para obtener una determinada salida de potencia. Sin embargo, es importante resaltar que el dosado empleado por el motor para alcanzar una salida de potencia de 12 kW (*maximum rating*) fue alrededor de 0.9 para todos los combustibles, el cual es un valor muy alto en comparación con los valores típicos para el dosado en los motores de encendido por compresión en operación normal (0.3 a 0.7) (Heywood, 1988). Estos altos valores de dosado incrementan la formación de material particulado y elevan la temperatura de combustión.

La Figura 5 presenta el rendimiento volumétrico en función de la salida de potencia para los tres combustibles utilizados en la operación del motor a un régimen de giro constante de 1800 RPM. Se evidencia una tendencia decreciente del rendimiento volumétrico a medida que el grado de carga en el motor aumenta. Adicionalmente, la operación con diesel presentó un mayor rendimiento volumétrico, en comparación al biodiesel y biodiesel + HHO, para todas las salidas de potencia estudiadas; porque, cuando se hace el cambio de combustible de diesel a biodiesel se obtuvo un aumento en la temperatura de gases de escape, debido a una combustión más lenta como resultado de cambios en la atomización y las tasas de mezclado del biodiesel con el aire dentro de la cámara de combustión. Este aumento de la temperatura de los gases de escape con lleva a un aumento en la temperatura de operación del motor, lo que repercute en una pérdida de eficiencia volumétrica (Heywood, 1987). Por otro lado, cuando el motor funcionó utilizando el biodiesel + HHO (modo dual) como combustible, el rendimiento volumétrico mostró los menores valores para todos los puntos de operación. Esto es debido a que el HHO desplaza aire ya que entra por el ducto de admisión del motor

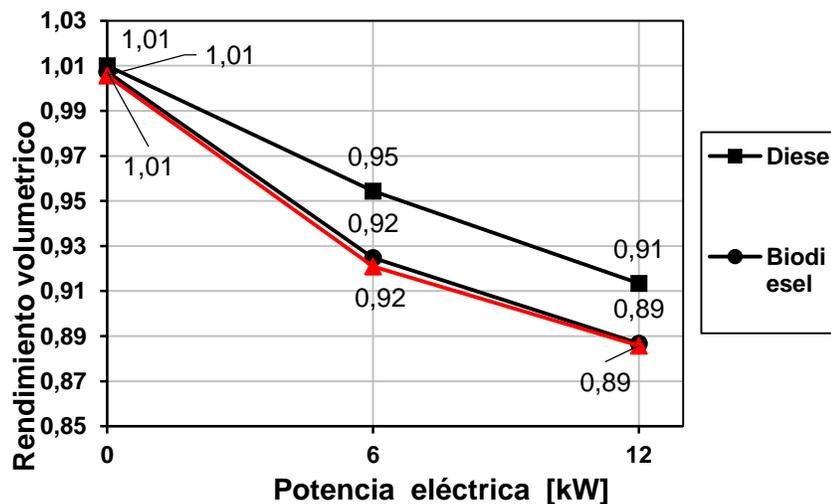


Figura 5. Rendimiento volumétrico en función de la salida de potencia. Fuente: elaboración propia.

La caída en el rendimiento volumétrico con la utilización del biodiesel y biodiesel + HHO obedece principalmente a dos eventos. Primero, la adición de HHO se realizó directamente al flujo de aire en el colector de admisión desplazando de esta manera parte del flujo volumétrico de aire admitido por el motor. Segundo, el proceso de combustión del biodiesel tiene una mayor duración (Agudelo y col, 2006), por lo que hay un mayor tiempo para la transferencia de calor a los alrededores, lo que hace que las paredes de los componentes estructurales del motor incrementen su temperatura, produciendo una pérdida en la densidad del aire admitido y disminuyendo el flujo másico del mismo hacia el motor.

En la Figura 6 se presentan los valores obtenidos para la temperatura del refrigerante como una función del grado de carga y del combustible utilizado. Se observa que la curva obtenida para el biodiesel + HHO se sobrepone totalmente a la del biodiesel, lo que evidencia que una adición de 250 ml/min de HHO no tiene efecto sobre este parámetro de operación. Sin embargo, la temperatura del refrigerante es mayor cuando el motor funciona con biodiesel y biodiesel + HHO en comparación al diesel, principalmente en operación sin carga y a cargas parciales. Para operación a carga total la temperatura del refrigerante fue levemente mayor para el diesel que para los otros dos combustibles estudiados, lo que puede obedecer a mayores temperaturas de combustión dado el mayor poder calorífico del diesel y mayores niveles de presión dentro de la cámara de combustión cuando el motor opera con diesel a altas cargas. El HHO no tuvo ninguna incidencia en la temperatura del refrigerante (transferencia de calor). Esto se evidenció al no haber cambios significativos en los valores de temperatura de refrigerante obtenidos, cuando el motor operó en modo dual, en comparación con los valores obtenidos en operación con biodiesel.

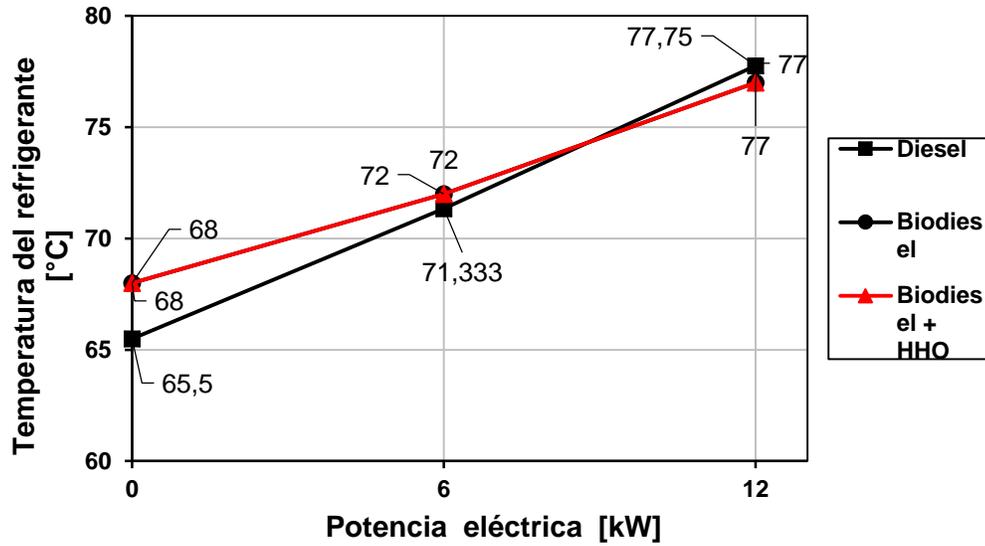


Figura 6. Temperatura del refrigerante para los diferentes puntos de operación.
Fuente: elaboración propia

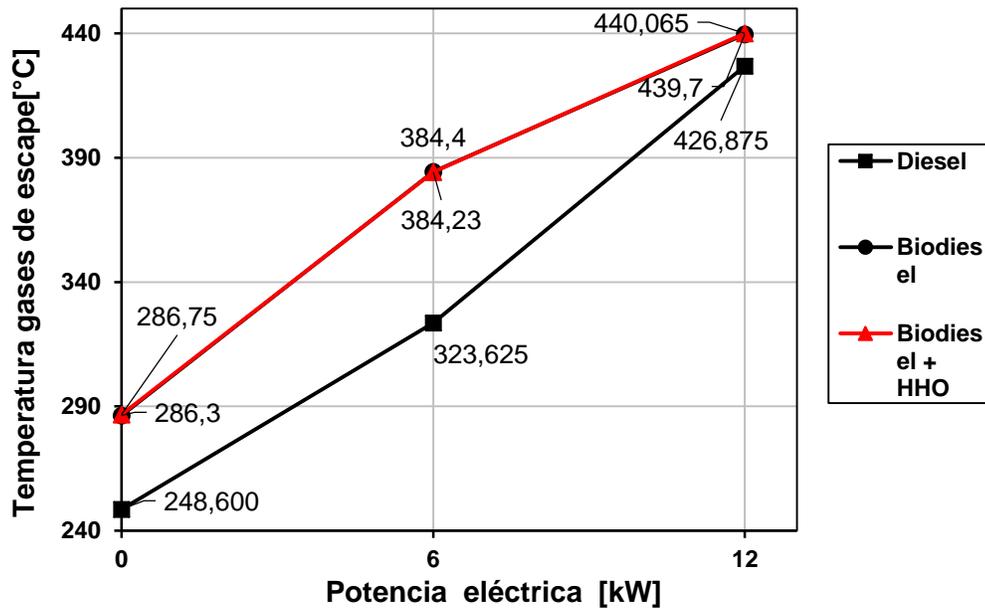


Figura 7. Temperatura de los gases de escape versus la potencia generada.
Fuente: elaboración propia

En la Figura 7 se observa la temperatura de los gases promedio para los distintos niveles de potencia evaluados en el motor usando los diferentes combustibles. De nuevo la curva para la temperatura de los gases de escape hallada con el biodiesel + HHO se sobrepone a la del biodiesel dado que la cantidad de HHO adicionada no es suficiente para causar cambios significativos en esta variable de operación. Además, revela una mayor temperatura de los gases de escape cuando el motor opera empleando biodiesel y biodiesel + HHO como combustible. El aumento en la temperatura de los gases de escape es una consecuencia al hecho que la duración de la combustión del biodiesel sea mayor, como resultado de la mayor viscosidad y dificultad para la volatilización de este combustible (Hoekman y col, 2011). Un mayor tiempo de volatilización y mezclado de un combustible requiere incrementar el tiempo de retraso a la inyección del motor para lograr valores máximos de IMEP en cada punto de operación. En este estudio el tiempo de retraso a la inyección no se varió con el cambio de combustible en cada punto de operación, por lo cual la sincronización del proceso de la combustión para el biodiesel tuvo un pequeño retraso, dando lugar a mayores temperaturas de escape.

4.1.2 Consumo específico de combustible

La Figura 8 exhibe los niveles de consumo efectivo específico de combustible conseguidos para los tres combustibles estudiados con una salida de potencia eléctrica entre 6 y 12 kW. Los consumos específicos de combustible para la operación sin carga (0 kW) del motor no se muestran debido a que el cálculo de estos no puede realizarse según la definición de consumo específico de combustible. La figura 8 evidencia una tendencia general decreciente del consumo específico de combustible con el aumento del grado de carga. Adicionalmente, se observa como el consumo específico de combustible es considerablemente mayor para el biodiesel y el biodiesel + HHO cuando se comparan con el diesel para las dos potencias presentadas. El aumento en el consumo específico de combustible para el biodiesel puede deberse a que tiene un menor poder calorífico inferior, lo que obliga a aumentar el flujo de biodiesel en función de compensar la energía suministrada al motor y así alcanzar un determinado valor de potencia. Por otro

lado, debido al incremento de las pérdidas por transferencia de calor a las paredes y el desfase de la combustión, es necesario aumentar el flujo de biodiesel para no obtener pérdidas de potencia. Cuando el motor fue operado en modo dual (biodiesel + HHO) presentó el mayor consumo específico de combustible, especialmente en 12 kW, debido a que la producción por electrólisis del HHO genera un consumo energético adicional al motor, dado que la corriente eléctrica que es suministrada a la celda electrolítica es obtenida del alternador del motor.

Otra forma de generar el HHO es utilizando una fuente externa de energía. Esta fuente de energía debe ser renovable con el fin de que la eficiencia global del sistema no se vea afectada por los costos energéticos. Entre las alternativas posibles están el uso de paneles solares y sistemas de recuperación termoeléctricos (Smolinka y col. 2015).

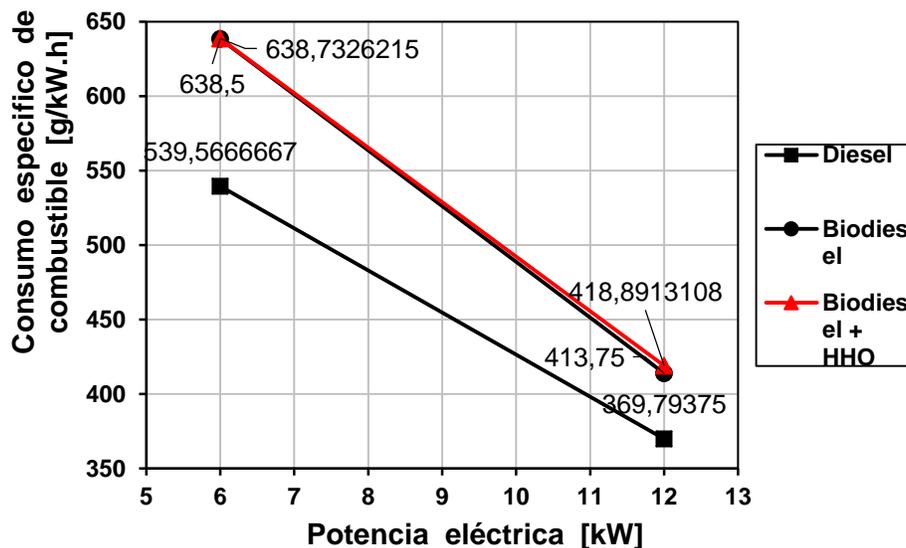


Figura 8. Consumo efectivo específico de combustible versus potencia generada.
Fuente: elaboración propia.

4.1.3 Eficiencia efectiva

La eficiencia efectiva es la variable de funcionamiento más importante en el desempeño del motor porque esta informa sobre el aprovechamiento útil de la

energía contenida en el combustible. A pesar que el motor no tuvo pérdidas de potencia mientras opero con los combustibles de interés en este estudio, la eficiencia efectiva si evidenció diferencias para los diferentes combustibles. La Figura 9 presenta los valores encontrados par la eficiencia efectiva entregada por el motor mientras operó con los tres combustibles. Los valores de eficiencia efectiva del motor en los puntos de operación sin carga son cero (0%) debido a que no hay potencia útil generada. Por lo tanto, sus valores de eficiencia efectiva no se muestran en la figura 9.

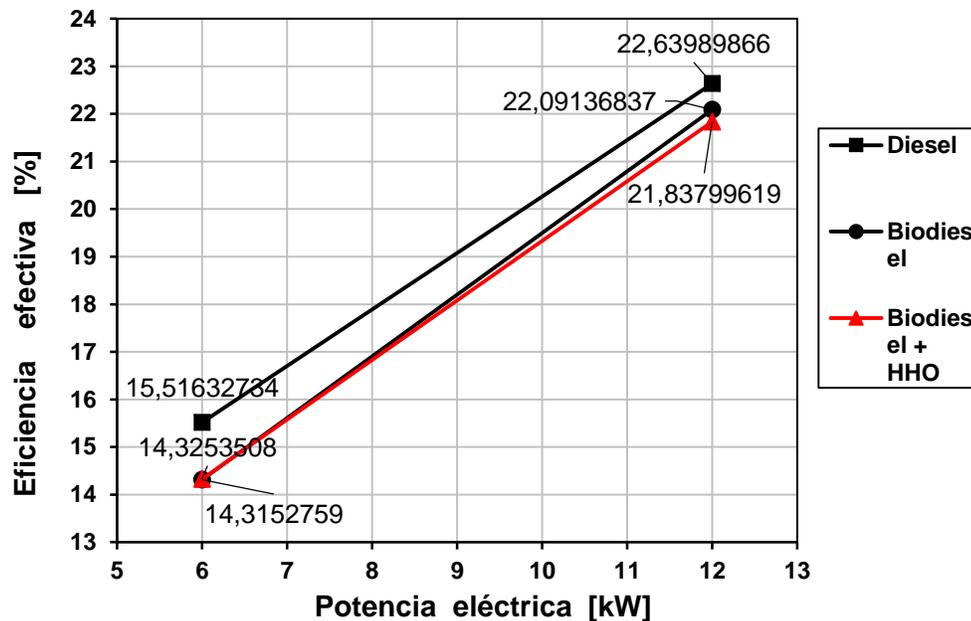


Figura 9. Eficiencia efectiva como función del grado de carga y el tipo de combustible. Fuente: elaboración propia

La figura 9 de eficiencia revela una tendencia general creciente con el aumento de la potencia eléctrica entregada por el motor. Sin embargo, la operación del motor con diesel ofrece mayores niveles de eficiencia tanto a carga parcial como a carga total, si se compara con los valores hallados para el funcionamiento con biodiesel y biodiesel + HHO. La caída en la eficiencia para la operación con biodiesel es debida a mayores pérdidas por transferencia de calor a las paredes, un retraso en la combustión y menores niveles de presión dentro de la cámara de combustión

(Agudelo, 2006; Bedoya, 2007); este último como producto de las menores tasas de quemado y a una menor fase de combustión premezclada ocasionada por una menor tasa de volatilización del biodiesel en comparación con el diésel convencional. Por otro lado, la figura 9 revela que la operación con biodiesel + HHO entrega los menores valores de eficiencia, que demuestra que la adición de HHO tiene un efecto energético negativo sobre el desempeño del motor cuando la corriente suministrada a la celda electrolítica se extrae del mismo eje del cigüeñal (celda electrolítica alimentada con el alternador del motor) (Cameron, 2012). La caída de eficiencia en operación en modo dual con biodiesel + HHO produce un incremento en el consumo de combustible para lograr la misma potencia en comparación con los demás combustibles (Bedoya, 2007; Fonseca, 2003)

4.1.4 Nivel de sustitución

Con el análisis del nivel de sustitución en los motores duales se puede determinar cuál es la cantidad de combustible original que se sustituye por el combustible alternativo, con el objeto de cuantificar cual podría ser el ahorro en consumo de combustible cuando el motor opera en modo dual. La Figura 10 muestra el nivel de sustitución de biodiesel para los diferentes valores de salida de potencia cuando el motor operó en modo dual.

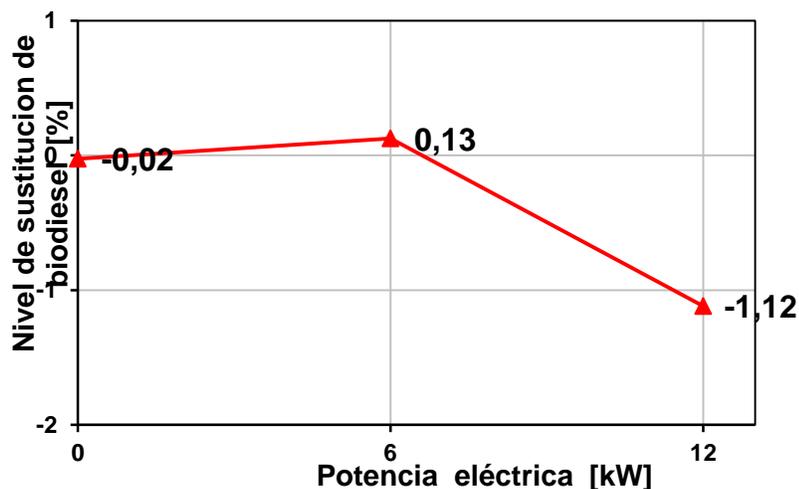


Figura 10. Nivel de sustitución de biodiesel con el motor operando en modo dual.
Fuente: elaboración propia.

La figura 10 revela un aumento del consumo de biodiesel (niveles de sustitución negativos) en operación en modo dual cuando el motor funcionó sin carga al igual que a máxima carga. Los aumentos en el consumo de combustible en estos puntos se deben a la carga adicional ocasionada por el alternador debido al consumo de corriente eléctrica de la celda electrolítica. Los datos experimentales exhiben un nivel de sustitución de biodiesel del 0.13% cuando el motor operó en modo dual con una salida de potencia de 6 kW. Una posible explicación para este pequeño ahorro en el consumo de biodiesel es que tanto el oxígeno como el hidrógeno tienen efectos importantes en la cinética química del proceso de combustión y por lo tanto pueden aumentar la tasa de liberación de calor y mejorar la sincronización de la combustión. Sin embargo, una tasa de adición de HHO de 250 ml/min es muy baja y es posible que no alcance a tener efectos perceptibles en las variables medidas en la periferia del motor como el consumo de combustible.

El nivel consumo de biodiesel para una salida de potencia de 12 kW aumentó en 1.12% que implica para este régimen de operación el consumo adicional de energía para la electrolisis, el cuál prevaleció por encima del efecto en la química de la reacción debido a la adición de HHO.

4.2 Comportamiento ambiental del motor

La evaluación del comportamiento ambiental del motor se basa en el análisis de los índices de emisiones para las especies medidas (CO_2 , CO, NO_x y O_2) dados en gramo de la especie por kilogramo de combustible quemado. El análisis de esta tabla 4.3 de emisiones específicas, esta detallado por debajo de ella, en los apartados de índice de emisiones de CO_2 , CO, NO_x y O_2 , con sus respectivas graficas de emisiones de cada gas vs la potencia eléctrica.

Tabla 4.3. Emisiones específicas. Fuente: elaboración propia

Combustible	Carga (kW)	Emisiones Específicas			
		CO (g/kg de comb)	CO ₂ (g/kg de comb)	NO _x (g/kg de comb)	O ₂ (g/kg de comb)
Diesel	0	28,5	1313,3	5,1	4506,0
	6	18,7	1911,8	11,5	3906,0
	12	7,6	2953,5	24,5	3234,3
Biodiesel	0	8,4	913,4	7,6	3962,8
	6	7,1	1363,1	10,8	3585
	12	15,7	2039,5	17,7	2909,1
Biodiesel + HHO	0	8,2	914,6	7,4	3979,3
	6	6,9	1358,6	10,8	3567,3
	12	15,7	2062,2	16,5	2918,5

4.2.1 Índice de emisiones de CO₂

En la figura 11 se presenta el índice de emisiones de CO₂ para los diferentes grados de carga y combustibles utilizados en la operación del motor. Según la figura 11 hay una mayor emisión de CO₂ por kilogramo de combustible en operación sin carga para los 3 combustibles estudiados y va decreciendo a medida que aumenta el grado de carga en el motor. Esta tendencia general obedece al hecho que cuando el motor opera con mayor grado de carga (mayores potencias de salida) entrega una mayor eficiencia efectiva; regímenes de operación con mayor eficiencia demandan menor consumo de combustible y por lo tanto la emisión de CO₂ por unidad de combustible disminuye. El uso de biodiesel y biodiesel + HHO en el motor disminuyeron los índices de emisiones de CO₂ en un 30% con completa carga. Sin embargo, no hubo una diferencia significativa en cuanto a emisiones de CO₂ entre estos 2 combustibles, que significa que una adición de HHO en pequeñas cantidades no afecta el nivel de emisiones de CO₂. Adicionalmente, la utilización de biocombustibles tiene un menor impacto ambiental debido a que parte del CO₂ emitido en la quema de estos combustibles es reabsorbido por las plantas de las cuales se extraen (United States Environmental Protection Agency, 2002).

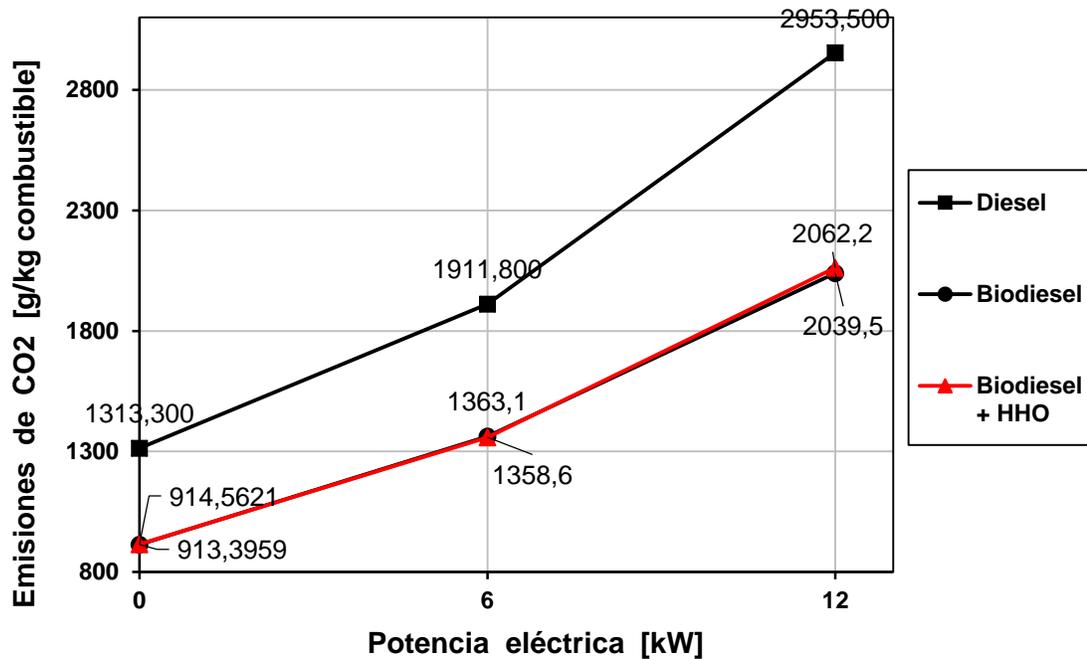


Figura 11. Índice de emisiones de CO₂ para los tres combustibles. Fuente: elaboración propia

4.2.2 Índice de emisiones de CO

Para el funcionamiento de motores de combustión interna, la presencia de monóxido de carbono al igual que de hidrocarburos sin quemar en los gases de escape es un indicador de que el combustible no se está quemando completamente.

En los motores de encendido por compresión en operación normal las emisiones de hidrocarburo sin quemar son prácticamente nulas debido a que estos siempre operan en dosados globales pobres. Sin embargo, las emisiones de CO en estos motores son importantes en ciertas condiciones de operación debido a que la formación de CO dentro del proceso de combustión es muy sensible al historial de temperatura dentro del mismo (Dec y col. 1999). La Figura 12 exhibe el índice de emisiones de CO para los tres combustibles en los diferentes grados de carga evaluados. Para el caso del diesel la tendencia en el índice de emisiones de CO es decreciente a medida que la potencia de salida aumenta; no obstante, hay una

mayor emisión de CO con la utilización de diesel a bajas cargas en comparación con el biodiesel y el biodiesel + HHO, donde se presentan reducciones de hasta el 60% en cargas parciales. Por otra parte, en funcionamiento operación a carga total el índice de emisiones de CO para el biodiesel y el biodiesel +HHO aumentó en un 10.6%.

Una combustión retrasada, menores tasas de volatilización y una mayor cantidad de combustible inyectado son algunos de los causantes del aumento en el índice de emisiones de CO a carga total. Esto es debido a que se forman zonas con mayores dosados locales, y a que hay una mayor parte de la liberación de calor en la carrera de expansión, donde los niveles de temperatura en el proceso de combustión son menores y no se alcanza una oxidación completa del CO en CO₂. A bajas cargas y a cargas parciales la adición de HHO provocó una leve reducción de las emisiones de CO (Maina, 2013).

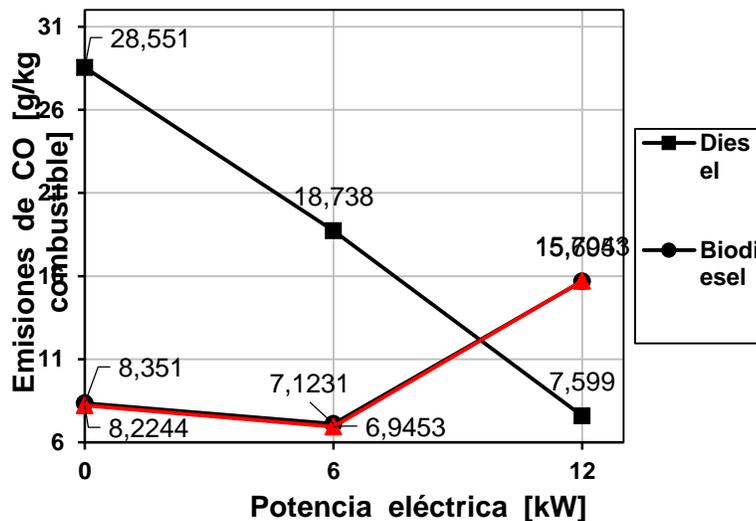


Figura 12. Índice de emisiones de monóxido de carbono para los tres combustibles. Fuente: elaboración propia

4.2.3 Índice de emisiones de NO_x

Los motores de encendido por compresión, debido a sus altas relaciones de compresión presentan altas emisiones de NO_x, los cuales se originan en zonas de alta temperatura dentro de la cámara de combustión, especialmente en locaciones

en donde se da un proceso de combustión con un dosado cercano al estequiométrico. Las emisiones de NO_x son altamente contaminantes y por tal motivo son estrictamente reguladas en contexto internacional. Por lo tanto, tienen gran peso en la evaluación del desempeño ambiental en motores de encendido por compresión. La Figura 13 muestra el índice de emisiones de NO_x en función del grado de carga mientras se utilizaron los tres combustibles. En operación sin carga, la utilización de diesel mostró menor índice de emisiones de NO_x en comparación con el biodiesel y el biodiesel + HHO. Por el contrario, el biodiesel y el biodiesel + HHO entregaron menor índice de emisiones de NO_x a carga parcial y a carga total, con una reducción de hasta el 32%. Esta reducción es producto de menores niveles de temperatura de combustión debido a que el biodiesel presenta una mayor duración de la combustión reduciendo los valores de la presión dentro de la cámara de combustión y por ende la temperatura. En carga total la operación en modo dual con Biodiesel + HHO causó una reducción en el índice de emisiones de NO_x del 6.3%, lo que evidencia que el HHO tiene un efecto químico importante sobre las reacciones elementales que gobiernan la formación de NO_x en el proceso de combustión a altas cargas (mayores niveles de temperatura dentro de la cámara de combustión) (Cameron, 2012; Xue y col, 2010).

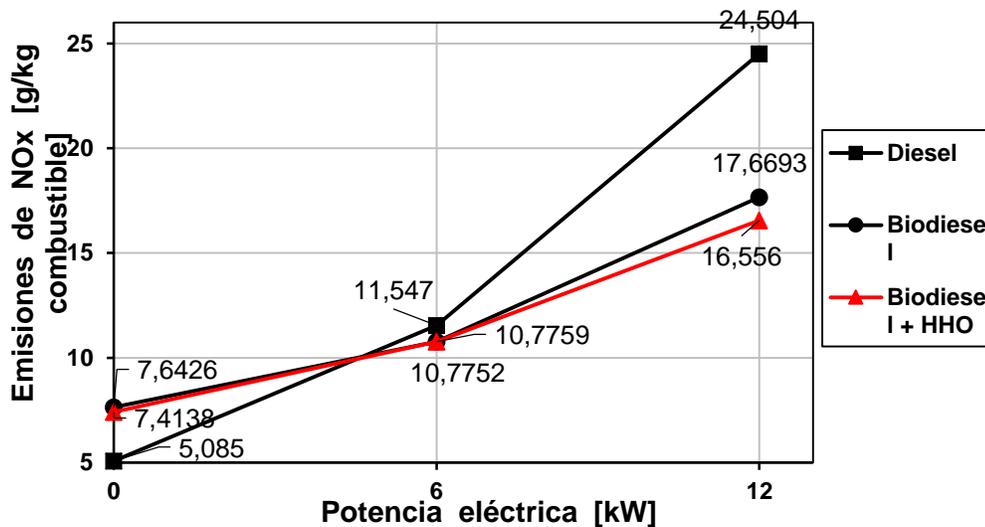


Figura 13. Índice de emisiones de NO_x en función del grado de carga del motor.
Fuente: elaboración propia.

4.2.4 Índice de emisiones de O₂

En la Figura 14 se presentan los índices de emisiones de O₂ para los tres combustibles estudiados en los diferentes grados de carga del motor. La tendencia general muestra una reducción en el índice de emisiones de O₂ con el aumento del grado de carga del motor, debido a un aumento en el dosado lo que es equivalente a un aumento en la inyección de combustible (Heywood, 1988). Adicionalmente, el biodiesel y el biodiesel + HHO no presentan diferencias significativas entre si y además tienen un menor índice de emisiones de O₂ en comparación al diesel para todas las salidas de potencia en el motor. Esto se debe a que el biodiesel tiene una relación aire combustible estequiométrica menor (Quesada, 2007)

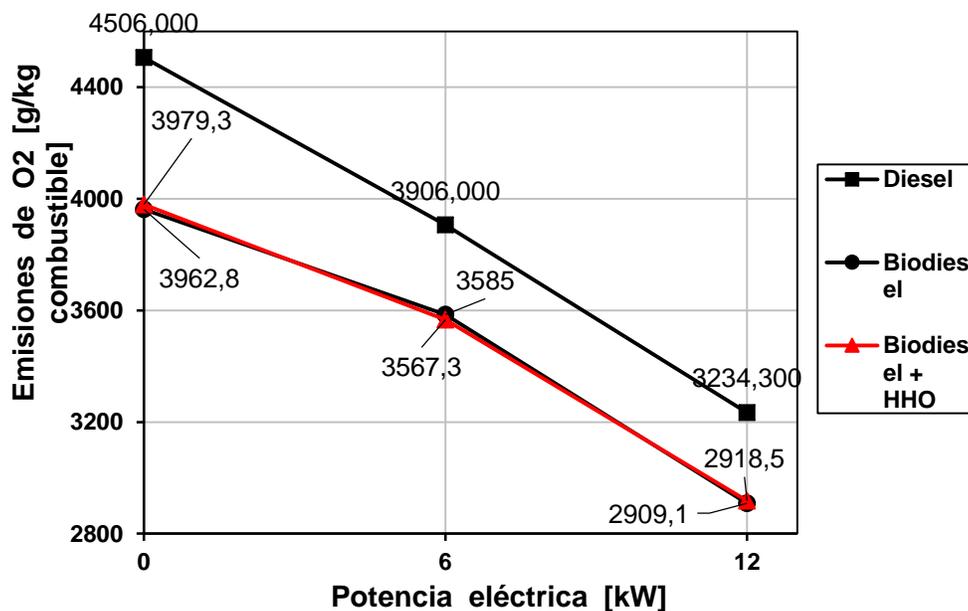


Figura 14. Índice de emisiones de O₂ para los tres combustibles en los diferentes puntos de operación. Fuente: elaboración propia

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones:

- El máximo porcentaje de adición de HHO que fue posible introducir en el ducto de admisión fue de 0,13% a carga parcial de 50%. Esta cantidad estuvo restringida por el alto consumo de energía demandado por el dispositivo de producción de HHO, generando una sobrecarga en el sistema de 15 amperios y generando inestabilidad en el grupo electrógeno.
- Al enriquecer el aire con HHO en modo dual biodiesel de palma, la eficiencia efectiva evidenció diferencias para los combustibles utilizados, incrementándose con el aumento de la potencia eléctrica entregada por el motor. Sin embargo, la operación de funcionamiento del motor con diesel ofrece mayores niveles de eficiencia tanto a carga parcial como a carga total, esto es debido a que la operación con biodiesel proporciona mayores pérdidas por transferencia de calor a las paredes, un retraso en la combustión y menores niveles de presión dentro de la cámara de combustión. Adicionalmente, se observa como el consumo específico de combustible es mayor para el biodiesel y el biodiesel + HHO cuando se comparan con el diesel para las dos potencias presentadas, esto es debido a que el biodiesel tiene un menor poder calorífico inferior.
- El dosado presentó un crecimiento lineal para los tres combustibles utilizados en este estudio, el dosado empleado por el motor para alcanzar una salida de potencia de 12 kW (*maximum rating*) fue alrededor de 0.9 para todos los combustibles, el cual es un valor muy alto para los motores de encendido por compresión en operación normal (0.3 a 0.7).

-
- El aumento en la temperatura de los gases de escape se basa en que la duración de la combustión del biodiesel sea mayor, como resultado de la mayor viscosidad y dificultad para la volatilización de este combustible.
 - En los 3 combustibles estudiados el CO₂ va decreciendo a medida que aumenta el grado de carga en el motor. Esta tendencia obedece al hecho de que cuando el motor opera con mayor grado de carga (mayores potencias de salida) entrega una mayor eficiencia efectiva. Con el uso de biodiesel y biodiesel + HHO en el motor disminuyeron los índices de emisiones de CO₂ en un 30%.
 - A carga total el índice de emisiones de CO para el biodiesel y el biodiesel +HHO aumentó en un 10.6% con respecto al funcionamiento en modo diésel, esto es ocasionado por una combustión retrasada, menores tasas de volatilización y una mayor cantidad de combustible inyectado.
 - Cuando el motor funcionó con biodiesel y biodiesel + HHO el índice de emisiones de NO_x fue menor para ambos grados de carga, con disminuciones del 25,7% y 32% con respecto al diesel, respectivamente. Esta reducción es producto de menores niveles de temperatura de combustión, ya que el biodiesel presenta una mayor duración de la combustión reduciendo los valores de la presión dentro de la cámara de combustión y por ende la temperatura.
 - El índice de emisiones de O₂ disminuyó con el incremento de la carga del motor, esto es por un aumento en el dosado. El biodiesel y el biodiesel + HHO presentan diferencias significativas entre sí del 8,3% y tienen un menor índice de emisiones de O₂ en comparación al diesel del 33,3% y 25% respectivamente, para la máxima salida de potencia en el motor. Esto se debe a que el biodiesel tiene una relación aire combustible estequiométrica menor.

5.2 Recomendaciones

- Se deben realizar pruebas experimentales con el suministro directo y constante de energía al electrolizador. Para esto es necesario usar un suministro de energía de un sistema de modulación por ancho de pulsos (PWM) de la misma fuente de energía. Ya que esta técnica modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica y por lo tanto controla la cantidad de energía que se envía a la carga requerida.

Bibliografía

A. Birtas, I. Voicu, C. Petcu, R. Chiriac, and N. Apostolescu, "The effect of HRG gas addition on diesel engine combustion characteristics and exhaust emissions," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 1200712014, 2011.

A. C. Yilmaz, E. Uludamar, and K. Aydin, "Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 1136611372, 2010.

Agudelo Jhon R, Agudelo Andres F, Perez Juan F, Caracterizacion de la combustión del biodiesel de aceite de palma en un motor diésel, *Revista Energia y Computacion* vol 15, p. 37 – 47, Junio 2006

Agudelo Jhon R, Agudelo Andrés F, Cuadrado Ilba G, Analisis de primera y segunda ley de un motor operando con Biodiesel de aceite de palma. Parte 1 balance energético global. *Revista Energética* 35, p. 1 - 8, Mayo 2006.

Agudelo John R, Bedoya Iván D y Agudelo Andrés F, Emisiones gaseosas y opacidad del humo de un motor operando con bajas concentraciones de biodiesel de palma, *Ingeniería y Desarrollo*, Universidad del Norte, Diciembre, 2005

AGUDELO, John R. BENJUMEA, Pedro; GÓMEZ, Edwin y PÉREZ, Juan Fernando. Biodiesel una Revisión del Desempeño Mecánico y Ambiental. *Ingeniería & Desarrollo*. Universidad del Norte. 13: 1-14, 2003.

A.M. Namasivayam a, T. Korakianitis a, R.J. Crookes a, K.D.H. Bob-Manuel b, J. Olsen, Biodiesel, emulsified biodiesel and dimethyl ether as pilot fuels for natural gas fuelled engines, *Applied Energy*, June 2009, 10 paginas

Arcoumanis Constantine, Bae Choongsik, Crookes Roy, Kinoshita Eiji. The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression ignition engines: a review. *Int J Fuel* 2008;87(7):1014–30.

Banerjee Rahul, Roy Sumit, Kumar Bose Probir, Hydrogen-EGR synergy as a promising pathway to meet the P_{MeNOx}eBSFC trade-off contingencies of the diesel engine: A comprehensive review, *Hydrogen energy*, 14 de agosto del 2015, paginas 25

Bedoya Caro Iván Darío, Estudio de la influencia del sistema de mezclado y la calidad del combustible piloto en el desempeño de un motor dual, Tesis doctorado, 2007

Boretti Alberto, Advantages of the direct injection of both diesel and hydrogen in dual fuel H₂ICE, *Internacional JournAvail of Hydrogen Energy*, Available online 2 June 2011

Cacua, Karen. Amell, Andre´s. y Cadavid, Francisco. Effects of oxygen enriched air on the operation and performance of a diesel-biogas dual fuel engine. *Int J Biomass and Bioenergy*, May 2012, paginas 9.

Cameron Rick, Effects of On-board HHO and Water Injection in a Diesel Generator, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, October 2012

Durairaja R. B. Shanker Lij. Silvasankar M. HHO gas with Bio diesel as a dual fuel with air preheating technology. *Procedia Engineering*. 2012

Dwivedi, Dipankar. Kumar, Agarwal, Avinash. Sharma, Mukesh. Particulate emission characterization of a biodiesel vs diesel-fuelled compression ignition transport engine: A comparative study, *Atmospheric Environment*, May 2006, paginas 10

EL-Kassaby Mohamed M, Eldrainy Yehia A, Khidr Mohamed E, Khidr Kareem I. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions, *Engineering Journal*. Noviembre de 2015.

ESCALANTE SOBERANIS, M. A. & FERNANDEZ, A. M. . A review on the technical adaptations for internal combustion engines to operate with gas/hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35, 12134-12140

FHeffel JW. NO_x emission and performance data for a hydrogen fuelled internal combustion engine at 1500 rpm using exhaust gas recirculation. *Int J Hydrogen Energy* 2003; 28:901–8.

Fonseca Gonzalez Natalia Elizabeth, Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa (GG) en motores de combustión interna alternativos, Tesis doctoral, 2003

GARCÍA, Juan Manuel y GARCÍA, José Ángel. Biocarburantes Líquidos: Biodiésel y Bioetanol. Universidad Rey Juan Carlos del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME), Universidad de Alcalá. Madrid, España, 2006

Heffel JW. NO_x emission and performance data for a hydrogen fuelled internal combustion engine at 3000 rpm using exhaust gas recirculation. *Int J Hydrogen Energy* 2003; 28:1285–92.

Hernández López Leonor. Predicción y Optimización de Emisores y Consumos Mediante Redes Neuronales en Motores Diesel. Temas avanzados de motores de combustión interna. Editorial reverté S. A., 2006, Página 104.

Heywood John B, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Hardcover, 1988.

Hoekman S. Kent, Broch Amber, Robbins Curtis, Ceniceros Eric, Natarajan Mani, Review of biodiesel composition, properties, and specifications, Science direct, October 2011

J.G. Fajardo Cuadro, O. Navas, A. Díaz, *Análisis del desempeño de un motogenerador al usar biodiesel como combustible*, *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, Volumen II, No. 2 - Edición No. 4 Junio del 2006.

Kale K. A. and Dahake M. R. The Effect of HHO and Biodiesel Blends on Performance and Emission of Diesel Engine-A Review. International Journal of Current Engineering and Technology. 2016.

Karim GA, Wierzba I, and Al-Alousi Y. Methane hydrogen mixtures as fuels. International Journal of Hydrogen Energy 1996; 21:625-31.

Kartik P. Durairaja R. B. Shanker Lij. Silvasankar M. HHO gas with Bio diesel as a dual fuel with air preheating technology. Procedia Engineering. 2012

Kumar, Agarwal, Avinash. Gupta, Tarun, Kothari, Abhishek. Particulate emissions from biodiesel vs diesel fuelled compression ignition engine. Renewable and Sustainable Energy Reviews, January 2011, Paginas 23

Kumar Bose Probir, Benerjee Rahul and Deb Madhujit. HYDROGEN COMBUSTION IN A SINGLE CYLINDER DIESEL ENGINE AND TO STUDY ITS PERFORMANCE AND COMBUSTION PARAMETERS. International journal of mechanical engineering and robotics research. Octubre 2012

Lata, D.B. Misra, ashok. Analysis of ignition delay period of a dual fuel diesel engine with hydrogen and LPG as secondary fuels. Int J of Hydrogen Energy, Jan 2011, paginas 11.

Liew C. "An investigation of H₂ supplementation on the combustion and emissions of heavy-duty diesel engines". MSc Thesis. West Virginia University; 2010

Maina Paul, Engine emissions and combustion analysis of biodiesel from east African Countries. South African Journal of science, October 2013, paginas 8.

Masood M, Ishrat MM. Computer simulation of hydrogen-diesel dual fuel exhaust gas emissions with experimental verification. Int J Fuel 2008;87(7):1372–8.

Ministerio de Planificación del Desarrollo, Viceministerio de Planificación Territorial y Ambiental Programa Nacional de Cambios Climáticos (PNCC); Universidad Mayor

de San Andres, Instituto de la investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ), 2012, paginas 71

Miyamoto, Hasegawa, Mikami, Kojima, Kabashima, & Urata, Effet of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine, 2011

Muerza Alex Fernández, Hydrogen of the cars, Journal energy and science, August 2011, 12 paginas

Masjuki H.H, Ruhul A.M, Mustafi Nirendra N, Kalam M.A, Arbab M.I, Rizwanul Fattah. Study of production optimization and effect of hydroxyl gas on a CI engine performance and emission fueled with biodiesel blends. International Journal Hydrogen Energy. Junio 2016

Nalgundwar Ankur, Biswajit Paul , Sunil Kumar Sharma, Comparison of performance and emissions characteristics of DI CI engine fueled with dual biodiesel blends of palm and jatropa, Fuel, January 2016, paginas 8

Oner, Cengiz. Altun, Sehmus. Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine, Applied Energy, February 2009, Paginas 7

Ozcanli Mustafa, Atakan Akar Mustafa, Calik Ahmet, Serin Hasan. Using HHO (Hydroxy) and hydrogen enriched castor oil biodiesel in compression ignition engine. International Journal Hydrogen Energy. Enero 2017

Ozener, Orkun. Yuksek, Levent. Ergenc, Tekin. Ozkan, Muammer. Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics, Int J Fuel, October 2012, Paginas 9

Palacio Lopez Gilberto David. Análisis de eficiencia de un motor de combustión interna utilizando para el funcionamiento de una planta eléctrica de potencia de

1MW. Trabajo de grado, Facultad de ingenierias, Universidad de San Carlos de Guatemala, Noviembre 2007, Paginas 119

Park, Cheolwoong. Kim, Changgi. Kim, Kwantaea. Lee, Daehoon. Song, Younghoon. Moriyoshi, Yasuo. The influence of hydrogen-enriched gas on the performance of lean NOx trap catalyst for a light-duty diesel engine. Int. J of Hydrogen Energy, Janaury 2010, Paginas 8

Peña Sánchez de Rivera, Regresión y diseño de experimentos, alianza editorial, 2002, paginas 744.

Peña Sánchez de Rivera, Fundamentos de Estadística, alianza editorial, 2001, paginas 688.

Quezada Rivera Juan Carlos, Evaluación de la energía de combustión y otros parámetros físico-químicos del biodiesel obtenido a partir de cinco aceites vegetales, Zamorano, Honduras, Diciembre, 2007

Revista Nacional de Combustibles, Mitos y Realidades de los Biocombustibles, 2011, disponibles en www.Fedebiocombustibles.com

S. Bari, M. Mohammad Esmail, Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine, J. Fuel, December 2008, 6 paginas

Sanhueza, Pedro. Análisis Efectos en Salud por Material Particulado Respirable (PM₁₀) y Ozono (O₃) en la VI Región, Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire (SINCA), Diciembre 2006, Paginas 6

Saravanan. N, Nagarjan. G, Sanjay. G, Dhanasekaran. C, Kalaiselven. K.M, Combustion analysis on a DI diesel engine with hydrogen dual fuel mode, Fuel, August 2008, paginas 9.

Saravanan. N, Nagarajan. G, An insight on hydrogen fuel injection techniques with SCR system for NOX reduction in a hydrogen–diesel dual fuel engine, International Journal Hydrogen Energy, 30 September 2009

Senthil Kumar M, Ramesh A, Nagalingam B. Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine. *Int J Hydrogen Energy* 2003; 10:1143–54.

Shin, Buomsik. Cho, Youngsoo. Han, Daeha. Min, Chun, K, Wang. Investigation of the effects of hydrogen on cylinder pressure in a split-injection diesel engine at heavy EGR. *Int J of Hydrogen Energy*. August 2011, Paginas 13.

Smolinka Tom, Tabu Ojong Emile, Garchen Jurgen. Hydrogen Production from Renewable Energies—Electrolyzer Technologies. *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*. 2015 pag 103-128, Chapter 8.

Stanislaw Szwaja*, Karol Grab-Rogalinski, Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine, *Int. J Hydrogen Energy*, 16 April 17 2009

T. Korakianitis, A.M. Namasivayam, R.J. Crookes, Hydrogen dual-fuelling of compression ignition engines with emulsified biodiesel as pilot fuel, *Int J. of Hydrogen Energy*, 2 May 2010, 16 paginas.

Toru Miyamoto, Hirokazu Hasegawa, Masato Mikami, Naoya Kojima, Hajime Kabashima, Yasuhiro Urata, Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine, *Int. J Hydrogen Energy*, 12 August 2011, 12 paginas.

Turan Arat Hu seyin, Kaan Baltacioglu Mustafa, Ozcanli Mustafa, Aydin Kadir, Effect of using Hydroxy e CNG fuel mixtures in a non-modified diesel engine by substitution of diesel fuel, *Hydrogen energy*, February 2016, paginas 10

Uludamar Erinc, Tosun Erdi, Tuccar okhan, Yildizhan Safak, Calik Ahmet, Yildirim Sefa, Serin Hasan, Ozcanli Mustafa. Evaluation of vibration characteristics of a hydroxyl (HHO) gas generator installed diesel engine fuelled with different dieselebiodiesel blends. *International Journal Hydrogen Energy*. January 2017

United States Environmental Protection Agency. (2002). *Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions Draft Technical Report*.

Verhelst S, Woolley R, Lawes M, Sierens R. Laminar and unstable burning, velocities and Markstein lengths of hydrogen–air mixtures at engine-like conditions. *Int J Hydrogen Energy* 2005; 30:209–16.

Wen, Wu, Horng. Yi, Wu, Zhan. Combustion characteristics and optimal factors determination with Taguchi method for diesel engines port-injecting hydrogen. *Journal Energy*, Oct 2012, paginas 10.

Xue Jinlin, Tony E. Grift Alan C. Hansen, Effect of biodiesel on engine performances and emissions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9 November 2010, 19 paginas.

YANMAR DIESEL ENGINE CO.LTD, APPLICATION MANUAL INDUSTRIAL DIESEL ENGINE MODEL TNE Series, Julio 1997, P 340.

Yilmaz Ali Can, Uldamar Erinc, Aydin Kadir. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. *International Journal Hydrogen Energy*. August 2010

Anexos

Tabla A1 de Motor de planta eléctrica estacionario Diesel de 35 kVA

#	Nombre	Concepto
1	Marca	Yanmar
2	Modelo	3 TNE84
3	Cilindros	3 en línea
4	Velocidad	3600 rpm
5	Ciclos	4 tiempos
6	Tipo de aspiración	Natural
7	Tipo de inyección	Directa
8	Carrera	84 mm
9	Diámetro	90 mm
10	Desplazamiento	1496 cc
11	Sistema de refrigeración	Agua (radiador)
12	Sistema de lubricación	Forzada por bomba
13	Capacidad carter	4,7 litros
14	Capacidad radiador	2,0 litros
15	Arranque Alternador	Batería
16	Capacidad continua	26,1 kw (35 HP)
17	Capacidad emergencia	28,7 kw (38,5 HP)
18	Consumo combustible al 100% de carga	8,1 l/h

Tabla A2 Generador de Corriente

#	Nombre	Concepto
1	Marca	MECC ALTE
2	Modelo	ECD 28, 3L/2
3	Tipo 4 polos	Autoregulador
4	Regulador voltaje	De estado
5	Aislamiento	Clase H
6	Bolineras	1
7	Acople	Duco flexible SAE
8	Capacidad estándar	31 kVA (24,8 kw)
9	Eficiencia (para el total de carga)	88%
10	Voltaje	127/220
11	Regulación (Regulación automática de voltaje)	AVR
12	Factor de Potencia	0,8
13	Clase	Trifásica
14	Ciclaje	60 Hz
15	Diodos	6

Los valores reportados para la incertidumbre de los equipos de medición son los que reporta el fabricante

Tabla A3 de la Incertidumbre equipos de medición

Variable	Unidades	Equipo	Error
Volumen HHO	(ml)	Probeta de vidrio graduada de vidrio de 250 ml de borosilicato	± 1 ml

Tiempo	(seg)	Cronometro digital control company modelo 1043	$\pm 0,1 \%$
Corriente	(Amp)	multiamperimétrica automotriz DCM-2605	$\pm 2 \%$
Voltaje	(v)	Multímetro Unit-T M890G	$\pm 0,5 \%$
Flujo másico (diesel y Biodiesel)	(g/s)	Medidor Coriolis Siemens , SITRANS FC MASS 2100 DI 1.5	$\pm 0,1 \%$

Para hacer la estimación de la incertidumbre de la eficiencia térmica se partió de la teoría de incertidumbre y propagación del error para la cual se utilizaron los datos suministrados por los fabricantes de los diferentes instrumentos de medición utilizados, haciendo primero una estimación del error de las variables involucradas para el cálculo de la eficiencia efectiva (potencia y flujos másicos de combustibles) y luego haciendo la propagación de dichos errores a la estimación de la eficiencia

Tabla A4 de cálculos de eficiencia térmica

Valor incertidumbre de los parámetros involucrados en la eficiencia del motor	
Parámetro	Error (%)
Potencia	2,5
Energía suministrada por el combustible	0,1
Eficiencia efectiva	2,6

