

Evaluación de la cinética de combustión del aceite, biodiesel y mezclas de Jatropha y sus emisiones de material particulado en motores de combustión interna

Adriana Hernández Carrillo

Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2017

Evaluación de la cinética de combustión del aceite, biodiesel y mezclas de Jatropha y sus emisiones de material particulado en motores de combustión interna

Adriana Hernández Carrillo
Ingeniera Mecánica

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Mecánica

Director (a):
Ph.D., Helmer Acevedo Gamboa

Línea de Investigación:
Ciencias Térmicas – Motores de combustión Interna.

Grupo de Investigación:
Grupo de investigación en combustibles alternativos, energía y protección del medio ambiente GICAEPMA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia

2017

Resumen

Los problemas actuales de salud respiratoria derivados de emisiones contaminantes provenientes de automóviles y procesos industriales, indican una baja calidad del aire en ciudades de todo el mundo, lo cual, fomenta la búsqueda de combustibles que no impacten directamente la salud humana generando patologías a mediano plazo. Producto de dicha búsqueda se ha fomentado la producción de diversos biocombustibles con los cuales se han encontrado emisiones más bajas de material particulado con respecto a los combustibles fósiles. El MP es emitido principalmente por motores de combustión interna y por fuentes fijas industriales, los cuales al provenir de determinados biocombustibles generan especies químicas que son potenciales precursores de las etapas tempranas del MP.

Dada la necesidad de frenar el uso indiscriminado de fuentes ricas en precursores de material particulado, han surgido combustibles como los productos derivados de la *Jatropha* que han incentivado el uso de recursos renovables contribuyendo directamente con la conservación medioambiental y a su vez, han revelado reducciones en las emisiones, que los hace menos nocivos con la salud humana. Este trabajo busca realizar evaluar la reducción de emisiones obtenidas del empleo de biodiesel de *jatropha* y sus mezclas con diésel de grado comercial y realizar un análisis comparativo entre los resultados de modelo matemático existente que predice la producción de MP emitido por el biocombustibles de *Jatropha* y sus mezclas con diésel de grado comercial con resultados experimentales medidos en condiciones reales en un motor de laboratorio operado a distintas velocidades de rotación para las mezclas JB3, JB5 y JB7 con carga baja 25% y carga media 50%.

En general, se encuentra que a generación de MP en el motor de combustión interna encendido por compresión depende de la rotación del motor y de la carga del mismo siendo mayor para velocidades de rotación altas y cargas altas. A su vez, tanto en el modelo predictivo de generación de material particulado como en los datos experimentales se encontró que a mayor contenido de biocombustible – Biodiesel de *Jatropha* JB7 las emisiones de material particulado son menores con respecto a las mezclas JB5 y JB3 aunque para datos como la mezcla JB5 se encontró que para carga baja y velocidad de 1900, las emisiones son las más altas con respecto a las demás mezclas, de donde se reitera la limitación del modelo predictivo para consideración de variables adicionales inherentes al motor de prueba.

Palabras clave: Jatropha, material particulado, diésel, biodiesel de Jatropha, combustión, cinética de reacción.

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 6 |
| 1. Objetivos | 9 |
| 1.1. Objetivo General..... | 9 |
| 1.2. Objetivos Específicos | 9 |
| 2. Planteamiento del problema | 10 |
| 2.1. Antecedentes y justificación | 11 |
| 2.2.1. Desempeño de motores de combustión interna encendidos por compresión operados con biodiesel de Jatropha | 13 |
| 2.4. Efectos del combustible en la generación de material particulado. | 18 |
| 2.5. Extracción aceite de Jatropha | 19 |
| 2.6. Producción del biodiesel de Jatropha | 20 |
| 3. Descripción experimental | 22 |
| 3.1. Producción del aceite de Jatropha | 22 |
| 3.2. Caracterización del aceite de Jatropha..... | 24 |
| 3.3. Producción del biodiésel de Jatropha en laboratorio..... | 26 |
| 3.4. Caracterización del biodiesel de Jatropha..... | 27 |
| 3.5. Motor de combustión interna encendido por compresión | 28 |
| 3.6. Matriz de ensayos a biocombustibles de Jatropha y mezclas con diésel mineral | 31 |
| 3.6.1. Determinación de condiciones de carga | 31 |
| 3.7. Modelo de formación de Material particulado y combustión | 35 |
| 3.7.1. Modelo para MP - Biodiesel | 35 |
| Precusores - Nucleación | 36 |
| Crecimiento de superficie..... | 38 |
| Oxidación..... | 39 |
| Balance de masa y balance de partículas | 40 |
| $dNdt = w_{pn} + w_{coag} [particulas/m^3]$ | 41 |
| 3.8. Modelo de Combustión | 41 |
| 3.8.1. Modelo de combustión para Diésel | 41 |
| 3.8.2. Modelo de combustión para el biodiesel de Jatropha | 44 |
| Mecanismo Químico para precursores..... | 48 |
| 3.9. Limitaciones del modelo | 49 |
| 4. Resultados experimentales..... | 50 |
| 5. Resultados del Modelo predictivo | 55 |
| Bibliografía | 61 |

Introducción

La contaminación del aire ha venido generando una problemática crónica de enfermedades respiratorias y deterioro del medio ambiente en lugares donde hay concentraciones considerables de población con empleo de vehículos y asentamientos industriales. Uno de los principales causantes es el material particulado, que se genera principalmente la combustión de motores de vehículos e industrias. El material particulado es una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire que debido a diversos factores modifican sus propiedades como: composición, tamaño y forma. Se han encontrado una serie de estudios que afirman la relación directa entre las emisiones de material particulado y las enfermedades respiratorias (Harrison, 2000).

Las partículas emitidas con tamaños menores a 10 micras - MP10, representan un agente nocivo para la salud humana. Según estadísticas de la Subdirección de vigilancia en Salud, durante el año 2014 los casos de enfermedad respiratoria aguda (ERA) fueron mayores durante el primer trimestre del año 2014, periodo en el cual también se registró el promedio más alto de concentraciones de material particulado PM 10. Esto demuestra que las estrategias de mitigación de emisiones descritas en el Plan Decenal de Descontaminación para Bogotá en el año 2010, como la disminución del número de vehículos que transitan diariamente por Bogotá con medidas con el pico y placa ambiental enmarcado en los Decretos 174 de 2006 y 325 de 2006, el pico y placa de movilidad enmarcado en el Decretos 626/1998, 1098/2000, 07/2002, 212/2003, 180/2004, 198/2004, 033/2009) que para la actualidad han sufrido variaciones horarias, el mejoramiento del ACPM, los operativos de control de emisiones en las vías, el control de emisiones a fuentes fijas, los inventarios de emisiones los controles de emisiones en vehículos por filtros o la renovación de tecnologías, han resultado insuficientes y la contaminación aportada por el transporte y fuentes fijas tiende a tener un aumento descontrolado.

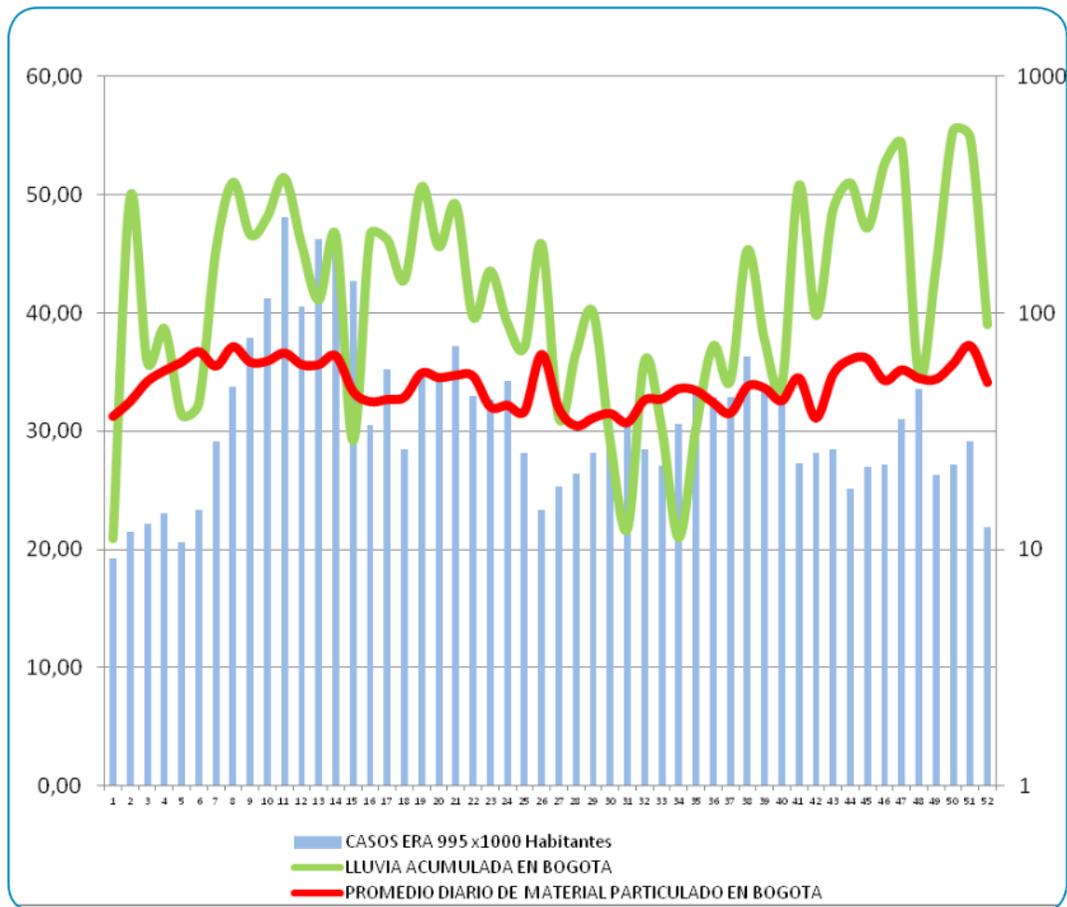


Figura 1. Comportamiento de la enfermedad respiratoria vs precipitación acumulada y concentración promedio de material particulado pm 10 por semana epidemiológica año 2014 en Bogotá. Fuente: Tomado del Boletín IV trimestre de 2014 de enfermedad respiratoria aguda ERA, Subdirección de vigilancia en salud.

Una de las estrategias para la disminución de material particulado es la inclusión de políticas obligatorias de uso de combustibles de origen vegetal en mezclas para vehículos automotores. Para el caso colombiano, en el año 2001 se dieron los primeros pasos en políticas para el desarrollo de biocombustibles, con la expedición de la Ley 693, donde se establecieron las primeras normas sobre el empleo de alcoholes combustibles sin dejar de lado las condiciones para su producción, comercialización y consumo. La Ley 939 (Congreso de la República de Colombia, 2004) establece que los combustibles que se utilicen en el país para los motores diésel, también deberán contener biocombustibles de origen vegetal o animal. Finalmente, el documento CONPES 3510 plantea “una política orientada a promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia, aprovechando las oportunidades de desarrollo económico y social que ofrecen los

mercados emergentes (nacionales e internacionales) de los biocombustibles” (CONPES, 2008).

Para el caso de la industria minera, en donde se proyectó un uso amplio de biocombustibles, se han desarrollado políticas públicas dirigidas a incentivar el empleo de biodiesel con estímulos para su producción y comercialización, lo cual representó en su momento una oportunidad de disminución del impacto medioambiental generado por otros combustibles, el crecimiento económico local, generación de empleo y la agregación de valor a la industria agrícola nacional. A pesar de estos beneficios, en el sector minero no se emplea la mezcla de biodiesel nacional y esto se debe a la falta de claridad estructural del mercado del biodiesel. En gran parte, la intención de funcionarios del gobierno que en desconocimiento de la relación del costo de producción y procesamiento de las materias primas, es pretender balancear los precios de unas fuentes de combustibles con otras generando una incertidumbre que no permite tener las reglas claras sobre las condiciones de oferta y demanda de los biocombustibles.

Una perspectiva global permite afirmar que la formación de Material Particulado puede atribuirse a diversos factores como son: los esquemas de movilidad de las ciudades, las propiedades inherentes al parque automotor (el combustible que emplean, su calidad, su composición y su estado mecánico), la cantidad de industrias (los combustibles con los que operan) y las condiciones ambientales. Así que para contribuir con el mejoramiento de la calidad del aire de las grandes ciudades, es necesario proponer estrategias de disminución de emisiones contaminantes que sean viables y conjuntas.

En este trabajo se presentan los resultados de la producción y caracterización de biocombustibles de Jatropha que posteriormente se emplean en la realización de ensayos para diversas condiciones de operación en de un motor de combustión interna encendido por compresión del Laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia.

La extracción y caracterización de los biocombustibles de Jatropha se realizó en el Laboratorio de Ingeniería química con financiación de un proyecto de investigación de Carbones del Cerrejón, complejo de minería y transporte integrado, que ha impulsado la financiación de investigaciones y desarrollos tecnológicos en convenio con el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS, sobre el uso de Jatropha curcas L. como combustible alternativo para motores encendidos por compresión, de las cuales hace parte este trabajo.

El objetivo de los resultados es compararlos con los resultados obtenidos de un modelo matemático existente que tiene como finalidad simular la producción de material particulado por la combustión de dicho combustible en un motor de combustión interna teniendo en cuenta la temperatura en la cámara de combustión y las fracciones volumétricas de entrada.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Estudiar el efecto de mezclas biocombustibles de Jatropha Curcas con diésel mineral en las emisiones de MP de un motor de combustión interna de laboratorio.

1.2. Objetivos Específicos

- Extracción de aceite a partir de semillas de Jatropha y producción de biodiesel de Jatropha.
- Determinar los efectos sobre las emisiones de MP obtenidas por el cambio de las concentraciones de los biocombustibles analizados en cada motor.
- Adaptar y comparar los resultados de un modelo predictivo de formación de MP con datos experimentales de emisiones de material particulado obtenidos de la combustión de los biocombustibles de Jatropha Curcas en un motor de laboratorio.

2. Planteamiento del problema

La situación ambiental actual es bastante crítica en términos de la baja calidad del aire generada por los combustibles empleados. Además la escasez de fuentes fósiles, conduce a la necesidad de encontrar nuevos combustibles y nuevas tecnologías. Los biocombustibles han sido una opción aceptable en reemplazo parcial de los combustibles fósiles. Sin embargo, no están lejos de producir daños ambientales, a la salud humana o impactos como la crisis de cultivos alimentarios.

En los últimos años se han incentivado diversas investigaciones en el empleo de biocombustibles de Jatropha Curcas como combustible alternativo en motores de combustión interna. Sin embargo, su investigación no está ampliamente desarrollada. Se ha encontrado que el biodiesel de Jatropha tiene ventajas sobre otros biocombustibles como encontró T. Ganapathy (2011) que estudió la influencia del tiempo de inyección, momento de carga y velocidad del motor en las características de rendimiento, la combustión y la emisión de motores empleando biodiesel Jatropha. Chauhan (2012) realizó un estudio con el fin de comparar las características de rendimiento, las emisiones y la combustión de biodiesel derivado de aceite de Jatropha en un motor diésel de combustible dual con resultados de la línea de base de los resultados para combustible diésel reiterando las ventajas del empleo de este combustible alternativo en motores de combustión interna.

Como estás, existen diversas investigaciones que aportan parámetros de desempeño del motor operando con el aceite de Jatropha y sus mezclas con diésel mineral y de diésel de Jatropha y sus mezclas con diésel mineral, inclusive estableciendo sus emisiones características.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que debido a la alta viscosidad y poca volatilidad de los biocombustibles, se dificulta su pulverización debido a su gran peso molecular y su estructura molecular voluminosa. Esa pobre volatilidad permite que se inyecten gotas grandes de biocombustible las cuales generan una mezcla de aire combustible, conllevando a una combustión incompleta. Las emisiones obtenidas bajo estas características son más altas, se generan depósitos en la cámara de combustión, formaciones de goma y un porcentaje de combustible no quemado. Por esta razón, ha sido necesaria la adición de diésel mineral a los biocombustibles para poder operarlos eficientemente en motores de combustión interna, sin dejar a un lado la búsqueda de emisiones contaminantes más bajas, conservación de las reservas naturales de los

combustibles empleados hasta hoy, ahorros económicos y un buen desempeño de los motores. En estudios realizados hasta el momento, no se ha tenido en cuenta la relación directa entre el combustible de entrada y las emisiones de MP resultantes de la combustión de las mezclas de los biocombustibles con diésel comercial lo cuál es el principal objetivo de esta tesis de maestría.

2.1. Antecedentes y justificación

El agotamiento pronosticado del petróleo para el presente siglo está incentivando el empleo e investigación en fuentes de energía de origen alternativo, como los biocombustibles, los cuales, ofrecen mayor seguridad energética, menores emisiones de gases invernadero y de material particulado, desarrollo rural, mejor desempeño de los vehículos y una reducción en la demanda de petróleo.

Alrededor del mundo, gobiernos de distintos países han llevado acciones para contrarrestar éste agotamiento con el empleo de políticas obligatorias de inclusión de bioenergías tales como adición de porcentajes de biocombustibles en mezclas para automotores. En Estados Unidos aproximadamente desde el año 2005 se estableció que el volumen mínimo de los combustibles renovables para la mezcla con gasolina sería de 7,5 billones de galones para el 2012. Para el año 2022, la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA, por sus iniciales en inglés) proyectó que el volumen de biocombustible que se mezclará con combustibles fósiles será alrededor de 36 billones de galones promoviendo nuevos alcances en la investigación en biodiesel y biogás. Para el año 2010, se generaron políticas de reducción de gases de efecto invernadero con el empleo de biocombustibles. [EPA, 2007, 2010]. En China, en junio de 2002, el gobierno hizo obligatorio el uso de mezcla etanol-gasolina como combustible. En 2004 el gobierno Chino introdujo el uso obligatorio de gasolina mezclada con 10% de etanol (E10) en las provincias de Helongjiang, Jilin, Liaoning, Henan, y Anhui. Luego, se expande el programa E10 a 27 ciudades en las provincias de Shandong, Jiangsu, Hebei, y Hubeien. En 2006 la producción de gasolina-etanol fue de aproximadamente 920 mil millones de toneladas [USDA, 2006] A su vez, Europa [European Parliament, 2009], estableció que el 20% de la energía debe provenir de fuentes de combustibles renovables y 10% de transporte.

Seguridad alimentaria.

Específicamente, los principales biocombustibles se obtienen partiendo de recursos renovables como la biomasa proveniente de diferentes cultivos agrícolas como la caña de azúcar, maíz, sorgo, yuca, palma de aceite, colza, soya, girasol, ricino, jatropha curcas y microalgas, éstos dos últimos corresponden a biocombustibles de segunda y tercera generación extraídos a partir de cultivos que no hacen parte de fuentes alimenticias, y poseen buenas alternativas de producción de biocarburantes, disminuyendo así la

dependencia de los combustibles fósiles y así mismo, la emisión de gases nocivos para el medio ambiente.

La FAO ha planteado su preocupación sobre el incremento de la producción de biocombustibles en los países en desarrollo porque se generaría presión y competencia sobre los recursos naturales que ya son escasos, con consecuencias potencialmente negativas en materia social y medioambiental. Por otra parte, si las tierras para cultivos alimenticios se utilizan o si se reemplaza su finalidad hacia la producción de biocombustibles, se potencializaría el riesgo a mediano plazo para la seguridad alimentaria, conllevando a un aumento en el desplazamiento de actividades agrícolas hacia tierras aún más marginales e, indirectamente, propiciarían un incremento en los precios de los alimentos en dicho plazo a causa de la escasez de los mismos.

En el caso colombiano, se cuenta con 21,5 millones de hectáreas con vocación agrícola, de las cuales el 18,6% actualmente tiene uso agrícola. En Colombia, de acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, se estima un área potencial de 114.828 ha (2,7 % del área actualmente en uso agrícola) para la producción de biocarburantes. Situación que genera gran preocupación, si se tiene en cuenta que el área destinada a biocombustibles incrementa cada año, esto debido a que los biocombustibles resultan ser una buena alternativa en países en desarrollo incentivando su crecimiento económico, desarrollo rural y disminución de la pobreza.

Jatropha como alternativa

Dentro de los recursos renovables que no afectan la seguridad alimentaria se encuentra la Jatropha Curcas, recurso del cual se puede extraer aceite y producir biodiesel. El aceite de Jatropha Curcas es un biocombustible que podría descentralizar los recursos energéticos empleados actualmente, además de provenir de una fuente renovable y ser un biocombustible de segunda generación, se ha venido posicionando como un recurso de gran relevancia en el medio energético. Sin embargo, se ha encontrado que su empleo en motores es posible en buenas condiciones únicamente como mezcla, no posee buenas propiedades de combustión, en términos de desempeño es inferior al biodiesel mineral y puede requerir modificaciones en el motor. En el caso del biodiesel de Jatropha se encuentran varias ventajas respecto al aceite como la disminución de la viscosidad, Reducción de la viscosidad, se reducen las emisiones de CO, HC, MP, presenta una mejor combustión y tiene la posibilidad de emplearse puro o en distintas concentraciones. Al igual que el aceite el diésel de Jatropha, tiene sus desventajas como que tiene un costo elevado en su proceso de transesterificación, también presenta un rendimiento menos al diésel mineral y las emisiones de NOx aumentan.

2.1.1. Consideraciones generales y suposiciones

El interés de este proyecto en el estudio de las emisiones de material particulado de biocombustibles de Jatropha estuvo en su momento impactado por lo siguiente:

- Para la fecha de inicio de este trabajo de investigación en Colombia ya era obligatorio el uso de un porcentaje de biocombustible dentro del combustible fósil tradicional y la Jatropha se perfilaba como un combustible alternativo con buen desempeño y bajas emisiones.
- Para el inicio de este proyecto, surgió el interés de conocer el desempeño de los biocombustibles de Jatropha en motores mineros de trabajo pesado. Para la fase media de este trabajo se retiró el acceso a experimentación con estos motores, por lo cual, no se reportan esos resultados.
- En el ajuste del modelo existente para Aceite de Jatropha se generaron errores numéricos que impidieron obtener resultados concluyentes respecto al comportamiento de la emisión de material particulado, eso debido a la escasa información en literatura de la cinética de combustión para el Aceite de Jatropha. Esos resultados no se reportan en este trabajo.
- Para lograr realizar las simulaciones para la formación de material particulado de Biodiesel de Jatropha se realizaron diversas anulaciones de especies que generaban conflictos numéricos que impedían el progreso de la misma y la obtención de resultados completos.
- Para fines comparativos y dadas las condiciones de simulación del modelo predictivo de formación de material particulado que no permite la consideración de cargas al motor, impidiendo una relación directa entre la parte experimental y la parte teórica de la simulación, se realiza una suposición para las condiciones de mezcla rica (carga 50%) y media pobre, se asume como mezcla rica (carga 50%) el trabajo del motor en cargas del 50% y como mezcla pobre (carga 25%) una mezcla del motor de 25%.

2.2. Estado del arte

2.2.1. Desempeño de motores de combustión interna encendidos por compresión operados con biodiesel de Jatropha

Actualmente existen diversas restricciones medioambientales que acotan las emisiones contaminantes dentro de una serie de normas como la europea por ejemplo, que viene siendo desarrollada hace varias décadas y ha restringido considerablemente las emisiones contaminantes de NO_x y PM (figura 1) o la normatividad aplicada en América Latina y diversos países (figura 2). Esta limitación incentiva el desarrollo de nuevas

tecnologías en motores y en post-combustión incluyendo el empleo de combustibles como el biodiesel de Jatropha aunque en diversos escenarios surge la preocupación de que el desempeño de motores operados con estos biocombustibles no sea equivalente a los combustibles tradicionales.

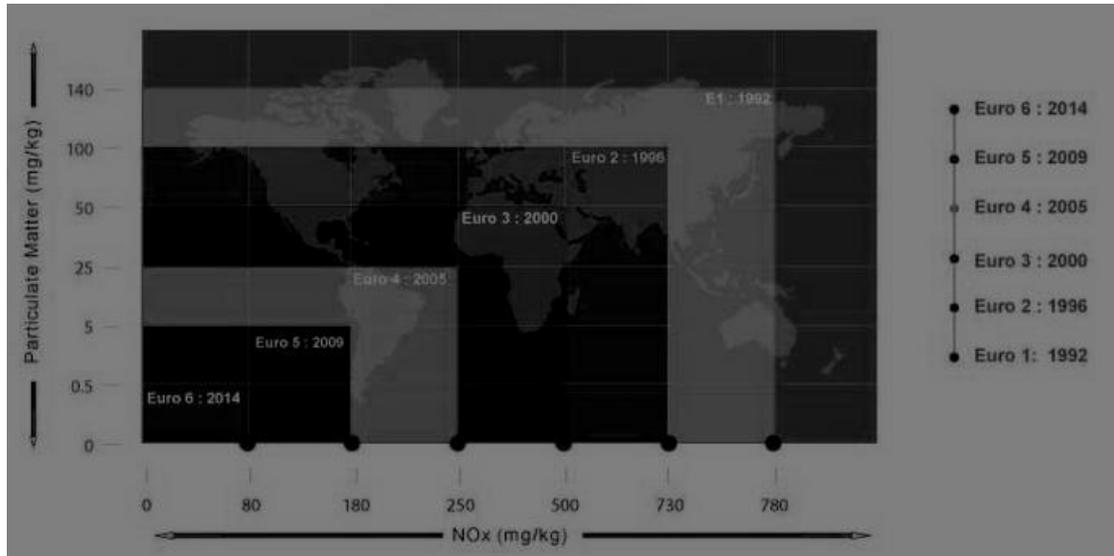


Figura 2. Normatividad Europea para emisiones de NOx y MP. Fuente SMMT (UK).

| Grupo | Región | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | |
|-------------------|-------------------------|----------------------|---------|------|------|------------------|------|------|--|
| Otros mercados | Estados Unidos y Canadá | EPA 2010 | | | | | | | |
| | UE | Euro VI | | | | | | | |
| | Japón | PNLTES | | | | | | | |
| | Corea del Sur | Euro V | Euro VI | | | | | | |
| | Australia | Euro V/EPA 2007/IE05 | | | | | | | |
| | Rusia | Euro IV | Euro V | | | | | | |
| | China | China IV | | | | | | | |
| | India | Bharata III | | | | | | | |
| América Latina | México | EPA 2004/Euro IV | | | | EPA 2010/Euro VI | | | |
| | Brasil | P-7 | | | | | | | |
| | Argentina | Euro IV | Euro V | | | | | | |
| | Chile | Euro IV | Euro V | | | | | | |
| | Colombia | Euro II | Euro IV | | | | | | |
| | Perú | Euro III | | | | | | | |
| | Uruguay | Euro III | | | | | | | |
| | Ecuador | EPA 94/Euro II | | | | | | | |
| | Costa Rica | Euro I | | | | | | | |
| | Venezuela | EPA 88/Euro I | | | | | | | |
| Equivalencia Euro | | | | | | | | | |
| Pre-Euro II | | II | III | IV | V | VI | | | |

Figura 3. Cronología de las normas de emisión de vehículos pesados adoptadas por país. Fuente: EPA

El desempeño de un motor de combustión interna operado con biodiesel de *Jatropha* no difiere considerablemente del desempeño encontrado en los mismos motores operados con diesel mineral (Gerpen, 2010). Incluso es posible obtener una potencia equivalente en un motor operado con biodiesel y en un motor operado con diesel mineral (Lapuerta M, 2004). Por ejemplo, se encuentra que en motores mono-cilíndricos de aspiración natural, la presión media efectiva se alcanza fácilmente con un biodiesel etílico teniendo un blanco de diesel convencional (S Puhan, 2005). Adicionalmente, en un motor de inyección directa de 1.9 litros se encuentra que la potencia obtenida tanto con gasóleo convencional como con biodiesel de colza fue la misma operando en seis diferentes modos estacionarios parametrizados por régimen e inyección de combustible. E igualmente se encuentra que aumenta el consumo específico de combustible (Senatore A, 2000). Únicamente con plena carga en el motor, se encuentra un decremento en la potencia del motor operado con biodiesel y eso puede explicarse por la relación existente entre el poder calorífico con respecto a la unidad volumétrica que es menor en el biodiesel en un 9% (Rodríguez José, 2007).

En contradicción a las conclusiones de los autores anteriores sobre la igualdad en la potencia indiferente del combustible operado, en diversos trabajos se han encontrado pérdidas de potencia para motores operados con biodiesel. Para un motor de aspiración natural operados a plena carga operados con diesel, y mezclas con biodiesel de palma en un 20%, la potencia con biodiesel puro respecto a diesel fue del 3.5% mientras que la pérdida para la mezcla fue del 1% (Lin Y.C., 2006). Yücesu encontró que a plena carga y diferentes regímenes de inyección de diesel convencional y biodiesel puro de algodón, la pérdida de par y potencia con fue de 3% a 8% y el aumento en el consumo específico de combustible fue igualmente del 3% a 8% teniendo un 5% de diferencia de poder calorífico por unidad de masa del biodiesel con respecto al diesel convencional (Yücesu H.S., 2006).

Es clara la relación que tiene la variación de la potencia con el cambio de poder calorífico, sin embargo existen contradicciones en los resultados encontrados. En mezclas del 20% de biodiesel con diesel convencional se encontró una pérdida de potencia del 1 % a 5.2% y del 8% con biodiesel puro. En el mismo trabajo se encontró que para la misma mezcla del 20% de biodiesel la potencia fue igual a pesar de la disminución en el poder calorífico de la muestra. Para biodiesel de soya puro se encuentran pérdida de potencia del 2% a 7% en varias condiciones de carga y para plena carga y el mismo biocombustible, no hubo pérdida de potencia (Handbook of Biodiesel, 1999).

Los resultados descritos anteriormente pueden ser explicados con el adelanto de la combustión que tiene el biodiesel en el inicio de la combustión con respecto al diésel porque se mejora el rendimiento y la potencia obtenida. Retrasando el inicio de la combustión se genera pérdida de rendimiento y por consiguiente de la potencia como sucede en algunos motores en la actualidad. Por otro lado la viscosidad del biodiesel puede generar pérdida de la potencia desarrollada, especialmente en máxima entrega de combustible (Tat, 2003).

A continuación, se expone un marco general de algunos principales trabajos realizados por varios autores acerca del comportamiento de propiedades del biocombustibles y desempeño de mezclas de biocombustibles de Jatropha y diésel en diferentes porcentajes, en términos de propiedades de las mezclas y emisiones características.

Pramanik (2003) estudió el efecto de la temperatura en la viscosidad del aceite y del biodiesel de Jatropha Curcas, además del desempeño de estos en un motor de encendido por compresión. De la misma manera que Agarwal, encontró que la viscosidad del biocombustible disminuye significativamente con la adición de mayor cantidad de diésel en la mezcla,. Para mezclas de aceite de Jatropha/Diésel de 70:30 y de 60:40, encontró una disminución en la viscosidad entre el 50% y el 60%. Para emplear la mezcla de aceite de Jatropha diésel sin precalentamiento, se debe utilizar una mezcla 20:80 y 30:70 aproximadamente, dado que en estas condiciones los valores de viscosidad se acercan a los valores del diésel puro.

Elango estudió la combustión, desempeño y emisiones características de un motor diésel de un cilindro trabajado con biodiesel de Jatropha y mezclas con diésel mineral. Realizó ensayos con diferentes concentraciones de las mezclas y diferentes cargas. Las presiones pico de todas las mezclas trabajando a las mayores condiciones de carga son ligeramente menores obtenidas a las trabajadas con diésel puro. Encontró que hay retardo en el tiempo de encendido trabajando con el biocombustible, eso debido a la alta viscosidad y densidad del biodiesel de Jatropha. La máxima eficiencia térmica y el consumo específico mínimo de combustible se encontró para mezclas arriba e B20. El consumo específico mínimo de combustible, temperatura de gases de escape, opacidad y NOx fueron comparativamente altos. Sin embargo, hubo una apreciable disminución en los HC y CO₂ mientras que el decremento de CO es marginal. En términos generales, dedujo que las características de la combustión de las mezclas de biodiesel y diésel fueron cercanas a la línea base del diésel mineral.

Agarwal (2007), estudió los efectos que tiene la disminución de la viscosidad del aceite de Jatropha en mezclas con diesel mineral por medio del calentamiento con calor residual o con el calor de los gases de escape. Se tiene falta de adaptación del aceite de Jatropha. Teniendo en cuenta que los puntos de inflamación altos del aceite de Jatropha con respecto al diesel mineral, el aceite es seguro de manejar. Cercanos los 90°, la viscosidad del aceite de Jatropha estuvo muy cercana a la del diesel mineral, a los 100° la viscosidad del aceite es de aproximadamente 6 cSt mientras que la del biodiesel mineral a 40°C es de 2,44 cSt. Sin embargo para la óptima operación sería necesario precalentar el aceite para introducirlo al motor. Con respecto a las mezclas, la viscosidad del aceite de Jatropha disminuye considerablemente cuando se mezcla con el diesel mineral. Para la mezcla 30:70 la viscosidad fue de 5,35 cSt y para 20:80 fue de 4,19 cSt ambas a 40°C. Midió las emisiones, encontrando una baja cantidad de SOx, también la presencia de oxígeno en el combustible facilita la combustión y mejora las emisiones pero disminuye el poder calorífico, el cuál es del orden del 90% el del diésel mineral. El contenido de Nitrógeno del aceite de Jatropha afecta desfavorablemente las emisiones de NOx.

PK Sahoo (2009) realizó un estudio con diez mezclas de combustibles (diésel, B20, B50 y B100). Se produjo aceite de *Jatropha* no comestible (*Jatropha curcas*), de karanja (*Pongamia pinnata*) y de polanga (*Calophyllum inophyllum*) y se mezclaron con el diésel convencional obteniendo un contenido de azufre menor a 10 mg/kg. Se probaron para su uso como combustible sustituto de la un motor de tres cilindros refrigerado por agua en un tractor. Los datos de prueba se generan en la posición de máxima y parcial aceleración para diferentes velocidades del motor (1200, 1800 y 2200 rev / min). También analizó la variación de las emisiones de escape (Humo, CO,HC, NOx, y PM para determinar consumo de combustible óptimo a diferentes condiciones de funcionamiento. Se observó la potencia máxima en la mezcla de 50% *Jatropha* biodiesel y diésel con la carga nominal velocidad. Los BSFC para todas las mezclas aumentan con las mezclas y disminuyen con la velocidad. Hay una reducción en el humo de todo el biodiésel y sus mezclas cuando se compara con el diésel. La emisión de humo se reduce con mezclas y velocidades durante toda la prueba de desempeño.

2.3. Material particulado.

El material particulado (MP) es una mezcla de partículas suspendidas en la atmósfera que son el resultado de la unión de diversos componentes que dependen de su origen. Al ser emitidas experimentan reacciones químicas que varían con la proximidad a la fuente, el clima y otros factores. El MP se puede clasificar en distintas categorías como su origen, su fuente o sus propiedades fisicoquímicas, pero por practicidad se caracteriza comúnmente según su diámetro aerodinámico en dos grupos: MP10 y el MP2,5. (N. Rojas, 2005). El MP2,5 se refiere a partículas de tamaños inferiores a 2,5 μm en gramos de partículas por metro cúbico de aire ($\text{g}/\text{m}^3\text{aire}$) y son llamadas comúnmente partículas finas. El MP10 se refiere a partículas de tamaño menor a 10 μm y son llamadas partículas gruesas. Existen otras partículas ultrafinas que poseen diámetros inferiores a 0,1 μm o MP 0,1 (Englert, 2004).

Muestras de MP tomadas alrededor del mundo muestran que típicamente el MP posee compuestos químicos de alta toxicidad como Sulfatos derivados de la oxidación del dióxido de azufre de la atmósfera. Nitratos formados principalmente de la oxidación del dióxido de nitrógeno en la atmósfera. Debido a que el dióxido de Nitrógeno se oxida con mayor rapidez que el dióxido de sulfuro, se espera mayor presencia de sulfatos dentro del MP (Harrison, 2000). Sales de Amonio formadas a partir de la neutralización progresiva efectuada por el amonio atmosférico al ácido sulfúrico y nítrico presentes inicialmente en la atmósfera. Cloruros provenientes de aspersión oceánica en locaciones a miles de kilómetros de la costa durante los meses invernales. Además puede provenir de la neutralización por amonio de vapor de ácido clorhídrico emitido por evaporadores y centrales energéticas. El Carbono presente es el producto de la oxidación incompleta del combustible, y el Ácido Sulfúrico o los Sulfatos provienen del Azufre existente dentro de la composición del combustible operado en motores de combustión interna (Rojas., 2004).

El PM posee dos fases, una sólida y una semivolátil. La fracción sólida se compone por partículas como Carbono e Hidrógeno en tamaños de entre 20 a 50 nm (Rodríguez, 2010). La fase volátil está compuesta a su vez por una fracción orgánica soluble que abarca principalmente los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos que contienen Oxígeno, Nitrógeno y Sulfuros. La formación de esta fracción depende directamente del diseño del motor y sus condiciones de operación. La fase volátil también puede estar compuesta por una fracción de Sulfuros que depende principalmente del contenido de Azufre presente en el combustible (Kittelson, 1997).

2.4. Efectos del combustible en la generación de material particulado.

El combustible es uno de los factores determinantes en la formación de MP, sus propiedades determinan las características del proceso de pirólisis, combustión y todas las interacciones entre el combustible y el aire en condiciones específicas dentro de la cámara de combustión.

Parámetros como los tiempos de reacción, velocidad de combustión laminar y turbulenta, la energía liberada durante la combustión, la tasa de liberación de calor, las especies químicas involucradas, entre otros, se asocian a las propiedades como la composición del combustible empleado y el comburente, su poder calorífico, etc (Hernández J. , 2006). La calidad de la combustión depende principalmente de las características de la inyección del combustible, de las características de mezclado entre el combustible y el aire, y de la presencia de combustible y aceite lubricante en las paredes de la cámara de combustión y los asientos de las válvulas de aire. La formación de material particulado en estas zonas es complejo, estructuras de Fullerenos son formadas por reacciones de pirolisis que forman Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos los cuales promueven la formación de partículas esféricas con diámetros entre 10 y 70 nm (Rodríguez, 2010). Estas partículas a su vez se aglomeran entre sí para formar partículas alargadas y ramificadas. Sobre estas partículas compuestos semivolátiles tales como compuestos orgánicos solubles, Sulfatos y Nitratos asociados con agua se condensan al enfriarse los gases de combustión. Incluso nuevas nanopartículas, del orden de 10nm, forman nuevos núcleos líquidos de Ácido Sulfúrico y Sulfatos sobre los cuales se condensan los compuestos semivolátiles durante el enfriamiento (K. Muralidharan, 2011).

2.5. Extracción aceite de *Jatropha*

La extracción se realiza principalmente por tres métodos: por solventes, por prensado mecánico, por extracción enzimática. Las semillas de *Jatropha curcas* L. se tratan físicamente para obtener semillas de menor tamaño libres de cáscara. Las semillas se someten a un proceso de extracción química en un equipo Soxhlet empleando diferentes solventes. Se maximiza la cantidad de aceite extraído mediante el cambio de solvente, el tamaño de partícula y el tiempo de extracción, factores que afectan directamente la eficiencia de extracción del aceite (Yate, 2013). El solvente generalmente es el hexano, que al condensarse arrastra consigo el aceite contenido en la semilla inicial. La mezcla aceite-solvente obtenida se purifica mediante una destilación simple. Se encuentra que el solvente óptimo es el hexano con un rendimiento en la extracción del aceite del 91% para un tamaño de partícula de 0.5 mm [Giraldo, 2010]. La cinética de la extracción muestra que el tiempo óptimo de contacto es de alrededor de 80 minutos (Yate, 2013).

Para la extracción por prensado mecánico, se realiza en máquinas diseñadas especialmente para lograr la trituración de las semillas y su compresión, generalmente con un tornillo sin fin. Se hace un calentamiento previo a la máquina lo cual facilita la extracción del aceite, por el aumento de la fluidez del mismo (Sayyar S, 2009).

Se encuentra que la extracción del aceite de *Jatropha* realizado por solventes tiene una mayor eficiencia que la extracción por prensado mecánico, esto probablemente debido a las pérdidas que el segundo método implica, como la dificultad en la recolección del 100% del aceite prensado en el tornillo y el aceite perdido en la torta que se obtiene producto del proceso (Castillo, Velasquez, & Cuartas., 2011).

Un estudio realizado con obtención del aceite de *Jatropha Curcas* por solventes teniendo en cuenta cinco parámetros como el tipo de solvente, temperatura, relación semilla-solvente, tiempo de residencia y tamaño de partícula demostró que en la mayoría de los casos, a mayor tamaño se tuvo mayor calidad de extracción debido a la interrelación superficial que experimentan el líquido y el sólido. Además sus autores encontraron que las condiciones óptimas de extracción se obtuvieron a las 8 h con temperatura de alrededor de 68 ° C, tamaño de partícula grueso (0,5-0,75 mm), relación de disolvente a sólido de 6:1 y hexano como solvente, que tiene una viscosidad baja permitiéndole mejor fluidez. La cinética de la extracción se ajusta bien al modelo de segundo orden y la extracción de semillas de *Jatropha* fue un proceso endotérmico. El hexano tendió a ser el mejor disolvente para el proceso en comparación con éter de petróleo y el etanol (Sayyar S, 2009).

Se ha encontrado que el grado de agitación del solvente favorece la transferencia de materia del solvente con el área superficial, lo cual mejora el rendimiento de la extracción [Atabani, 2012].

La extracción de aceite por método mecánico se evalúa teniendo en cuenta variables físicas del dispositivo de extracción como la velocidad de giro del tornillo sin fin, el diámetro del tornillo, el tamaño de las boquillas de salida de la torta y la temperatura de calentamiento. Generalmente, a mayor velocidad de rotación del tornillo, la extracción del aceite disminuye, en cualquier combinación de los demás parámetros [S. Karaj, 2011].

2.6. Producción del biodiesel de Jatropha

La producción del biodiesel de Jatropha Curcas se realiza mediante el proceso de transesterificación que es la reacción de un triglicérido (grasa / aceite) con un alcohol para formar ésteres y glicerol. Un triglicérido tiene una molécula de glicerina como su base con tres ácidos grasos de cadena larga unidos. Las características de la grasa se determinan por la naturaleza de los ácidos grasos unidos a la glicerina. La naturaleza de los ácidos grasos a su vez puede afectar a las características del biodiesel. Durante el proceso de esterificación, el triglicérido se hace reaccionar con el alcohol en presencia de un catalizador, por lo general un fuerte alcalino como hidróxido de sodio. El alcohol reacciona con los ácidos grasos para formar el éster de mono-alquilo, o biodiesel y glicerol en bruto. En la mayoría de la producción, el metanol o etanol es el alcohol usado (metanol produce ésteres de metilo, etanol produce ésteres etílicos) y es catalizada por cualquiera de las bases de potasio o hidróxido de sodio. El hidróxido de potasio ha presentado las mejores condiciones para la producción de biodiesel [Shweta, 2004].

En Colombia el biodiesel se obtiene principalmente a partir de aceite de palma pero se ha visto que el uso en el país de aceite de semilla de Jatropha es promisorio debido a la facilidad que representa el cultivo de esta planta en zonas con suelos semidesérticos o degradados. El biodiesel de aceite de Jatropha, debido a un mayor contenido de ácidos grasos insaturados, permite obtener un biodiesel con mejor comportamiento en condiciones de baja temperatura frente al obtenido de aceite de palma, pero esta característica, hace que este biodiesel sea menos estable y se degrade más rápido que el biodiesel de palma [Sierra, 2012].

El biodiesel, para ser empleado como combustible en motores diésel en Colombia, debe cumplir con todas las características y requerimientos de calidad establecidos en la norma NTC 5444. Teniendo en cuenta que en el plan colombiano de desarrollo estratégico apunta al impulso de biocombustibles como el biodiesel de palma y otras oleaginosas para exportación a otros países, es indispensable que los procesos de producción y almacenamiento cumplan los requerimientos mínimos de calidad establecidos por dicha norma. Son de especial atención características tales como viscosidad, contenido de glicerina libre, densidad, mono, di y triglicéridos, así como el CFPP (punto de taponamiento en frío), el punto de nube (PN), punto de fluidez (PF) y estabilidad oxidativa. Las tres últimas características son básicas para el buen desempeño del biocombustible a

bajas temperaturas y para posibilitar el almacenamiento y transporte del mismo por tiempos prolongados (SARIN y otros; 2007)

De estudios realizados de biodiesel de *Jatropha* se encuentra que a diferentes condiciones en el proceso de transesterificación, el biodiesel de *Jatropha* cumple con las normas internacionales exigidas para su uso en motores, tal es el caso de un estudio realizado en Perú donde se concluyó que de una combinación de 65°C de temperatura y un tiempo 55 minutos, se obtiene esteres metílicos de calidad, pues al comparar las propiedades del biodiesel obtenido con las especificaciones técnicas ASTM D6751 – 07, EN 14214 y NTP 321.003 2005, se determine que el punto de inflamación: 168,0 °C, gravedad API a 15,5°C: 36.76, viscosidad cinemática a 40°C: 4,91 mm²/s, densidad a 15°C: 0,846 g/mL agua y sedimentos < 0,04 % volumen, índice de cetano: 49,61, cenizas: < 0,01 % peso, residuo carbonoso: < 0,05% peso, índice de acidez: 0,559 mg KOH/g, glicerina libre: 0,011 % peso y glicerina total: 0,212 % peso, cumplen con lo establecido en dichas normas [Del Águila, 2011].

3. Descripción experimental

Es de gran importancia aclarar que esta investigación se realizó dentro del marco del proyecto *Investigación tecnológica del uso de aceite de jatropha curcas como combustible alternativo para uso en motores encendidos por compresión en Carbones del cerrejón*, un convenio entre Carbones del Cerejón y Colciencias, quienes financiaron toda la parte experimental descrita a continuación.

En este capítulo se describe el desarrollo de las actividades que se llevaron a cabo para la realización de los ensayos de biocombustibles de Jatropha y mezclas en un Motor de combustión interna encendido por compresión. El proceso de extracción de aceite de Jatropha y caracterización se desarrolló en conjunto con el proyecto “Evaluación del proceso de extracción del aceite de Jatropha curcas L. para la producción de biodiésel” (Yate, 2013) que también hizo parte del proyecto de investigación mencionado anteriormente. El proceso experimental se llevó a cabo en varias etapas listadas a continuación:

1. Extracción aceite de Jatropha
2. Caracterización del aceite de Jatropha
3. Producción del biodiesel de Jatropha
4. Caracterización del biodiesel de Jatropha
5. Puesta a punto Motor de combustión interna encendido por compresión
6. Realización de ensayos a biocombustibles de Jatropha y mezclas con diésel mineral

3.1. Producción del aceite de Jatropha

El aceite de Jatropha empleado en este trabajo fue obtenido en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia. La primera etapa se centró en la producción y preparación de los biocombustibles de Jatropha para la

experimentación en laboratorio. Inicialmente se trabajó con semilla de *Jatropha* sin ningún tratamiento. Las semillas fueron sometidas a una limpieza de impurezas propias del proceso de cosecha y almacenamiento tales como hojas, piedras, arena y maderas dentro de un tamiz vibratorio. Luego del proceso de limpieza se procedió a realizar el descascarado debido a que las cáscaras tienen propiedades abrasivas y no tienen contenido de aceite.

En varios casos, cuando la semilla es procesada en máquinas extractoras, la cáscara se convierte en una pasta que se adhiere al tornillo y camisa de extracción impidiendo su flujo en el interior. Las semillas deben ser precalentadas para desprender con facilidad la cáscara y fomentar la ruptura de las células que contienen el aceite facilitando su extracción.

3.1.1. Extracción mecánica

El proceso de extracción del aceite se realizó en una máquina Expeller tipo cilindro, nacional de Marca INDUCAM, referencia LBC1. Su funcionamiento es a través del accionamiento de un tornillo sin fin a través de un motor eléctrico de 2,2 Kw. El tornillo sin fin tiene un cilindro de extracción perforado, la cual permite que con el arrastre proporcionado por el tornillo a las semillas, se acumulen en una estrella de acero inoxidable en la parte final del cilindro proporcionándoles determinada presión. Además, al ir acompañada de una temperatura proporcionada por una resistencia eléctrica ubicada al exterior de la camisa, las semillas son estranguladas y se permite la extracción de su aceite. Para alimentar el tornillo sin fin, la máquina posee una tolva con capacidad de 12 kg/h.

La temperatura de calentamiento de la zona de extracción se controló mediante un controlador TE4 (Autonics, Korea), y se adaptó un variador de frecuencia YASKAWA AC Drive J1000 (Yaskawa American, USA) para controlar la velocidad rotacional del motor, temperatura de calentamiento y corriente.

Las dimensiones del tornillo sin fin y el cilindro de extracción se observan en la siguiente tabla:

| Tornillo Sin Fin | Valor (mm) |
|-------------------------|-------------------|
| Diámetro | 400 |
| Largo | 500 |
| Profundidad de cresta | 7,42 |
| Grosor de cresta | 5 |
| Distancia entre crestas | 15 |

| | |
|-------------------------------|------|
| Largo | 60 |
| Diámetro perforaciones | 2,36 |
| Distancia entre perforaciones | 7,8 |

Tabla 1. Propiedades de maquina extractora de aceite de *Jatropha*. Fuente: elaboración propia

Para el control de la cantidad de aceite en peso y el peso de la torta obtenida se emplearon balanzas JAVAR JAV-SP (Javar, Colombia) con resolución de 1 g y Scout Pro (Ohaus Corporation, Pine Brook, USA) con resolución de 0,1 g, respectivamente.

Para este proyecto se trabajaron temperaturas de calentamiento de 50°C, 70°C y 90°C. Esas temperaturas se emplearon debido a que altas temperaturas aumentan el rendimiento del aceite pero también aumentan la cantidad de fosfolípidos presentes (Savoire, 2013). La velocidad angular del tornillo fue de 40 rpm, 50 rpm y 60 rpm. Este parámetro influye directamente en la presión y temperatura dentro del barril de extracción, por lo cual dependiendo del tipo de semilla empleada, el rendimiento de extracción de aceite varía de una velocidad a otra (Savoire, 2013).

Las condiciones de extracción óptimas en las condiciones empleadas se establecieron en: 40 rpm, 90°C y se empleó una boquilla de salida de la torta de 11 mm de diámetro, esta combinación de variables fue hallada como un óptimo de rendimiento según (Yate, 2013).

3.2. Caracterización del aceite de *Jatropha*

La calidad del aceite de *Jatropha* depende de las características de la semilla empleada, y del método de extracción y filtrado antes de su uso para garantizar el buen desempeño del motor. A continuación se presenta una tabla que describe la propiedad medida, valores obtenidos, normas y equipos empleados.

Se realizaron diversos ensayos que permiten dar una idea de la calidad del biocombustible con el que se trabajará y del cual se obtuvo el biodiesel de *Jatropha*.

| Propiedad | Unidades | Valor | Norma empleada | Norma DIN V51605 | Equipo empleado |
|---|-------------------|-------|----------------|------------------|---|
| Contenido de humedad | % | 0.002 | ASTM D4377 | 0.075 max | Rotoevaporador IKA HB10 (IKA Werke GmbH & Co. KG, Alemania), titulador potenciométrico de marca METTLER TOLEDO T50 equipado con un electrodo D143. 60°C, 17 plg de Hg de vacío y 50 rpm, durante una hora |
| Poder calorífico | kJ/kg | | ASTM D240 | 36 min | Calorímetro de combustión IKA C2000 (IKA Werke GmbH & Co. KG, Alemania), Oxígeno extra-seco grado 2.7 (Indura) como gas de combustión a 25 atm de presión, 25 °C y un baño termostatado JULABO 12 |
| Punto de inflamación | °C | 275 | ASTM D92 | 220 min | PETROTEST CLA4 (Alemania), temperatura máx. 400 °C |
| Valor ácido | mg KOH/g | 1.794 | ASTM D664 | 2 max | Titulador potenciométrico marca METTLER TOLEDO T50 equipado con un electrodo D113 (Buchs, Suiza). |
| Densidad en función de la temperatura @15°C | Kg/m ³ | 913 | – | 900-930 | Densímetro digital Densito METTLER TOLEDO 30PX (Mettler Toledo, Japón). Densímetro digital Densito METTLER TOLEDO 30PX (Mettler Toledo, Japón). Termómetro digital HANNA con precisión de ±1°C, equipado con una termocupla tipo K. |
| Viscosidad en función de la temperatura | Ver figura 4 | | – | | Reómetro rotacional C-VOR Bohlin Instruments (Malvern, Inglaterra). De 0 °C a 100 °C a una velocidad de deformación de 10/s y velocidad de calentamiento de 5 °C/min |

Tabla 2. Propiedades del aceite de *Jatropha*. Fuente: elaboración propia

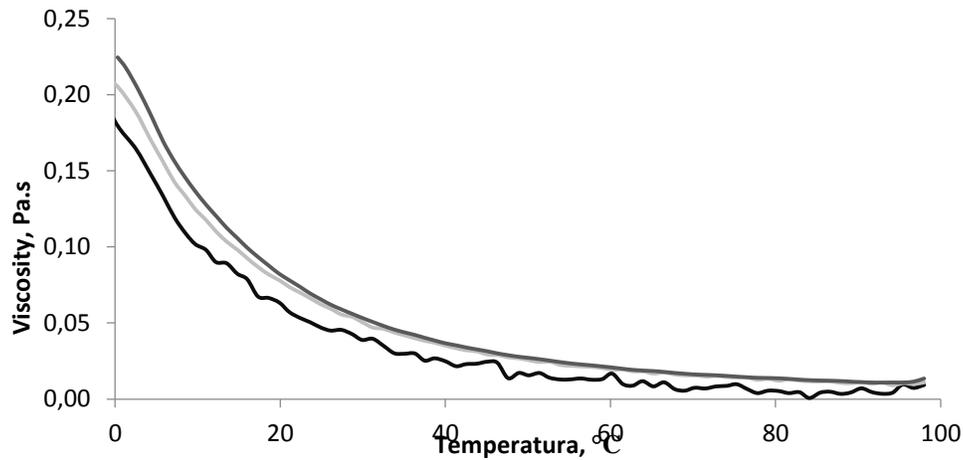


Figura 4. Viscosidad del aceite en función de la temperatura a tres velocidades de deformación

3.3. Producción del biodiésel de Jatropha en laboratorio

Para realizar la producción del biodiesel de Jatropha se facilitó el aceite de Jatropha obtenido en la extracción mecánica al grupo de Biodiesel y Oleoquímica del año 2015 del departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia. Este grupo desarrolló un documento donde incluye la metodología y análisis llevado a cabo hasta la obtención del biodiesel de Jatropha, titulado "Producción de biodiesel a partir del aceite de jatropha (Oleoquímica, 2015). El proceso requirió de dos etapas y se trabajó en un reactor de película descendente. Para la primera etapa se empleó una solución de metóxido (NaOH y metanol) y metanol en exceso para la segunda. (Oleoquímica, 2015).

Como resultado de estas reacciones, se obtuvo un biodiesel con alto contenido de jabones, lo cual requirió un proceso de purificación que se realizó por medio de adsorción de Trysil que se mantuvo en un constante etapa de agitación manual para favorecer el proceso de adsorción y posteriormente, se separó el adsorbente en un autoclave de manera continua quedando retenido en un papel filtro ubicado a la salida del fluido (Oleoquímica, 2015).

3.4. Caracterización del biodiesel de Jatropha

Una vez purificado el biodiesel se procedió a caracterizarlo. Los ensayos realizados al biodiesel obtenido fueron curva de destilación, contenido de humedad, viscosidad cinemática, valor ácido y densidad.

Los resultados obtenidos son mostrados en la tabla 3:

| Propiedad | Unidades | Valor | Norma DIN V51605 |
|---|-------------------|-------|------------------|
| Curva de destilación | 0°C | 325,5 | ASTM D 86 |
| | 50°C | 332,7 | |
| | 100°C | 289,7 | |
| Contenido de humedad | %p/p | 0,167 | ASTM E 203-01 |
| Viscosidad cinemática | cSt | 7,332 | ASTM D445 |
| Valor ácido | mg KOH/g | 3 | NTC 5444 |
| Densidad en función de la temperatura @15°C | Kg/m ³ | 889,7 | NTC 5445 |

Tabla 3. Propiedades del biodiesel de Jatropha obtenidas – Grupo Biodiesel y Oleoquímica, 2015. Fuente: elaboración propia

El perfil de ácidos grasos del biodiesel de Jatropha empleado en este trabajo se toma del trabajo realizado por Yate (Yate, 2013) debido a que los datos experimentales obtenidos por el grupo Oleoquímica (Oleoquímica, 2015) resultaron en un valor ácido alto, lo cual indica que el aceite debía tener un previo refinamiento que no se realizó debido a limitaciones técnicas.

| Compuesto | % Porcentaje en masa (wt%) |
|--------------------|----------------------------|
| Metil Lauritato | 0,06 |
| Metil Miristato | 0,1 |
| Metil Palmitato | 14,96 |
| Metil Palmitoleato | 1,1 |
| Metil Estearato | 3,85 |
| Metil Oleato | 32,49 |
| Metil Linoleato | 47,43 |

Tabla 4. Composición del biodiesel de Jatropha. Fuente: (Yate, 2013)

Como se observa en la tabla 4, los principales componentes del biodiesel de Jatropha por su porcentaje en masa son el Metil Linoleato, Metil Oleato y Metil Palmitato. Los demás componentes se consideran despreciables para efectos de este trabajo.

3.5. Motor de combustión interna encendido por compresión

Para la evaluación del efecto sobre las emisiones de material particulado de los diferentes tipos de combustibles se usó un motor encendido por compresión de tres cilindros, acoplado a un freno hidráulico de velocidad variable. En ellos se medía la potencia en el eje de salida del motor mediante el uso de un medidor electrónico de torque acoplado a un sistema de adquisición de datos National Instruments. El esquema del montaje se observa en la figura 5.

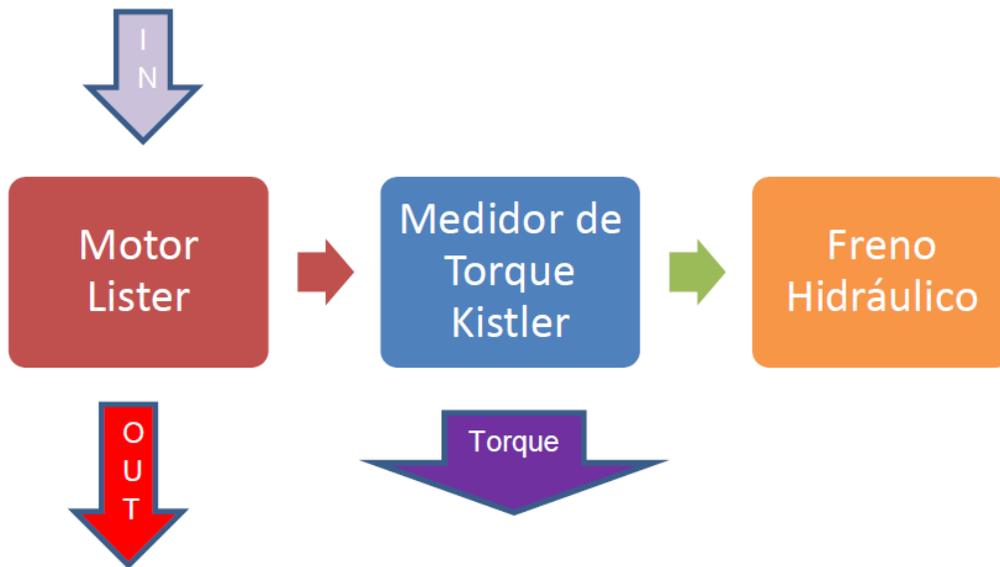


Figura 5. Esquema operativo del montaje experimental. IN: Variables de entrada, flujo combustible, flujo aire Out: Variables Salida: Temp escape, Concentración PM, Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Fotografía del motor empleado: Lister Petter LPW3. Fuente: [http://www.motor de combustión interna encendido por compresión-petter.com/documents/product/en-08377-LPW3-G-Build-TDS.pdf](http://www.motor-de-combustion-interna-encendido-por-compresion-petter.com/documents/product/en-08377-LPW3-G-Build-TDS.pdf)

| | |
|-------------------------|------------------------------------|
| Tipo de motor | 3 Cilindros - Refrigerado por agua |
| Admisión | Motor de Aspiración Natural |
| Desplazamiento | 1.39 l |
| Diámetro X Carrera | 86 x 80 mm |
| Relación de Compresión | 18.5 : 1 |
| Refrigeración | Por Agua |
| Potencia | 16 kW a 2500 RPM |
| Velocidad giro cigüeñal | 1500- 2500 [RPM] |

Tabla 5. Especificaciones del motor de combustión interna encendido por compresión Petter LPW3. Fuente: [http://www.motor de combustión interna encendido por compresión-petter.com/documents/product/en-08377-LPW3-G-Build-TDS.pdf](http://www.motor-de-combustion-interna-encendido-por-compresion-petter.com/documents/product/en-08377-LPW3-G-Build-TDS.pdf)

Este motor Lister, estaba acoplado a un generador eléctrico conformado una unidad de generación o planta eléctrica. Debido a que el generador opera en un rango de velocidad específico, y que a razón de la configuración de los polos del mismo, solo permite la generación de corriente eléctrica en dicho rango de velocidad reducido (inferior a 350 rpm) se retiró el mismo y se instaló un freno hidráulico de velocidad variable, que permite operar el motor en diversos rangos de velocidad. Aun así, y aunque el diseño del motor permite su operación desde las 1500 a 3000 rpm, la configuración del sistema de inyección y control de paso de combustible permaneció inalterado, razón por la cual, se limitaba el rango de operación del motor respecto a la capacidad de diseño original del mismo.

Las características del freno hidráulico utilizado son:

- Freno de absorción de energía mediante dispersión hidráulica de energía
- Rango de operación 1000- 7500 rpm

- Transductor de torque: celdas gemelas de medición en ambos sentidos, calibración y ajuste de sensibilidad según la aplicación.
- Sensor de velocidad de 60 pulsos por revolución
- Rango de torque: 10- 400 Nm

Medidor de torque Kistler usado en las pruebas experimentales:

| | |
|------------------------|-----------------------|
| Marca | Kistler |
| Modelo | 4520A |
| Principio de operación | Strain gage principle |
| Rango de medición | 1 ... 1000 (N-m) |

Tabla 6. Propiedades del medidor de torque empleado. Fuente: elaboración propia

Sistemas de medición de Material particulado usados:

Para evaluar el desempeño del motor en sus diferentes condiciones de operación desde el punto de vista de impacto medio ambiental, se utilizaron los siguientes equipos.

| Equipo | Descripción | Características |
|----------------|---|--|
| Dekati Elpi+ | Medidor de material particulado. Permite conocer la concentración de partículas en la muestra en tamaño de 0 a 10 micras. Posee la capacidad de medir en 14 tamaños de partícula para así conocer la distribución de las concentraciones para los diferentes tamaños. | Rango medición 0 10 micras 14 rangos de medición por tamaño Muestreo 10 LPM |
| Dekati FPS4000 | Sistema de muestreo de partículas ultrafinas. Sistema de muestreo y dilución que garantiza las condiciones de temperatura y concentración de la muestra. Ideal para el muestreo de material particulado y para reducir la concentración en aquellos casos en que sea necesario con el fin de evitar la afectación de equipos de medición y muestreo por saturación de sensores y la condensación de agua. | Dilución hasta 200:1 Dos etapas de dilución Control de temperatura de muestra y aire de dilución Ajuste de relación de dilución automático Temperatura de muestreo hasta 300°C |

| | | |
|-------------------------|---|--|
| Testo Nanomet NM3 | Medidor de material particulado marca Testo modelo Nanomet3. Equipo de conteo de nanopartículas. Permite conocer la concentración de la muestra y el diámetro promedio de las partículas. | Rango de muestreo de 30 a 700 NM Estimación de diámetro promedio Remoción de compuestos volátiles Dilución de 30:1 o 200:1 (Cachon & Imhof, 2013) |
|-------------------------|---|--|

Tabla 7 Descripción de equipos de medición empleados. Fuente: elaboración propia

3.6. Matriz de ensayos a biocombustibles de Jatropha y mezclas con diésel mineral

Para la evaluación de las diferentes mezclas de combustibles se procedió a determinar una línea base de operación del motor con combustible diésel 100% de origen fósil. Posterior a ello, se determinan condiciones de carga y velocidad en las cuales el motor operaba de manera uniforme y estable para todos los tipos de combustible.

3.6.1. Determinación de condiciones de carga

Para determinar las condiciones de carga en las cuales se evalúan los diferentes combustibles usados en esta investigación, se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Rango de velocidades de giro del motor
- Capacidad de ajuste fijo de la inyección del motor para condiciones específicas.
- Capacidad de repetir condiciones con todos los combustibles y con reducida dispersión.
- Similitud con las condiciones de los escenarios de modelación.

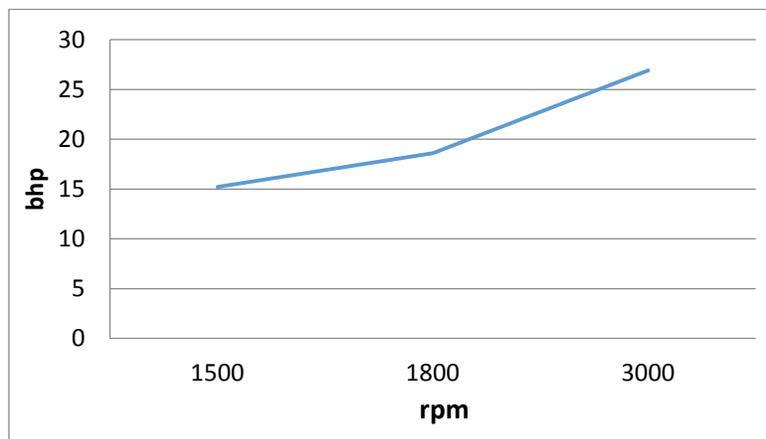
Teniendo en cuenta estos parámetros se realizó el siguiente proceso de evaluación y determinación de condiciones de evaluación.

1. Determinar la curva característica del motor con el combustible de referencia.

2. Evidenciar la capacidad de ajuste del sistema de inyección del motor y reacción del freno a los cambios de carga aplicada.
3. Determinar curvas características del motor con cada combustible a evaluar.
4. Seleccionar los rangos de carga y de velocidad de rotación del motor para la matriz experimental

A partir de la curva característica del motor, se encuentran las condiciones de referencia para el combustible base, diésel 100% origen fósil.

La curva de potencia general del motor se obtuvo de acuerdo a los datos de la ficha técnica de fábrica del motor y se muestra en la figura 6a.



Aunque estos valores aplican para la configuración del motor con bomba y gobernador de velocidad variable y la configuración empleada en los ensayos tenía bomba de gobernador fijo a 1800rpm, se asumió como la curva a emplear.

Con la curva de potencia en cada combustible, se determina la capacidad de carga que puede obtenerse en el motor para cada uno de los mismos, y la diferencia entre cada combustible y el combustible base o de referencia. Para tener una evaluación adecuada, se deben elegir valores de carga en Nm que se puedan obtener con todos los combustibles en cada determinada condición de velocidad de giro y relación de aire combustible.

Es así como, para una velocidad determinada, el combustible de referencia puede generar un torque de, por ejemplo 100 unidades. Mientras que otros dos combustibles A y B, generan un torque de 80 y 50 unidades, respectivamente. En este caso, la evaluación debe realizarse en la condición de torque en la que los tres combustibles pueden operar, la condición de 50 unidades.

Producto de este análisis, y en base a los ejercicios de ajuste, calibración y puesta a punto del experimento realizado por García (García, 2016) se determinó la siguiente

matriz experimental. No se realizaron réplicas de los ensayos debido a que la disponibilidad de los biocombustibles era muy limitada.

| velocidad [RPM] | Estado de carga [%] | Combustible |
|-----------------|---------------------|-------------|
| 2500 | 50 | Diésel |
| | | JB3 |
| | | JB5 |
| | | JB7 |
| | 25 | Diésel |
| | | JB3 |
| | | JB5 |
| | | JB7 |
| 2000 | 50 | Diésel |
| | | JB3 |
| | | JB5 |
| | | JB7 |
| | 25 | Diésel |
| | | JB3 |
| | | JB5 |
| | | JB7 |
| 1900 | 50 | Diésel |
| | | JB3 |
| | | JB5 |
| | | JB7 |
| | 25 | Diésel |
| | | JB3 |
| | | JB5 |
| | | JB7 |

Tabla 8. Matriz de ensayos. Fuente: elaboración propia

Las velocidades de rotación del motor fueron escogidas tomando como referencia la curva de potencia del motor obtenida para las condiciones ambientales de la prueba operando con combustible diésel. En ellas se encontró que el punto de operación de mayor torque se encontraba a las 1900 rpm. Por otro lado el torque tenía un perfil plano hasta las 2200 rpm para posteriormente decrecer. El punto de máxima potencia se presenta a 2500 rpm. Para permitir una operación del motor con los diferentes combustibles y en función de la diferente densidad energética de los mismos, no se operó en el rango de mayor carga. Así mismo en los rangos de 50% y 25% de carga el motor operaba con menor dispersión en los datos respecto a las condiciones de mayor carga.

Los rangos de 50% y 25% de carga son referenciados a la carga máxima generada por el motor. Este valor de carga máxima. En cada prueba realizada a cada combustible el motor se evaluaba a la velocidad y valor de carga (torque) de referencia.

Las condiciones ambientales de las pruebas realizadas se consignan a continuación:

| | |
|-----------------------------|---|
| Temperatura Ambiente | 14-22 Celsius |
| Humedad Relativa | 68-83% |
| Presión Atmosférica | 765 mbar |
| Condiciones del Laboratorio | Edificio cerrado, 1100 m ² , altura 8 m. |

Tabla 9. Condiciones ambientales durante las pruebas con el motor Briggs and Stratton.

Fuente: elaboración propia

3.7. Modelo de formación de Material particulado y combustión

Diversos autores han estudiado el mecanismo de formación de material particulado producido por motores de combustión interna operados con combustibles derivados del petróleo o biocombustibles. Se han encontrado con el uso de combustibles de origen vegetal como aceite de semilla de algodón, aceite de soya, metil éster de aceite de colza, metil éster de aceite de palma, buen desempeño de motores con reducción de emisiones, reducción de hidrocarburos, emisiones de CO e incremento en emisiones de NO_x (K. Muralidharan, 2011). El comportamiento de los parámetros descritos tiene una directa relación en la interacción entre combustible y comburente, la cual sirve como dato de entrada para algunos modelos existentes de predicción de formación de material particulado a partir de propiedades como concentración molar, cantidad de masa, densidad de masa y número de partículas. El modelo descrito a continuación y desarrollado por (Rodríguez, 2010) es un modelo diseñado para trabajar con datos de entrada como la temperatura de la cámara de combustión, concentraciones iniciales de los combustibles, relación de aire-combustible rica (carga 50%)s o pobres y parámetros matemáticas tales como intervalos de integración, tiempo de simulación, paso temporal y tiempo de cálculo computacional. El tipo de reactor considerado en el modelo es de tipo PFR (reactor de flujo tapón) (Rodríguez, 2010).

3.7.1. Modelo para MP - Biodiesel

El modelo desarrollado por Rodríguez (Rodríguez, 2010) corresponde a un modelo multietapas que describe el fenómeno de formación de MP incluyendo cuatro fases y se esquematiza a continuación:

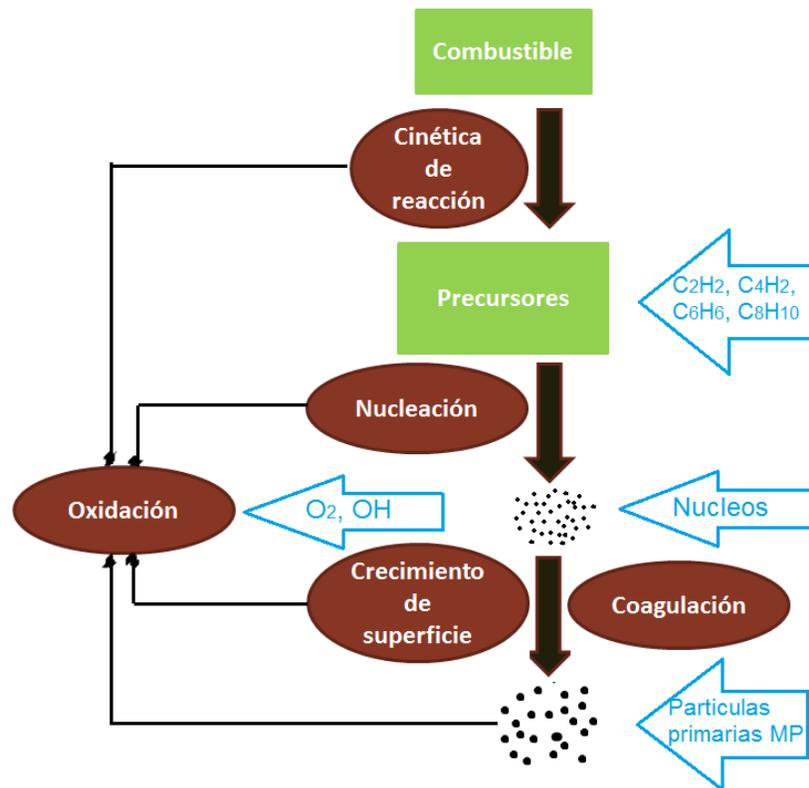


Figura 7. Esquema del modelo multietapas seleccionado

El modelo dentro de sus fases contempla los principales precursores de formación de MP:

Nucleación

Crecimiento de superficie

Oxidación

Coagulación

Precursores - Nucleación

Las especies químicas llamadas precursores son las responsables de la formación de material particulado. Los precursores más comunes son: los compuestos aromáticos, alifáticos insaturados, acetilenos y poliacetilenos (Hernández J. , 2006).

De acuerdo con diversos autores hay dos tipos de mecanismos de formación de material particulado:

- Formación por Acetileno: El acetileno que es considerado uno de los más importantes precursores, es formado principalmente en la fase de la llama, que posteriormente genera la formación incipiente de los primeros anillos de benceno (Selvaraj, 2015). Estas moléculas son producto de la polimerización rápida del vapor sobresaturado de moléculas de poliiña (Krestini, 1997).
- Formación por HAP, debido a su alto peso molecular, las moléculas de HAP tienden a coagularse (Marinov, 1997). El crecimiento de la masa de las partículas es un efecto combinado de las reacciones químicas de precursores gaseosos con dicha condensación de HAPs, sin embargo, esta condensación se refleja en la distribución final del tamaño del MP y no en su masa total (Kennedy, 1997).

Las especies precursoras consideradas en este modelo son (Rodriguez, 2010): Acetileno, Diacetileno, Benceno y Naftaleno, esto debido a que en consideración de otras especies químicas precursoras se genera inestabilidad y posteriores errores numéricos en el modelo planteado.

Los submodelos para nucleación mostrados en la tabla 10 se plantean partiendo de los cuatro precursores principales y describen las tasas de nucleación para cada uno según modelos encontrados en diversas referencias (Lindstedt, 2005) (Tao, 2004) (Leung, 1991). Estos se describen a continuación:

| | Precursor | Reacción de formación de MP | Tasa de nucleación | Tasa global de nucleación | Referencia |
|-------------------|---|--------------------------------------|---|---|---------------------------|
| Nucleación | Acetileno C ₂ H ₂ | $C_2H_2 \rightarrow 2MP + H_2$ | $\dot{w} = 0,63 \times 10^{-4} e^{\left(\frac{-21,100}{T}\right)} [C_2H_2]$ | $\dot{W} = 0,63 \times 10^{-4} e^{\left(\frac{-21,100}{T}\right)} [C_2H_2]$ + $4 \times 10^7 e^{\left(\frac{-2500}{T}\right)} [C_4H_2] +$ $1,25 \times 10^4 e^{\left(\frac{-21,100}{T}\right)} [C_6H_6] +$ | Lindstedt, Leung |
| | Diacetileno C ₄ H ₂ | $C_4H_2 \rightarrow 4MP + H_2$ | $\dot{w} = 4 \times 10^7 e^{\left(\frac{-2500}{T}\right)} [C_4H_2]$ | | Lindstedt, Tao |
| | Benceno C ₆ H ₆ | $C_6H_6 \rightarrow 6MP + 3H_2$ | $\dot{w} = 1,25 \times 10^4 e^{\left(\frac{-21,100}{T}\right)} [C_6H_6]$ | | Tao |
| | Naftaleno C ₈ H ₁₀ | $C_8H_{10} \rightarrow 10CMP + 4H_2$ | $\dot{w} = 10 \times 10^7 e^{\left(\frac{-2500}{T}\right)} [C_8H_{10}]$ | | Tao, Leung, Lindstedt, |

Tabla 10: Modelos de nucleación para los principales precursores de formación de MP

En donde \dot{w} corresponde a la tasa de nucleación, \dot{W} es la tasa de nucleación global, MP corresponde a un kmol/m³ y la tasa de nucleación se plantea de primer orden respecto a la concentración molar de cada precursor. Todos los modelos consideran la formación inicial de partículas de 1nm de diámetro (Rodriguez, 2010).

Crecimiento de superficie

Rodríguez emplea el modelo de sitios activos planteado por Frenklach (Frenklach, 1990), donde actúan dos tipos de especies químicas:

- Especie de crecimiento: Acetileno C_2H_2
- Especies de oxidación: O_2 , Radical Hidróxido OH , Hidrógeno H_2 , Radical Hidrógeno H y radical Oxígeno O .

El crecimiento es dado por la adición de una molécula de Acetileno a un sitio de la superficie de la partícula (armchair). Las reacciones de superficie presentes son descritas en la tabla 11:

| | |
|---|---|
| 1 | $MP_{-H} + H \leftrightarrow MP^\bullet + H_2$ |
| 2 | $MP_{-H} + OH \leftrightarrow MP^\bullet + H_2O$ |
| 3 | $MP^\bullet + H \leftrightarrow MP_{-H}$ |
| 4 | $MP^\bullet + C_2H_2 \leftrightarrow MP_{+2} - H + H$ |

Tabla 11. Reacciones de superficie

De la tabla anterior, se tiene que $MP - H$ es el sitio activo en la superficie de las partículas y MP^\bullet corresponde a un sitio radical. También con las ecuaciones anteriores se plantea la tasa de crecimiento de partículas:

Donde, k_{IVf} es la tasa de crecimiento del sitio o la tasa de reacción IV hacia adelante. C_c es la concentración de especie de crecimiento (fracción molar de acetileno), $X_{C_2H_2}$. S corresponde al área superficial de una partícula (esférica). N es el número de densidad de partículas y α es un factor de ajuste experimental.

El término X_{MP^\bullet} corresponde a la número de densidad del sitio radical MP^\bullet . Se deriva de la suposición de estado estable para las reacciones de I a IV. La expresión para este factor se muestra

$$X_{MP^\bullet} = (X_{MP-H}) \left(\frac{k_{if}[H] + k_{iif}[OH]}{k_{Ib}[H_2] + k_{Iib}[H_2O] + k_{iif}[H] + k_{IVf}[C_2H_2]} \right)$$

El término X_{MP-H} se refiere al número de densidad de sitios armchair, estimado

en $2;23 \times 10^{19}$ (sitios/m²). Los términos k_i (donde i : I, II, III y IV) corresponden a las constantes de velocidad de las reacciones I a IV.

Además, el factor experimental α , que depende únicamente de T, se define por:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\tanh \left(\frac{8168}{T} - 5,74 \right) \right]$$

El área superficial de partículas, se define por:

$$S = N d_p^2 \pi$$

Donde d_p corresponde al diámetro medio de partícula y se define:

$$d_p = \left(\frac{6 M_{MP} [MP]}{\pi \rho_{MP} N} \right)^{\frac{1}{3}}$$

M_{MP} corresponde a la masa molecular del MP (12 kg/mol) y ρ_{MP} es su densidad, 19800 kg/m³.

Oxidación

El fenómeno de oxidación es descrito por medio de dos modelos independientes (Rodríguez, 2010), el primero para la oxidación de partículas de O₂ y el segundo, considera la oxidación por el radical OH. A continuación se describen las reacciones y las tasas de oxidación para cada uno de los modelos (Belardini P., 1996) (Lindstedt, 2005) (Leung, 1991) (Neoh K.G., 1981).

| | Modelo de oxidación por O ₂ | Modelo de oxidación por OH |
|-----------------------|--|---|
| Reacción de oxidación | $MP + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$ | $MP + OH \rightarrow CO + H$ |
| Tasa de oxidación | $\dot{w}_{O_2} = 1,6 \times 10^7 e^{\left(\frac{-14000}{T}\right)} T^{\frac{1}{2}} N^{\frac{1}{2}} [MP]^{\frac{2}{3}} O_2$ | $\dot{w}_{OH} = \gamma_{OH} \frac{3 n_{OH} n}{N_A} \left(\frac{8RT}{\pi M_{OH}} \right)^{\frac{1}{2}}$ |
| Referencias | Belardini, Lidstedt, Leung | Neoh |
| | n_{OH} es el número de densidad de partículas de OH. | |
| | M_{OH} es la masa del radical OH. | |
| | γ_O es la eficiencia de colisión, que toma un valor de 0,13. | |

Tabla 12 Reacciones y tasas de oxidación

Balance de masa y balance de partículas

El modelo global establece que la formación total de MP (Rodríguez, 2010) es la contribución de los fenómenos de formación y oxidación (H. Hiroyasu, 1983), así el modelo global queda expresado como:

$$d \frac{[MP]}{dt} = \dot{w}_n + \dot{w}_c - \dot{w}_{ox} \text{ [kmol/m}^3\text{]}$$

El balance de partículas, se determina definiendo a N que es el número de densidad de partículas, esto se hace con la ecuación de Smoluchowski. La tasa de formación de partículas:

$$\dot{w}_n^p = d \frac{[MP]}{dT} \frac{N_A}{C_{min}}$$

Donde N_A , es el número de Avogadro, C_{min} corresponde al número mínimo de átomos de C necesarios para formar una partícula, esta variable tiene un valor de 100 átomos (Tao, 2004).

Por otro lado, la etapa de coagulación es descrita por:

$$\dot{w}_{coag} = \frac{5}{6} k_{coag} (Y_{MP})^{\frac{1}{6}} N^{\frac{1}{6}}$$

Donde Y_{MP} es la fracción volumétrica de partículas en (m³ de partículas / m³ de mezcla) y está dado por:

$$Y_{MP} = \frac{[M_{MP}][MP]}{\rho_{MP}}$$

En esta ecuación, M_{MP} es la masa molecular, $[MP]$ es la concentración molar y ρ_{MP} es el coeficiente de colisión, dado por:

$$k_{coag} = \frac{5}{12} \frac{[3]^{\frac{1}{6}} 6k_b T}{4\pi \rho_{MP}} G C_\alpha$$

K_b corresponde a la constante de Boltzman, G toma un valor de 2 y C_a toma un valor de 6,55. De esta forma, se obtiene la tasa de formación de partículas:

$$d \frac{[N]}{dt} = \dot{w}_n^p + \dot{w}_{coag} [particulas/m^3].$$

Teniendo estas definiciones, el modelo global de formación de MP, se encuentra descrito por las ecuaciones:

$$d \frac{[MP]}{dt} = \dot{w}_n + \dot{w}_c - \dot{w}_{ox} [kmol/m^3]$$

$$d \frac{[N]}{dt} = \dot{w}_n^p + \dot{w}_{coag} [particulas/m^3]$$

3.8. Modelo de Combustión

En este trabajo se tienen en cuenta dos combustibles: el diésel de grado comercial y el biodiésel de *Jatropha* proveniente de aceite crudo de *Jatropha*, el modelo de combustión para biodiésel de *Jatropha* se plantea como un análogo al modelo planteado por Rodríguez para el biodiésel de palma (Rodríguez, 2010). Para el modelo de diésel se emplea un modelo descrito en la sección 5.2.1

3.8.1. Modelo de combustión para Diésel

La composición del diésel comercial se describe en la siguiente tabla:

| Compuesto | Porcentaje en masa (wt%) |
|-------------------|--------------------------|
| HC alifáticos | 70,7 |
| HC monoaromáticos | 13 |
| HC diaromáticos | 13,3 |
| HC poliaromáticos | 3 |
| Azufre | 312 |
| Nitrógeno | 98 |

Tabla 13. Tomado de (A. Durán, 2004).

El modelo toma como referencia el mecanismo propuesto por Durán (A. Durán, 2004), que presenta un submecanismo para los compuestos considerados en la tabla anterior.

En el modelo se describe el rompimiento de las grandes moléculas de los 3 HC alifáticos y los aromáticos, hasta la obtención de HC de tipo C1 hasta C4, dadas por ecuaciones obtenidas de diversos trabajos (Rodríguez, 2010).

Para los HC alifáticos, el autor plantea una serie de reacciones mostradas a continuación:

| Reacción | | |
|--|--|--|
| $C_{12}H_{26} + O_2 \rightarrow C_{12}H_{25}^* + HO_2^*$ | | |
| $C_{12}H_{26} + HO_2^* \rightarrow C_{12}H_{25}^* + H_2O_2$ | | |
| $C_{12}H_{25}^* + O_2 \rightarrow C_{12}H_{24} + HO_2^*$ | | |
| $C_{12}H_{24} + H^* \rightarrow C_3H_6 + 4C_2H_4 + CH_3^*$ | | |
| $C_{12}H_{24} + H^* \rightarrow 5C_2H_4 + C_2H_5^*$ | | |
| $C_{12}H_{24} + CH_3^* \rightarrow C_4H_8 + 4C_2H_4 + CH_3^*$ | | |
| $C_{12}H_{24} + CH_3^* \rightarrow C_3H_6 + 4C_2H_4 + C_2H_5^*$ | | |
| $C_{12}H_{24} + OH^* \rightarrow CH_2O + 5C_2H_4 + CH_3^*$ | | |
| $C_{12}H_{24} + O^* \rightarrow CH_2CO^* + 4C_2H_4 + C_2H_5^* + H^*$ | | |
| $C_{14}H_{30} + O_2 \rightarrow C_{14}H_{29}^* + HO_2^*$ | | |
| $C_{14}H_{30} + HO_2^* \rightarrow C_{14}H_{29}^* + H_2O_2$ | | |
| $C_{14}H_{29}^* + O_2 \rightarrow C_{14}H_{28} + HO_2^*$ | | |
| $C_{14}H_{28} + H^* \rightarrow C_3H_6 + 5C_2H_4 + CH_3^*$ | | |
| $C_{14}H_{28} + H^* \rightarrow 6C_2H_4 + C_2H_5^*$ | | |
| $C_{14}H_{28} + CH_3^* \rightarrow C_4H_8 + 5C_2H_4 + CH_3^*$ | | |
| $C_{14}H_{28} + CH_3^* \rightarrow C_3H_6 + 5C_2H_4 + C_2H_5^*$ | | |
| $C_{14}H_{28} + OH^* \rightarrow CH_2O + 6C_2H_4 + CH_3^*$ | | |
| $C_{14}H_{28} + O^* \rightarrow CH_2CO^* + 5C_2H_4 + C_2H_5^* + H^*$ | | |
| $C_{17}H_{36} + O_2 \rightarrow C_{17}H_{35}^* + HO_2^*$ | | |
| $C_{17}H_{36} + HO_2^* \rightarrow C_{17}H_{35}^* + H_2O_2$ | | |
| $C_{17}H_{35}^* + O_2 \rightarrow C_{17}H_{34} + HO_2^*$ | | |
| $C_{17}H_{34} + H^* \rightarrow C_3H_6 + 6C_2H_4 + C_2H_5$ | | |
| $C_{17}H_{34} + H^* \rightarrow 8C_2H_4 + CH_3^*$ | | |
| $C_{17}H_{34} + CH_3^* \rightarrow C_4H_8 + 6C_2H_4 + C_2H_5^*$ | | |
| $C_{17}H_{34} + CH_3^* \rightarrow C_3H_6 + 7C_2H_4 + C_2H_3^*$ | | |
| $C_{17}H_{34} + OH^* \rightarrow CH_2O + 7C_2H_4 + C_2H_5^*$ | | |
| $C_{17}H_{34} + O^* \rightarrow CH_2CO^* + 7C_2H_4 + CH_3^* + H^*$ | | |

Tabla 14. Reacciones para HC Alifáticos (A. Durán, 2004) .

Donde se describen 27 reacciones

Para los HC Aromáticos se plantea una mecanismo de oxidación y pirolisis con las siguientes reacciones:

| Reacción |
|--|
| $A1 + O2 \rightarrow A1^* + HO2^*$ |
| $A1 + H^* \rightarrow A1^* + H2$ |
| $A1^* + O2 \rightarrow C6H5O^* + O^*$ |
| $C6H5O^* + H^* \rightarrow C6H5OH$ |
| $C6H5OH \rightarrow cC5H5^* + CO$ |
| $C6H5OH + OH^* \rightarrow C6H5O^* + H2O$ |
| $C6H5OH + C2H3^* \rightarrow C2H4 + C6H5O^*$ |
| $C6H5OH + C2H5^* \rightarrow C2H6 + C6H5O^*$ |
| $A2 + O2 \rightarrow A2^* + HO2^*$ |
| $A2 + H^* \rightarrow A2^* + H2$ |
| $A2^* + O2 \rightarrow A2O + O^*$ |
| $cC5H5^* \rightarrow A2^* + 2H^*$ |

Tabla 15. Reacciones para HC Aromáticos (A. Durán, 2004) .

Para Oxígeno – Hidrógeno se presenta un conjunto de 14 reacciones con 7 especies químicas y se describen como sigue:

| Reacción |
|---|
| $H^* + O2 + M \rightarrow HO2^* + M$ |
| $H2O2 + M \rightarrow 2OH^* + M$ |
| $H^* + OH^* + M \rightarrow H2O + M$ |
| $H^* + H^* + M \rightarrow H2^* + M$ |
| $H^* + O2 \rightarrow O^* + OH^*$ |
| $H^* + HO2^* + M \rightarrow H2 + O2$ |
| $H2 + O^* + M \rightarrow H^* + OH$ |
| $H2 + OH^* + M \rightarrow H^* + H2O [$ |
| $OH^* + OH^* \rightarrow O^* + H2O$ |
| $OH^* + HO2^* \rightarrow H2O + O2$ |
| $HO2^* + HO2^* + M \rightarrow H2O2 + O2$ |
| $H2O2^* + H^* \rightarrow H2O + OH^*$ |
| $H2O2 + H^* + M \rightarrow HO2^* + H2$ |
| $O^* + H^* + M \rightarrow OH^* + M$ |

Tabla 16. Reacciones Oxígeno - Hidrógeno (A. Durán, 2004)

3.8.2. Modelo de combustión para el biodiesel de *Jatropha*

Las moléculas que componen el biodiesel de *Jatropha* mostradas en la siguiente tabla deberían considerarse dentro del modelo de combustión para este combustible. Sin embargo, debido a su porcentaje en peso total sólo se considerarán el Metil Palmitato, Metil Oleato y Linoleato. Las demás moléculas suman entre todas 5,56% por lo cual se consideran despreciables.

| Compuesto | % Porcentaje en masa (wt%) |
|--------------------|----------------------------|
| Metil Lauritato | 0,06 |
| Metil Miristato | 0,1 |
| Metil Palmitato | 14,96 |
| Metil Palmitoleato | 1,1 |
| Metil Estearato | 3,85 |
| Metil Oleato | 32,49 |
| Metil Linoleato | 47,43 |

*Tabla 17. Composición Ácidos grasos del biodiesel de *Jatropha*.*

Teniendo determinadas las especies químicas más relevantes para el biodiesel de *Jatropha*, deben seleccionarse las reacciones que describen el proceso de oxidación y pirólisis.

Teniendo en cuenta los modelos de cinética de reacción existentes para el Metil Oleato y Metil Linoleato, propuestos por Golovitchev y Yan, las reacciones propuestas son las siguientes:

- Metil Linoleato - Metil Oleato

El submecanismo para el Metil Linoleato es análogo al mecanismo para el Metil Oleato propuesto por Golovitchev y Yan. En su trabajo los plantean a partir de los mecanismos para el Metil Decanoato y Butanoato, desarrollándolo como el compuesto principal para el Metil Oleato de un aceite de Colza, sin embargo afirman que es análogo al Metil Oleato, además que a partir de la reacción inicial se puede describir el mecanismo de oxidación del Metil Oleato y Metil Linoleato.

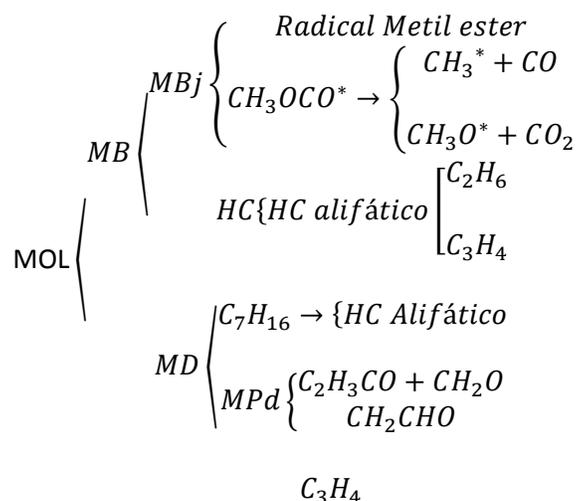
La reacción inicial del mecanismo se muestra a continuación:



Donde MEC es el Metil Éster de Colza y es Metilacetileno.

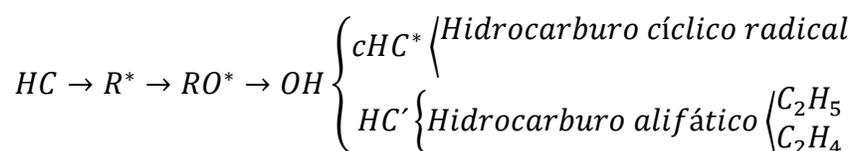
Por otro lado, se encuentra que el mecanismo para el metil linoleato tiene una dificultad y es que ésta posee un doble enlace de Carbono, lo que presenta una carencia de dos H al balancear la ecuación. Entonces al no tener información suficiente para el Metil Linoleato, y al estar trabajando con los mismos parámetros cinéticos tanto para el Metil Linoleato como para el Metil Oleato, se debe asumir que la molécula representativa es la del Metil Oleato y se emplea la reacción original planteada por Golovitchev y Yan (Golovitchev V.I., 2009). La concentración para el metil oleato se trabaja como la suma de las concentraciones de Metil Linoleato y Metil Oleato presentes en el aceite de Jatropa.

El mecanismo de Metil Oleato se muestra a continuación:



En el esquema se muestra la descomposición del metil oleato en MD, MB y metilacetileno. Se obtiene posteriormente, n-heptano y MPd del MD. Del MB se obtiene el radical que se descompone en un radical metil y metoxil junto a CO y CO2 respectivamente.

Al producirse n-heptano, es necesario un mecanismo de reacción y se muestra a continuación:



Las reacciones consideradas para este submecanismo se muestran En la siguiente.

| →MOL | | Autor |
|----------|------------------|--------------------------|
| MOL + O2 | → MD + MB + C3H4 | (Golovitchev V.I., 2009) |
| MD | → MPd + C7H16 | (Golovitchev V.I., 2009) |
| MB + O2 | → MBj + HO2* | (Golovitchev V.I., 2009) |
| MB + OH* | → MBj + H2O | (Golovitchev V.I., 2009) |

| | |
|---|--------------------------|
| $MB + C_2H_5^* \rightarrow MB_j + C_2H_6$ | (Golovitchev V.I., 2009) |
| $MB + C_2H_3^* \rightarrow MB_j + C_2H_4$ | (Golovitchev V.I., 2009) |
| $MPd + H^* \rightarrow C_2H_3CO + CH_2O + H_2$ | (Golovitchev V.I., 2009) |
| $MPd + O^* \rightarrow CH_3OCO^* + CH_2CHO + H_2$ | (Golovitchev V.I., 2009) |
| $C_2H_3CO \rightarrow C_2H_3^* + CO$ | (Golovitchev V.I., 2009) |
| $C_2H_3^* + O_2 \rightarrow CH_2CHO + O^*$ | (Golovitchev V.I., 2009) |
| $CH_2CHO \rightarrow CH_2CO + H^*$ | (S. Dooley, 2008) |
| $CH_2CHO + O_2 \rightarrow CH_2O + CO + OH^*$ | (S. Dooley, 2008) |
| $CH_3OCO^* \rightarrow CH_3^* + CO_2$ | (L.K. Huynh, 2009) |
| $CH_3OCO^* \rightarrow CH_3O + CO$ | (L.K. Huynh, 2009) |
| $C_7H_{16} + O_2 \rightarrow C_7H_{15}^* + HO_2^*$ | (P.A. Glaude, 1998) |
| $C_7H_{16} + HO_2^* \rightarrow C_7H_{15}^* + H_2O_2$ | (P.A. Glaude, 1998) |
| $C_7H_{15}^* + O_2 \rightarrow C_7H_{14} + HO_2^*$ | (P.A. Glaude, 1998) |
| $C_7H_{14} + H^* \rightarrow C_3H_6 + 1;5C_2H_4 + CH_3^*$ | (P.A. Glaude, 1998) |
| $C_7H_{14} + H^* \rightarrow 2;5C_2H_4 + C_2H_5^*$ | (P.A. Glaude, 1998) |
| $MB_j \rightarrow C_3H_6 + CH_3OCO^*$ | (S. Dooley, 2008) |

Tabla 18. Reacciones mecanismo metil Oleato .

El submecanismo Metil Palmitato (MPA), Rodríguez (Rodríguez, 2010) lo plantea como una analogía entre los mecanismos de Dooley (Dooley S., 2008) y el propuesto para MD por Herbinet (Herbinet, 2008), asumiendo consideraciones que parten de la similitud entre las moléculas de MB, MD y MPA, que son moléculas insaturadas de Carbonos con un grupo $C=O_2CH_3$, en uno de los extremos de la molécula. Las consideraciones consisten en:

La naturaleza de las reacciones que específicamente se refiere a que las moléculas se descomponen, fraccionan y recombinan. MOL

Formación de radicales y parámetros cinéticos que hacen referencia a la formación de radicales con propiedades cinéticas similares para todas las moléculas, MB, MD y MPA.

Simplificaciones generales como las realizadas en el submecanismo para MOL. SE emplea la misma cantidad de simplificaciones respecto a la cantidad de radicales empleados para generar un submecanismo ponderado. Dicho mecanismo reduce considerablemente el número de especies dentro del modelo, de lo contrario resultaría en términos computacionales difíciles de resolver.

El submecanismo planteado por Rodríguez para MPA se muestra en la siguiente tabla:

| Reacción | Autor |
|----------|-------|
|----------|-------|

| | |
|---|-------------------|
| $\text{MPA} + \text{O}_2 \rightarrow \text{MPAj} + \text{HO}_2^*$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPA} + \text{H}^* \rightarrow \text{MPAj} + \text{H}_2$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPA} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{MPAj} + \text{H}_2\text{O}_2$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPA} + \text{OH}^* \rightarrow \text{MPAj} + \text{H}_2\text{O}$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPA} + \text{O}^* \rightarrow \text{MPAj} + \text{OH}^*$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPA} + \text{CH}_3^* \rightarrow \text{MPAj} + \text{CH}_4$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPA} + \text{CH}_3\text{O}^* \rightarrow \text{MPAj} + \text{CH}_3\text{OH}$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPA} + \text{C}_2\text{H}_3^* \rightarrow \text{MPAj} + \text{C}_2\text{H}_4$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPA} + \text{C}_2\text{H}_5^* \rightarrow \text{MPAj} + \text{C}_2\text{H}_6$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPAj} + \text{O}_2 \rightarrow \text{MPAd} + \text{HO}_2^*$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPAj} \rightarrow \text{C}_{15}\text{H}_{30} + \text{CH}_3\text{OCO}^*$ | (Dooley S., 2008) |
| $\text{MPAd} + \text{H}^* \rightarrow \text{MPAj}$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPAd} + \text{H}^* \rightarrow \text{MPAdj} + \text{H}_2$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPAd} + \text{HO}_2^* \rightarrow \text{MPAdj} + \text{H}_2\text{O}_2$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPAd} + \text{OH}^* \rightarrow \text{MPAdj} + \text{H}_2\text{O}$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPAd} + \text{O}^* \rightarrow \text{MPAdj} + \text{OH}^*$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPAd} + \text{CH}_3^* \rightarrow \text{MPAdj} + \text{CH}_4$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPAd} + \text{C}_2\text{H}_3^* \rightarrow \text{MPAdj} + \text{C}_2\text{H}_4$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{MPAdj} \rightarrow \text{C}_{15}\text{H}_{28} + \text{CH}_3\text{OCO}^*$ | (Dooley S., 2008) |
| $\text{MPA} + \text{M} \rightarrow \text{CH}_3\text{OCO}^* + \text{C}_{15}\text{H}_{31}^* + \text{M}$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{C}_{15}\text{H}_{28} + \text{H}^* \rightarrow \text{C}_{15}\text{H}_{29}$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{C}_{15}\text{H}_{29} \rightarrow \text{C}_3\text{H}_4 + \text{C}_{12}\text{H}_{25}^*$ | (Glaude, 1998) |
| $\text{C}_{15}\text{H}_{31}^* + \text{O}_2 \rightarrow \text{C}_{15}\text{H}_{30} + \text{HO}_2$ | (Glaude, 1998) |
| $\text{C}_{15}\text{H}_{30} + \text{H}^* \rightarrow 7\text{C}_2\text{H}_4 + 5\text{CH}_3^*$ | (Glaude, 1998) |
| $\text{C}_3\text{H}_4 + \text{HO}_2^* \rightarrow \text{CH}_2\text{CO} + \text{CH}_3^* + \text{OH}$ | (Herbinet, 2008) |
| $\text{C}_3\text{H}_4 + \text{OH}^* \rightarrow \text{CH}_2\text{CO} + \text{CH}_3^*$ | (Herbinet, 2008) |

Tabla 19. Reacciones mecanismo Metil Palmitato.

El modelo para MPA propuesto por Rodríguez consta de 27 reacciones y 28 especies químicas. Las 9 primeras reacciones corresponden a las de oxidación y pirólisis de la molécula de MPA, disponible en internet en formato Chemkin.

Concluyendo el modelo propuesto para biodiesel de Jatropha consta de 48 reacciones y 43 especies químicas. 25 de estas especies intervienen también en el mecanismo para diésel lo cuál permite su formación y destrucción, acoplado los dos mecanismos.

Mecanismo Químico para precursores

Las especies químicas precursoras de formación de MP consideradas en este trabajo son:

Acetileno, Diacetileno, Benceno y Naftaleno.

El Benceno y el Naftaleno hacen parte de las moléculas representativas dentro del submecanismo del diésel, por lo tanto la mayoría de reacciones asociadas para estas dos especies se encuentran contempladas dentro de dicho submecanismo.

Para el Acetileno y Diacetileno, Rodríguez considera reacciones de formación, oxidación y pirólisis. Para el A1 y A2, había considerado algunas reacciones previamente dentro del mecanismo de reacción del biodiesel (Rodríguez, 2010). La formación de estas dos especies las considera a partir de la interacción de HC Alifáticos. También consideró reacciones de crecimiento planar del modelo de HACA, sin embargo las descarta posteriormente porque las concentraciones de estas especies son despreciables con respecto a la concentración inicial de estos compuestos en el combustible, además de generar inestabilidades numéricas en la simulación.

Rodríguez afirma que el considerar formación de HAP de más de dos anillos, estos no contribuirían dentro del modelo considerado de formación de MP, a pesar de haberse demostrado que debido a su alto peso molecular, forman MP por crecimiento planar.

Las reacciones consideradas para cada uno de los precursores se muestran en el anexo. Las características de las reacciones se describen en la tabla:

| Reacción | Autor |
|--|--------------------------------|
| $C_2H_3^* + OH^* \rightarrow C_2H_2 + H_2O$ | (R. J. Kee, 1987) |
| $C_2H_3^* + O_2 \leftrightarrow C_2H_2 + HO_2^*$ | (J. Appel, 2000) |
| $C_2H_3^* + H^* \leftrightarrow C_2H_2 + H_2$ | (M. S. Skhoth-Rasmussen, 2004) |
| $2C_2H_3^* \leftrightarrow C_2H_4 + C_2H_2$ | (M. S. Skhoth-Rasmussen, 2004) |
| $C_2H_3^* + CH_3^* \leftrightarrow C_2H_2 + CH$ | (M. S. Skhoth-Rasmussen, 2004) |
| $C_4H_6 \leftrightarrow C_2H_2 + C_2H_4$ | (A. Goldaniga, 2000) |
| $C_4H_5^* \leftrightarrow C_2H_3^* + C_2H_2$ | (J. L. Emdee, 1992) |
| $C_2H_2 + OH^* \leftrightarrow CH_2CO^* + H^*$ | (M. S. Skhoth-Rasmussen, 2004) |
| $C_2H_2 + H^* + M \leftrightarrow C_2H_3^* + M$ | (Glaude, 1998) |
| $C_2H_2 + CH_3^* \leftrightarrow C_3H_5^*$ | (R. J. Kee, 1987) |

| | |
|--|-------------------------|
| $C2H2 + CH3^* \leftrightarrow C3H4 + H^*$ | (R. J. Kee, 1987) |
| $C3H5^* + C2H2 \leftrightarrow C5H7^*$ | (Dean, 1990) |
| $C3H5^* + C2H2 \leftrightarrow C5H6 + H^*$ | (Dean, 1990) |
| $C4H3^* + C2H2 \leftrightarrow A1^*$ | (A. Danna, 2000) |
| $C4H3^* \leftrightarrow C4H2 + H^*$ | (C. Horn, 1997) |
| $C4H3^* + OH^* \leftrightarrow C4H2 + H2O$ | (S.G. Davis, 1999) |
| $C4H3^* + OH^* \leftrightarrow C4H2 + H2O$ | (S.G. Davis, 1999) |
| $C4H2 + OH^* \rightarrow C4H2O + H^*$ | (R. P. Lindstedt, 1997) |
| $C3H3^* + C4H3 \rightarrow A1 + H$ | (R. J. Kee, 1987) |
| $C3H3^* + C3H3^* \rightarrow A1$ | (R. J. Kee, 1987) |
| $C4H4 + C2H3^* \rightarrow A1 + H^*$ | (R. P. Lindstedt, 1997) |
| $A1^* + H^* \rightarrow A1$ | (J. L. Emdee, 1992) |
| $2cC5H5^* \leftrightarrow A2^* + 2H^*$ | (C. Horn, 1997) |

Tabla 20. Reacciones mecanismo químico de precursores.

3.9. Limitaciones del modelo

El modelo posee limitaciones computacionales que acotan estos parámetros de entrada descritos, como un ejemplo, el modelo contempla el número de partículas emitidas en la combustión que genera un tiempo computacional muy grande debido a la rigidez del sistema, además para ciertos valores de la especie A2, los valores de MP tienden a disminuir súbitamente lo que hace pensar que se generan de agentes oxidantes de manera descontrolada responsables de este fenómeno pero al tener una temperatura constante en la cámara de combustión, se sugiere la generación de un error para ciertos espacios temporales.

El trabajo con perfiles de temperatura con cambios bruscos con respecto al tiempo afectan de manera drástica la estabilidad de las simulaciones debido a que los coeficientes de las ecuaciones diferenciales ordinarias del modelo dependen directamente de la temperatura empleada.

Las relaciones aire combustible afectan directamente el crecimiento o decrecimiento de las especies químicas a lo largo del tiempo, por lo cual las relaciones aire combustible seleccionadas en este trabajo son relaciones que generaron estabilidad numérica en el modelo (Rodríguez, 2010).

4. Resultados experimentales

Producto de la operación del motor Lister con las diferentes mezclas de combustibles, se obtuvieron resultados que permiten evidenciar el efecto del biodiesel en las emisiones de material particulado, para condiciones de carga constante.

En general, se encuentra que el en la operación con combustible diésel, existe una demanda inferior de energía que cualquiera de las mezclas con biodiesel consideradas. Diversos autores han comprobado que la inclusión de biodiesel en las mezclas resulta en un inicio temprano de la combustión y un retardo en la ignición debido al alto número de cetano, baja compresibilidad y la composición de ácidos grasos de éstos combustibles. (Shahabuddin M, 2013) (Giakoumis Evangelos G, 2013). Además, autores han encontrado que a mayor contenido de biocombustible en las mezclas hay una mayor tendencia a la generación de hidrocarburos sin quemar (Rakopoulos C, 2011), infiriendo una combustión incompleta en el empleo de biocombustibles lo cual explicaría el mayor consumo de energía con respecto al diésel.

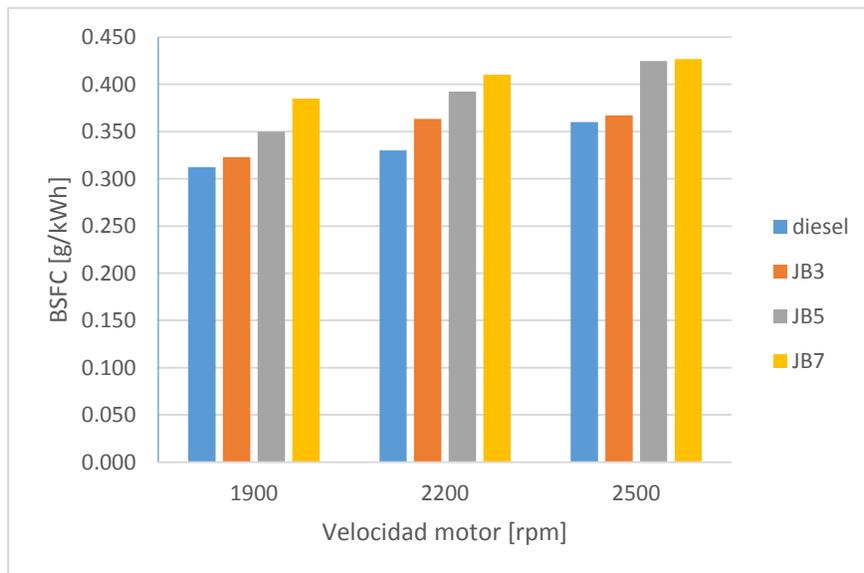


Figura 8 Consumo específico de combustible para el motor encendido por compresión al 50% de carga. Fuente: elaboración propia.

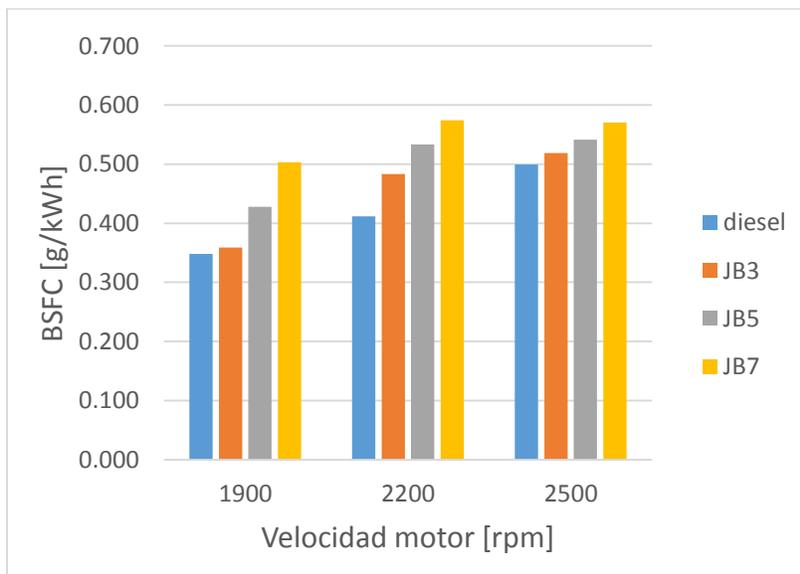


Figura 9 Consumo específico de combustible para el motor encendido por compresión al 25% de carga. Fuente: elaboración propia.

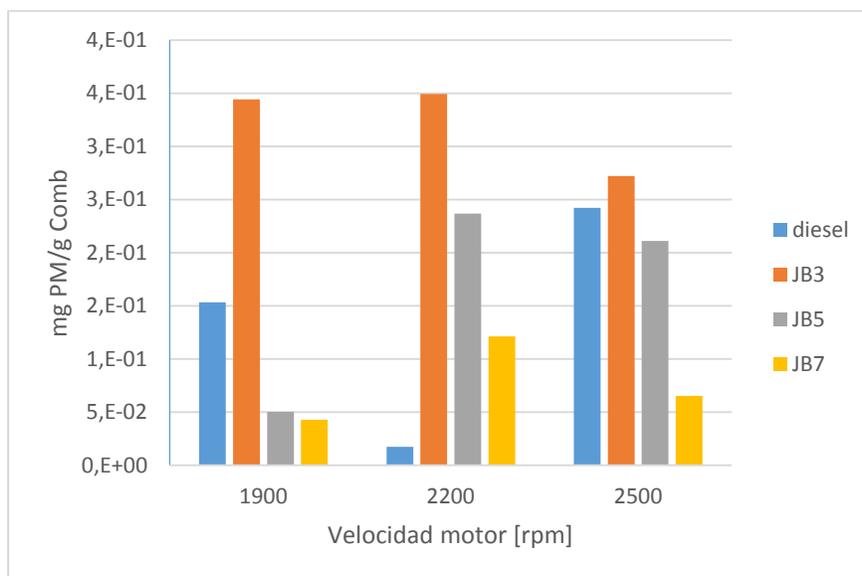


Figura 10. Emisión de material particulado en masa por unidad de energía, Porcentaje de carga 50%. Fuente: elaboración propia.

Al analizar las emisiones de material particulado en función de la masa de combustible consumida por el motor, se pueden determinar aspectos relevantes para poder comparar el efecto de los biocombustibles en la operación de motores encendidos por compresión. En este caso, para la prueba a 50% de carga, condición en la que hay una mayor cantidad de emisiones por unidad de combustible corresponde a la mezcla con 3% de biodiesel (concentración más baja) en los diferentes rangos de velocidad (figura 8). Así mismo la mezcla con mayor contenido de biodiesel presenta los menores valores de emisión de MP.

Estos resultados son consistentes con los resultados obtenidos por Graboski que trabajando en un motor de combustión interna con mezclas de diésel y biodiesel al 20%, 35% 70% y 100% encontró una disminución lineal en emisiones de partículas a medida que aumentaba la concentración del biodiesel (Graboski M.S., 2003).

El punto de operación del motor en el cual se obtuvo la menor generación de material particulado por unidad de combustible, corresponde a la velocidad de 2200 rpm operando el motor con diésel puro. Este es valor, dentro de las pruebas realizadas en la condición de carga del 50%, en el cual se obtiene la menor emisión de MP con respecto a todas las otras mezclas de combustible evaluadas (figuras 9, 10). Esta condición de velocidad de giro del motor y carga del 50%, coincide con los valores de referencia de la ficha técnica de motor, para la operación más eficiente del mismo, teniendo en cuenta que el mismo se adaptó para operar a velocidad variable con el uso de los componentes de gestión de combustible (bomba, inyectores, gobernador).

La operación con 7% de biodiesel presenta las menores emisiones para las tres velocidades de rotación del motor evaluadas dentro de los combustibles con mezcla de biodiesel. Aún así, las emisiones de material particulado con mezcla de combustible y biodiesel en los tres porcentajes de mezcla, son poco relacionadas con el comportamiento de las emisiones al operar el motor con combustible diésel puro. Al analizar este fenómeno, se puede considerar que la operación con diésel puro tiene valores con alta emisión a baja y alta velocidad y un punto de operación a media velocidad y baja emisión, un comportamiento característico de un motor ciclo diésel. En el caso de los biocombustibles, la falta de capacidad de ajuste del sistema de inyección, tiempos de inyección y la operación del motor con la misma temperatura de combustible para los 4 combustibles, pueden ser factores que pueden tener influencia en dicho comportamiento. Así mismo, es necesario realizar pruebas con mayor cantidad de repeticiones que permitan tener datos suficientes para confirmar los datos dispares.

La operación con 3% de biodiesel presentó las mayores emisiones y se considera la condición menos favorable desde el punto de vista de emisión total de PM. Es interesante notar este comportamiento, dado que evidencia la necesidad de usar estudios detallados de la cinética de reacción de mezclas de combustibles o que permitan describir de manera precisa el proceso de combustión para determinar las razones por las cuales una

mezcla baja del biodiesel presenta resultados desfavorables, en comparación a una mezcla con mayor contenido de este último.

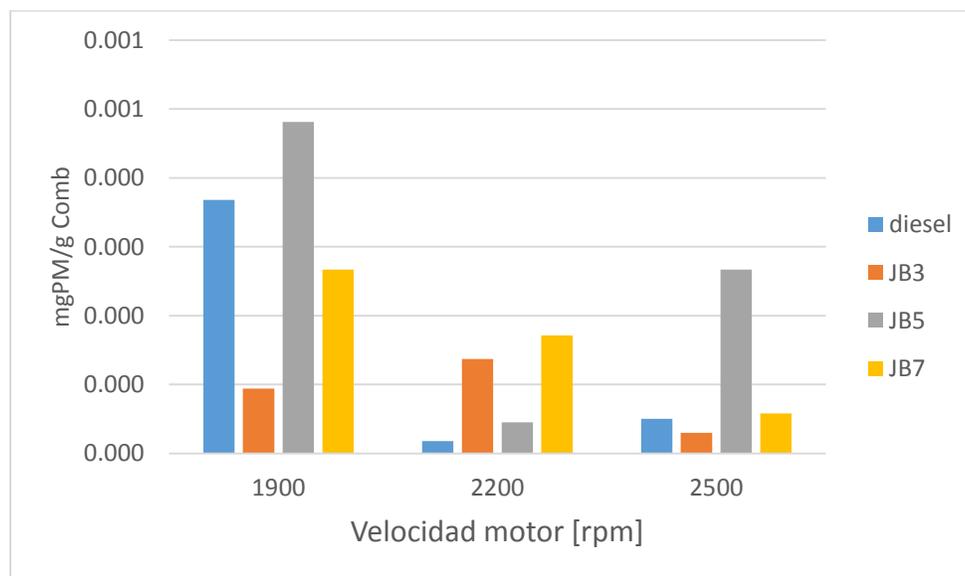


Figura 5. Emisión de material particulado en masa, Dekati Elpi+. Porcentaje de carga 25%. Fuente: elaboración propia.

En el caso de la operación del motor en baja carga, que corresponde al 25% de la carga nominal del motor (figuras 11, 12), se encuentran resultados diferentes a la operación del motor en alta carga. En estos el motor es menos contaminante a menor velocidad en todos los combustibles evaluados en la mayor velocidad de operación.

En este caso el comportamiento de la emisión de MP para las diferentes concentraciones de biodiesel es inverso a los resultados de la operación en alta carga. En el caso del menor contenido de biodiesel el valor de masa emitida es menor y las mayores emisiones contaminantes se presentaron en la mezcla al 5%. La disminución de emisiones con respecto a la disminución de la carga en el motor es consistente con el estudio realizado por Agarwal que encontró variaciones en las emisiones de material particulado al variar el trabajo de un motor operando con diésel y una mezcla B20, tanto para el diésel como para el biodiesel la emisión de material particulado aumentó a medida que se incrementó la carga (Agarwal, 2011).

El combustible con las mayores emisiones es la mezcla de 5% de biodiesel, mientras que el combustible diésel de referencia, es el que presenta los menores valores de emisión de MP. Este tipo de comportamientos evidencian la necesidad de ajustar los parámetros de tiempo de inyección, presión y temperatura del combustible de manera específica para cada mezcla de combustible.

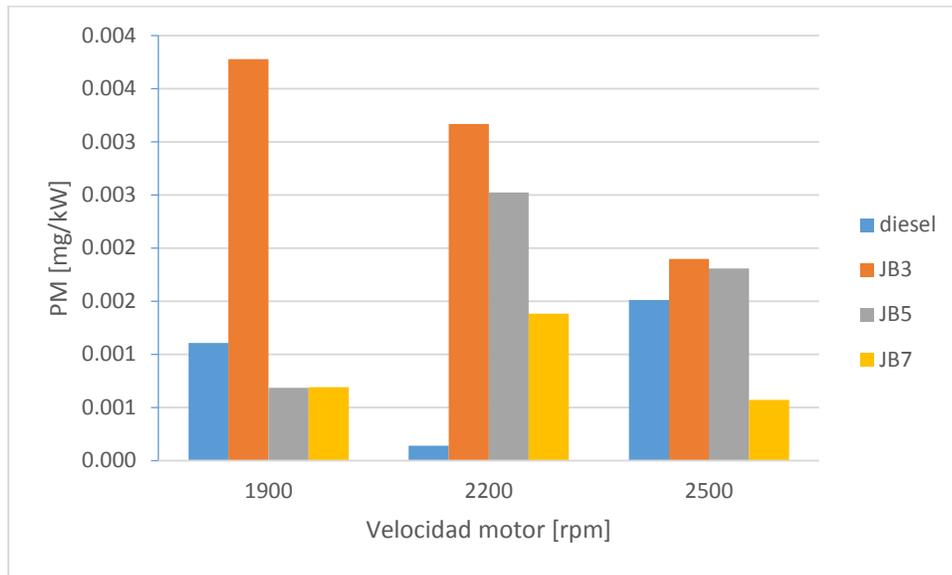


Figura 11. Formación de material particulado por unidad de masa de combustible. Carga 50%. Fuente: elaboración propia.

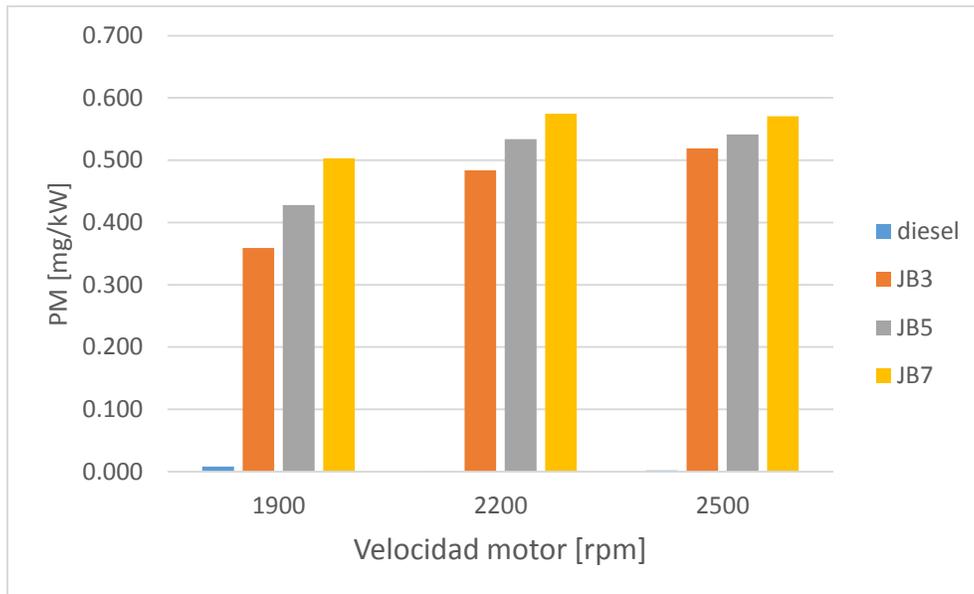


Figura 12. Formación de material particulado por unidad de masa de combustible. Carga 25%. Fuente: elaboración propia.

5. Resultados del Modelo predictivo

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los modelo de formación de material particulado para biodiesel de *Jatropha*. Las simulaciones presentadas se realizaron con los siguientes parámetros: Mezclas, JB3, JB5 y JB7. Relación Aire – combustible pobre (para efectos comparativos con parte experimental se asume como carga 25%) y rica (para efectos comparativos con parte experimental se asume como carga 50%). Temperatura 1200 K.

Los resultados no pueden ser analizados de manera cuantitativa porque no se tiene un detalle de los fenómenos específicos que ocurrirían en la cámara de combustión porque el modelo predictivo empleado en las comparaciones no lo contempla, por lo tanto, el análisis se expresa en términos de tendencias.

A continuación se muestran los resultados de las mezclas JB7, JB5 y JB3 con relación aire combustible ricas (carga 50%) y pobres (carga 25%), y se muestra principalmente la zona de mayor producción de MP hasta su oxidación, de ahí en adelante el valor se hace constante.

La producción de material particulado obtenido del modelo predictivo de formación indica que para el diésel es mayor la producción tanto en mezcla rica (carga 50%) como en mezcla pobre (carga 25%) comparando con la producción de las otras mezclas con biodiesel de *Jatropha*.

De la gráfica 13 se observa que la mayor producción de material particulado para las mezclas, se genera en la mezcla JB3 tanto para mezcla rica (carga 50%) como para mezcla pobre (carga 25%) y la menor producción de material particulado se da en la mezcla JB7. Esto es consistente con estudios encontrados en literatura donde se encuentra que para mayor contenido de biocombustible la cantidad de material particulado es menor, y se demuestra en este caso para el biodiesel de *Jatropha* (Agarwal, 2011) (Lapuerta M, 2004).

Además, también es consistente con los resultados obtenidos experimentalmente donde la menor producción de material particulado se daba en la carga de 25% independientemente de la mezcla que se estuviese considerando

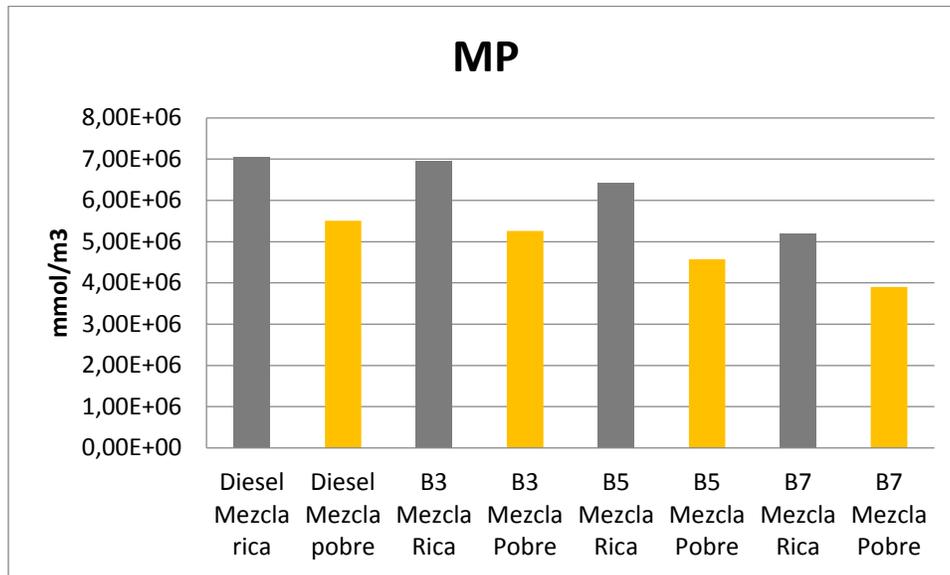


Figura 13. Producción de material particulado para mezclas JB3, JB5 y JB7. En mezcla rica (50% carga) y mezcla pobre (25% carga)

Esta menor producción de Material particulado se explica porque el mayor el contenido de oxígeno en la molécula de biodiesel permite una combustión más completa incluso en lugares donde la cámara de combustión geoméricamente genera una mezcla rica (carga 50%) en relación aire-combustible (J. Fernández, 2008). Además, si se considera ese contenido mayor de oxígeno dentro de la molécula de biodiesel, se puede deducir que la necesidad estequiométrica de aire para este biocombustible es menor, por lo cual la probabilidad de aparición de especies precursoras de formación de material particulado, es menor (Wang W.G., 2000)

En la figura 14 se observa que la concentración de MP es mayor para la mezcla rica (carga 50%), resultado consistente con el hecho de que en ese caso, la proporción de aire es menor a la necesaria para alcanzar la oxidación completa de todos los componentes del combustible.

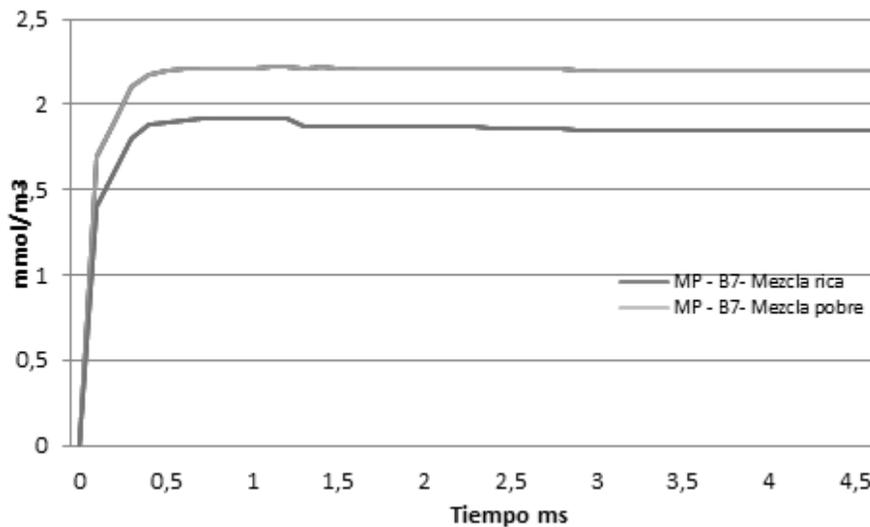


Figura 14. Concentración de MP para mezcla JB7 rica (carga 50%) y pobre (carga 25%).

La mezcla JB7 tiene una producción de material particulado mayor para la relación aire combustible rica (carga 50%) en un 15, 4% que la relación aire combustible pobre (carga 25%), que son los resultados esperados (figura 14).

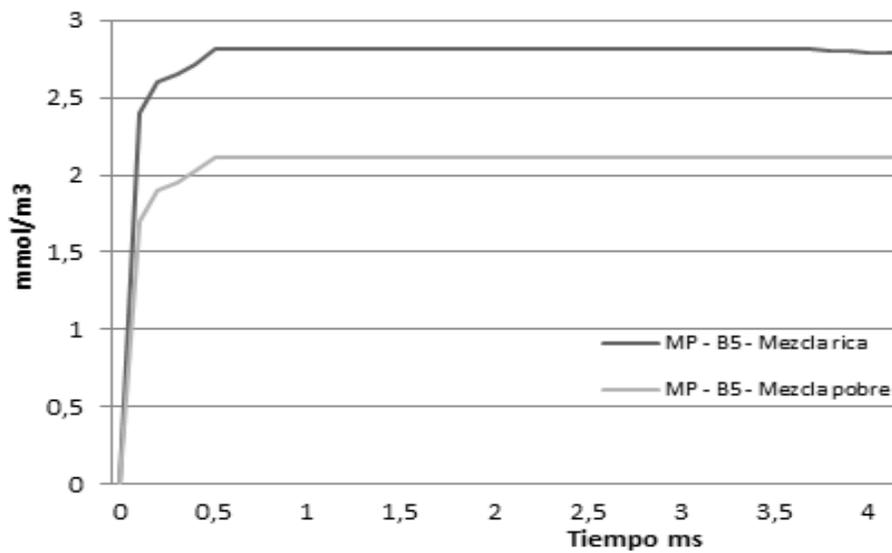


Figura 15. Concentración de MP para mezcla JB5 rica y pobre.

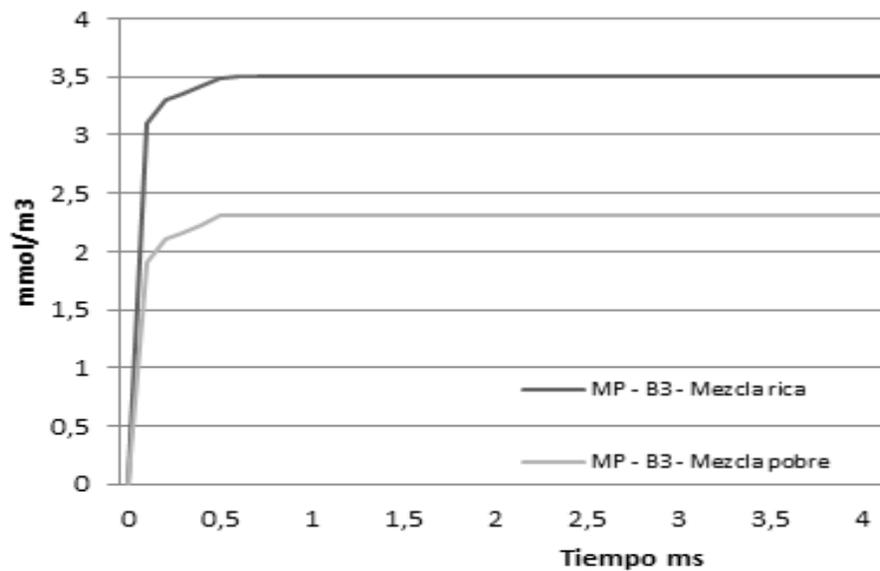


Figura 16. Concentración de MP para mezcla JB3 rica (carga 50%) y pobre.

Para las mezclas JB5 y JB3 se observa que la producción de material particulado es aproximadamente un 19% mayor en la relación aire combustible rica (carga 50%) que la pobre (carga 25%) en la mezcla JB5 y un 35% mayor para la relación rica (carga 50%) sobre la pobre (carga 25%) de la mezcla JB3 (figuras 15,16). A su vez la mezcla rica (carga 50%) en JB7 es un 35% menor que la mezcla JB3 y un 10% menor que la mezcla rica (carga 50%) JB5. Y la mezcla JB5 rica (carga 50%) es un 11% menor que la mezcla rica (carga 50%) JB3. En todos los casos se cumple que la producción de material particulado es mayor para los casos en los que el motor trabaja a cargas del 50% (mezcla rica) que para los casos en los que trabaja en cargas de 25% (mezcla pobre).

Estos resultados muestran que la composición del combustible tiene relación directa con la cantidad de material particulado emitido. La mayoría de autores encuentran que el inicio de la combustión y de la inyección es menos retardado al trabajar con biodiesel (Lapuerta M, 2004) (Belardini P., 1996) y esto puede ser explicado en principio porque las propiedades inherentes al biocombustible generan una sobrepresión en los inyectores y además, se encuentra que el mayor número de cetano que poseen los biocombustibles también contribuye con este efecto (Lee C.S., 2005). A un inicio temprano de la combustión para el biodiesel, en este caso de Jatropha, las partículas de MP son oxidadas con mayor rapidez independientemente de la relación aire-combustible.

CONCLUSIONES

De los resultados experimentales se obtiene que la generación de material particulado depende de la velocidad de operación del motor y la carga del motor, encontrándose que para el motor empleado en particular, a mayor velocidad de rotación y carga media (50%), las emisiones son las más altas en las tres mezclas consideradas. Dicho comportamiento se puede atribuir al uso de componentes de gestión de combustible en el motor (bomba inyectoras, gobernador) diseñados para velocidad fija, y operación a plena carga.

En contraste, cuando el motor es operado a bajas velocidades y carga baja (25%), las emisiones de material particulado son mayores. Incluso se encuentra que para las tres mezclas a carga baja y a la mayor velocidad las emisiones de material particulado son mucho menores que para la condición de velocidades bajas a carga media, es decir, a velocidades bajas.

Para la mezcla JB5 se encuentra que para carga media, la emisión de material particulado es incluso mucho menor al combustible de referencia, diésel, reduciéndose en más de un 50%. Y para la mezcla JB3 a carga media, la velocidad de rotación no tiene un efecto considerable en las emisiones de partículas, manteniéndose en valores muy cercanos en las tres velocidades estudiadas. Es necesario realizar estudios más extensos en el efecto de mezclas con baja concentración en volumen de biodiesel de jatropha, diferentes rangos de temperatura del combustible y cambiar parámetros de inyección con el fin de confirmar si se replican estos comportamientos bajo las mismas condiciones.

En la mezcla JB7, se encuentra un comportamiento inverso en la carga alta y la carga media, para la carga media, la mezcla presenta emisiones que disminuyen proporcionalmente a la velocidad de rotación y para la carga baja, las emisiones obtenidas de esta mezcla son considerablemente mayores, del orden del 65% en la velocidad de 1900 con respecto a la velocidad de 2500 rpm. Es necesario realizar estudios con un sistema de gestión de combustible que permita ajustar el motor de manera específica para cada mezcla de combustible y poder así profundizar en este tipo de comportamientos.

En los valores experimentales como el los valores obtenidos con el modelo predictivo puede reiterarse que, en general, la emisión de material particulado es más favorable en mezclas con mayor contenido de biodiesel de Jatropha y empleando mezclas pobres. En estas se favorece el exceso de oxígeno en el proceso de combustión, una menor estratificación de la mezcla dentro de la cámara de combustión y un tiempo suficiente del mismo para evitar combustión incompleta.

Los resultados para emisiones de la mezcla JB3 en el modelo predictivo empleando una mezcla rica (carga 50%) es consistente con el resultado obtenido del ensayo a carga media y velocidad baja, donde las emisiones sus mayores. Sin embargo, para carga baja

y velocidad de 1900 rpm, se tiene que la mezcla que emite mayor cantidad de partículas en la mezcla JB5.

Finalmente en el modelo predictivo, se obtuvo que la mezcla JB7 relación aire combustible pobre (carga 25%) emite la menor cantidad de material particulado y en los resultados experimentales, la mezcla que obtuvo menor cantidad de emisiones de MP es igualmente la mezcla JB7.

La comparación realizada en este trabajo permite un análisis cualitativo de las emisiones de material particulado para mezclas de biodiesel de Jatropha con diésel comercial, sin embargo, podría incorporarse un submodelo matemático la interacción que tiene la velocidad de rotación y la carga del motor al modelo existente con el fin de realizar un análisis cuantitativo y mucho más robusto de las propiedades del combustible de entrada con respecto a la producción de partículas.

Bibliografía

A.E. Atabani a,n , A.S. Silitonga a,b,n , H.C. Onga, T.M.I. Mahlia c, H.H. Masjuki a, Irfan Anjum Badruddin a, H. Fayaz a Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production.

A. Danna, A. V. (2000). Modeling the rich combustion of aliphatic hydrocarbons. *Combustion and Flame*, 418-429.

A. Durán, C. J. (2004). Modelling soot and sof emissions from a diésel engine. *Chemosphere*, 209-225.

Agarwal Deepak. Agarwal Kumar. Avinash – Performance and emission characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine – Applied thermal engineering 27 (2007) 2314 – 2323

A. Goldaniga, T. F. (2000). The kinetic modeling of soot precursors in a butadiene flame. *Combustion and Flame*, 350-358.

A. Trabucco, W. Achten, C. Bowe, R. Aerts, J. Van Orshoven, L. Norgroves, B. Muys, - Global mapping of Jatropha curcas yield based on response of fitness to present and future climate – GCB Bioenergy (2010) 2, 139-151.

A. Varadharajan. W.S. Venkateswaran. Prof. Rangan Banerjee – Energy analysis of biodiesel from Jatropha – World renewable energy congress (2008)

Baldasari, T. B. (2004). Emission comparison of urban bus engine fuelled with diésel oil and biodiesel blend. *Science of the total environment*, 147-162.

Belardini P., B. C. (1996). Application of a reduced kinetic model for soot formation and burnout in three dimensional diésel combustion computations. *Twenty six symposium (Internatinal) on combustion/ The combustion institute*, 2517-2524.

B. Chaunan, N. Kumar, H. Muk – A study on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with Jatropha biodiesel oil and its blends – Energy 37 (2012) 616-622

Bhupendra Singh Chauhan a,* , Naveen Kumar a, Haeng Muk Cho. A study on the performance and emission of a diesel engine fuelled with Jatropha biodiesel oil and its blends. Elsevier Energy 37 (2012) 616-622. 2011

- C. Horn, P. F. (1997). *High temperature pyrolysis of phenol*. In 4th International Conference on Chemical Kinetics.
- Cachon, L., & Imhof, D. (2013). NanoMet3, Portable solid nanoparticle counter for vehicle exhaust emissions. *European Aerosol Conference EAC Prage 2013*.
- CONPES. (2008). CONPES 3510. *Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia*. Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia.
- Dean, A. M. (1990). Detailed kinetic modelling of autocatalysis in methane pyrolysis. *The Journal of physical chemistry*, 1432-1439.
- Dekati Ltd. (2012). Elpi+ User Manual.
- Dekati Ltd. (2012). FPS 4000 User Manual.
- Dooley S., H. C. (2008). Autoignition measurements and a validated kinetic model for the biodiesel surrogate, methyl butanoate. *Combustion and Flame*, 2-32.
- Englert, R. (2004). Fine particles and human health—a review of epidemiological studies. *Toxicology Letters* 149 , 235–242.
- EPA Environmental Protection Agency, [2007]. Regulation of Fuels and Fuel Additives: Renewable Fuel Standard Program; Final Rule. Federal register, 72, (83):23900-24014.
- Eran Sher. Handbook of air pollution from internal combustion engines: pollutant formation and control – Academic press (1998).
- European Parliament, Council, [2009]. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable source and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. EUR-Lex Acces to European Union law (Disponibile en: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do>)
- Evangelos Bakeas, Georgios Karavalakis, Stamoulis Stournas. Biodiesel emissions profile in modern diesel vehicles. Part 1: Effect of biodiesel origin on the criteria emissions, Science Direct 2011.
- F. Payri, J. n. (2008). Digital signal processing of in-cylinder pressure for combustion diagnosis of internal combustion engines.
- FACT. (2010). *Fuels for Agricultural in Communal Technology. The Jatropha Handbook*. Retrieved from http://www.fact-foundation.com/en/Knowledge_and_Expertise/Handbooks.

- Frenklach, H. W. (1990). Detailed modeling of soot particle nucleation and growth. *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion/The combustion Institute pages.*, 1559-1566.
- Giraldo H, Velásquez J, Cuartas P. Extracción con solventes y purificación de aceite a partir de semillas de *Jatropha curcas*. *Investigaciones Aplicadas*, Vol 4, No 2 (2010).
- Glaude, V. W. (1998). Computer-aided derivation of gas-phase oxidation mechanisms: application to the modeling of n-butane. *Combustion and Flame*, 81-102.
- Global Market Study on *Jatropha*. World Wide Fund for Nature (WWF). London/Berlin, May 8th, 2008
- <http://www.corpoica.org.co/SitioWeb/Jatropha/Index.asp?Enlace=Home.asp>
- <http://www.guardian.co.uk/environment/2011/may/31/biofuel-plantations-africa-british-firms>
- Golovitchev V.I., J. Y. (2009). Detailed chemical kinetic mechanism for oxidation of four small alkyl esters in laminar premixed flames. *Proceedings of the combustion Institute*, 221-228.
- H. Hiroyasu, T. K. (1983). Development and use of a spray combustion modeling to predict diesel engine efficiency and pollutant emissions (part 1, combustion modelling). *Bulletin of JSME* 26, 569-575.
- H.S. Soyhan, H. Y. (2008). Evaluation of heat transfer correlations for HCCI engine modelling.
- Harrison, J. (2000). Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? *The Science of the Total Environment* 249, 85 - 111.
- Herbinet, W. P. (2008). Detailed chemical kinetic oxidation mechanism for a biodiesel surrogate. *Combustion and Flame*, 507-528.
- Hernández, E. ,. (2014). COMPOSICIÓN DE ÁCIDOS GRASOS EN ACEITES DE MAYOR CONSUMO EN EL PERÚ. *Revista de Investigación UNMSM*.
- Hernández, J. (2006). *Mecanismo de formación de contaminantes en motores de combustión interna*. Medellín, Colombia.
- J. Appel, H. B. (2000). Kinetic modeling of soot formation with detailed chemistry and physics: Laminar premixed flames of C₂ Hydrocarbons. *Combustion and Flame*, 122-136.
- J. Fernández, R. (2008). Estudio bibliográfico y experimental de las emisiones y prestaciones de un motor trabajando con biodiesel. *UCLM*.

- J. L. Emdee, K. B. (1992). A kinetic model of the oxidation of toluene near 1200 K. *Physical Chemistry*, 2151-2161.
- Johanes, H. (n.d.). Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. *Hanny Johanes*.
- Junseok Chang, O. G.-W. (2004). New Heat Transfer Correlation for an HCCI Engine Derived from Measurements of Instantaneous Surface Heat Flux. *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*.
- Karaj, S., & Müller, J. (2011). Optimizing mechanical oil extraction of *Jatropha curcas* L. seeds with respect to press capacity, oil recovery and energy efficiency. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 1010–1016. doi:10.1016/j.indcrop.2011.03.009.
- K. Muralidharan, D. V. (2011). Performance, emission and combustion characteristics of a variable compression ratio engine using methyl esters of waste cooking oil and diesel blends. *Applied Energy Elsevier*, 3959-3968.
- Kennedy, I. M. (1997). Models of soot formation and oxidation. *Science Direct*, 95 - 132.
- Kittelson, D. B. (1997). Engines and nanoparticles: A review. *Journal Aerosol Science*, 575-588.
- Krestini, M. K. (1997). On the mechanism of soot particle formation. *Kinetics and Catalysis* 41-1, 90-98.
- Lee C.S., P. S. (2005). An experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel-Blended Fuels. *Energy & Fuels*, 2201-2208.
- Leung, W. L. (1991). A simplified reaction mechanism for soot formation in nonpremixed flames. *Combustion and flame*, 289-305.
- Lindstedt, R. L. (2005). Joint-scalar transported pdf modeling of soot formation. *Proceedings of the Combustion Institute*, 775-783.
- L.K. Huynh, K. L. (2009). Kinetic modeling of methyl butanoate in shock tube. *The Journal of Physical Chemistry*, 13470-13480.
- Lapuerta M, A. (2004). Utilización de combustibles alternativos en motores térmicos. *Universidad de Castilla, La Mancha, Servicio de Publicaciones*.
- L. Zou & S. Atkinson, Characterising vehicle emissions from the burning of biodiesel made from vegetable oil, *Environmental Technology*. Volume 24, Issue 10, 2003
- Mauricio a. Sierra s., Leonardo Quiñones Cantor y Milton Rodríguez. Uso potencial de las mezclas de biodiesel de *Jatropha* y de palma en Colombia. 2010. Edición de diciembre de 2010, vol. 5, núm. 3.

- Nataly Del Águila, Andrés Mendocilla, Víctor Vásquez. Evaluación por el método de superficie de respuesta del efecto de la temperatura y tiempo de transesterificación en el rendimiento y poder calórico del biodiesel obtenido a partir del aceite de piñón (*Jatropha curcas*). Octubre 2011.
- M. S. Skhoth-Rasmussen, P. G. (2004). Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and soot in fuel-rich oxidation of methane in a laminar flow reactor. *Combustion and Flame*, 91-128.
- Marinov, W. P. (1997). Aromatic and polycyclic aromatic hydrocarbon formation in laminar premixed n-butane flame. *Technical Report, Lawrence Livermore National Laboratory*.
- Montoya, J. P. (2012). *Estudio teórico y experimental de la conversión de un motor diésel a encendido provocado, utilizando como combustible mezclas de biogás y metano*. Medellín: Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia.
- Munack A., S. O. (2001). Comparison of relevant gas emissions from biodiesel and diésel fuel. *The CIGR Journal of Scientific Research and Development*, Manuscript EE 01 001.
- N. Rojas, B. G. (2005). Relación entre pm10 y pm2.5 para la ciudad de bogotá. *Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá D.C.*, 54-60.
- Neoh K.G., H. J. (1981). *Particulate Carbon formation during combustion*. New York: D.C. Siegl and G.W. Smith eds.
- Oleoquímica, B. y. (2015). *Informe: Producción de biodiesel a partir del aceite de Jatropha*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- P.A. Glaude, V. W.-L. (1998). Modeling of the oxidation of n-octane and n-decane using a automatic generation of mechanisms. *Inc. Int J Chem Kinet*, 949-959.
- P.K. Sahoo, L.M. Das, M.K.G. Babu, P. Arora, V.P. Singh, N.R. Kumar, T.S. Varyani – Comparative evaluation of performance and emission characteristics of *Jatropha*, *karanja* and *polanga* based biodiesel – *Fuel* 88 (2009), 1698-1707
- R. J. Kee, F. R. (1987). Technical report, Sandia National Laboratories. *Report Sand*.
- R. P. Lindstedt, G. S. (1997). Chemistry of acetylene flames. *Combustion Science Technology*, 73-137.
- Rakesh Kumar Maurya, D. D. (2011). Digital signal processing of cylinder pressure data for combustion diagnostics of HCCI engine.
- Roberts, R. H. (1999). Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications. *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*.

- Rodríguez, M. (2010). *Modelación de la generación de material particulado en función de la composición del combustible*. Bogotá.
- Rojas., N. (2004). Revisión de las emisiones de material particulado por la combustión de diésel y biodiesel. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, 58-68.
- Sarin, Rakesh; Sharma, Meeta y Malhotra, Sinharay. Jatropha-Palm biodiesel blends: An optimum mix for Asia. In: *Fuel*, 2007, vol. 86, num, 10-11, pp. 1365-1371. ISSN: 0116-2361.
- Sepidar Sayyar, Zurina Zainal Abidin, Robiah Yunus and Azhari Muhammad Extraction of Oil from Jatropha Seeds-Optimization and Kinetics. Department of Chemical and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, UPM 43400 Serdang, Selangor, Malaysia. 2009.
- S. Dooley, H. C. (2008). Autoignition measurements and a validated kinetic model for the biodiesel surrogate. *Combustion and Flame*, 2-32.
- S.G. Davis, C. L. (1999). Propene pyrolysis and oxidation kinetics in a flow reactor and laminar flames. . *Combustion and Flame*, 119.
- Shweta Shah , Shweta Sharma , and M. N. Gupta - Chemistry Department, Indian Institute of Technology, Delhi, Hauz Khas, New Delhi 110016, India *Energy Fuels*, 2004, 18 (1), pp 154–159 DOI: 10.1021/ef030075z Publication Date (Web): January 3, 2004
- Sebastian Hensel, F. S. (2009). A New Model to Describe the Heat Transfer in HCCI Gasoline Engines. *SAE Int. J. Engines*.
- Selvaraj, P. A. (2015). A computational study of ethylene–air sooting flames: Effects of large polycyclic aromatic hydrocarbons. *Combustion and flame*, 1 - 10.
- Tao, F. G. (2004). A phenomenological model for the prediction of soot formation in diésel spray combustion. *Combustion and flame*, 270-282.
- T. Elango, T. Senthilkumar – Combustion and emission characteristics of a diesel engine fuelled with Jatropha and diesel oil blends – *Thermal science* 15 (2011), 1205-1214
- T. Ganapathy, R.P. Gakkhar, K. Murugesan – Influence of injection timing on performance, combustion and emission characteristics of Jatropha biodiesel engine – *Applied energy* 88 (2011), 4376-4386
- USDA United States Department of Agriculture (2006), FAS Foreign Agricultural Service. China Bioenergy.
- Volkammer, P. Z. (2009). Secondary Organic Aerosol Formation from Acetylene (C₂H₂): Seed effect on SOA yields due to organic photochemistry in the aerosol aqueous phase. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 1907-1928.

- Wang W.G., L. D. (2000). Emissions from nine heavy trucks fuelled by diésel and biodiesel blend without engine modificatios. *Environmental Science AND TECHNOLOGY*, 933-939.
- Yate, A. (2013). *Evaluación del proceso de extracción del aceite de Jatropha curcas L. para la producción de biodiesel*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.