Motores estacionarios diesel operados con aceite vegetal crudo de jatrofa y palma

Diesel stationaly enginer operated by crude vegetable oil of jatropha and palm

F. Vargas Álvarez¹

Recibido: 3 de marzo de 2016 Aprobado: 1 de junio de 2016

1. Resumen

La operación de los motores diésel con aceites vegetales crudos como combustible, fue concebido desde su invención; sin embargo, la facilidad de acceso a los combustibles fósiles dejó de lado esta iniciativa, la cual volvió a tomar fuerza a raíz de la crisis de precios del petróleo en los años setenta en adelante. Sumando a lo anterior el hecho de que en Colombia existen vastas zonas con potencial agrícola que no están conectadas a la red eléctrica nacional, donde resulta costoso y difícil disponer de combustible diésel, se hace imperativo proporcionar soluciones energéticas sostenibles y ambientalmente viable.

En este trabajo se utilizó un motor diésel estacionario, de inyección directa, utilizado normalmente en generación eléctrica. Se diseñó, construyó y adaptó un sistema de conversión que permitió operar el motor con aceites vegetales crudos de jatropha y palma, tomando el diésel comercial, como referencia de comparación para todos los parámetros analizados.

La experimentación se realizó en dos condiciones, primero a régimen de giro constante y tres grados de carga y la segunda a grado de carga constante y tres regímenes de giro. Las variables medidas más importantes fueron: eficiencia energética, emisiones contaminantes y análisis químico, morfológico, citotóxico y mutagénico del material particulado.

El consumo específico de combustible (gef) incrementó con ambos aceites crudos respecto del combustible de referencia. Lo anterior obedece a su menor poder calorífico. El dosado relativo (Fr) aumentó, como era de esperarse, con el grado de carga y con el régimen de giro. Esto se explica por la mayor cantidad de combustible inyectada dentro del cilindro. Consecuentemente la temperatura de gases de escape incrementó en ambas situaciones.

¹ Fabian.vargas@pascualbravo.edu.co. Institución Universitaria Pascual Bravo, facultad de ingeniería, departamento de mecánica automotriz.

F. Vargas Alvarez. "Motores estacionarios diesel operados con aceite vegetal crudo de jatropha y palma". Revista CINTEX. Vol. 21, N° 1, pp. 45-70. 2016.

El tiempo de retraso disminuyó con el grado de carga para todos los combustibles debido al incremento en la temperatura media al interior del cilindro, esto se debió probablemente al contenido de oxígeno extra que aportan los aceites, lo que redujo el tiempo de retraso químico. La presión y temperatura máxima de combustión resultaron ser mayores con los aceites. Esto podría obedecer a que la cantidad de combustible inyectada por ciclo y por cilindro era mayor en el caso de los aceites, ya que tienen menor poder calorífico.

Las emisiones de CO y THC (Hidrocarburos totales sin quemar) aumentaron, mientras que las de NOx no variaron significativamente, por su parte la emisión de material particulado incrementó significativamente con el uso de aceites frente al diésel.

Los ensayos en el material particulado MP permiten concluir que en las partículas de hollín de los aceites hay más materia volátil pero esta se encuentra en forma líquida sobre las partículas (impregnados). Y en las pruebas biológicas se encontró finalmente que el material particulado proveniente de la combustión de aceites era más citotóxico y menos mutagénico que el del diésel.

Terminadas las pruebas se desmontó el múltiple de escape, la culata y las válvulas de uno de los cilindros con el fin de realizar una inspección visual. Se encontró en estas piezas depósitos de carbón con espesores hasta de 4 mm, la pieza con mayor espesor de depósitos de hollín fue el múltiple de escape.

Palabras claves Aceite vegetal crudo, motores diésel, combustión, emisiones, material particulado.

1 Abstract

Initially diesel motors were designed to operate with vegetable fuels; however, the easy access to fossil fuels at the end of 1800 lived out this alternative. Biofuel was gaining strength from the fuel price crises in the seventies onwards. Furthermore, Colombia has few huge zones with agricultural potential that does not have interconnection to the national electric systems; on these zones to have diesel fuel it is difficult and expensive and it is imperative to proportionate sustainable energetic solutions, environmentally feasible to solve electricity lack on remote areas or areas not interconnected to the National Energy System.

On this study, the engine was a stationary diesel motor, with direct injection to generate electricity. A conversion system was designed, built and adapted, which allowed the engine to operate with raw vegetable fuels derived from jatropha and palm. To compare the obtained results, commercial diesel fuel was used as reference to analyze all the studied parameters.

The experiment was done under two conditions, first a constant engine running speed and three utilization degrees and the second condition was three engine running speeds and constant utilization degree. The measured variables were energetic efficiency, contaminant emissions, chemical, morphological, cytotoxic and mutagenic analysis of the particulate material.

The specific fuel consumption (gef) increased on both raw oils regarding the reference fuel. This is partly due to a lower calorific value. The Fr (Relative Fuel/Air ratio) increased, as it

was expected directly proportional with the utilization degree and the engine running speed. Consequently, the exhaust gases temperature increased on both situations.

The delay time decreased with the utilization degree in all diesel due to the average temperature increase into the cylinder, this was due probably to the extra oxygen content provided by the oils, which reduce the chemical delay time. Pression and maximal temperature of combustion appeared to be highest with oils. This could be due to the injected diesel amount by the cycle and per cylinder was highest because have lower calorific value.

CO and THC (Total hidrocarbure not burned) emissions increased, whereas NOx emissions does not varies significantly and particulate material emission (MP) increased significantly with the use of oils regarding diesel use.

MP tests allow to conclude that on oil soot particles there is more material that is volatile but this is on liquid state impregnated on particles.

On the biological tests, it was found that oil burning was more cytotoxic and less mutagenic than diesel.

Finally, the engine performance was satisfactory because does not made noise or rattling because of the use of raw vegetable oils. Once the test were finished, the engine exhaust manifold was disassembled as well as the head and the valves of one of the cylinders. The objective of this disassembling was to realize a visual inspection and carbon stores were found with thickness up to 4 mm. The engine part with highest soot thickness was the engine exhaust manifold

Key words Raw vegetable oil, diesel engine, burning, emission, particle material

2 Introducción

Para ciertas poblaciones rurales de Colombia alejadas del sistema de conexión eléctrica, los motores diésel acoplados a un generador se convierten en la única alternativa para obtener el suministro eléctrico^[1].

El cultivo de aceite de palma en Colombia se ha incrementado desde los años 60 con 18.000 hectáreas en esa época, hoy existen más de 360.000 hectáreas en 73 municipios del país distribuidos en cuatro zonas productivas: Norte, Central. Oriental, Sur occidental [2], Colombia en la actualidad es el primer productor de palma de aceite en América Latina y el cuarto en el mundo. [3]

Algunas alternativas en la producción de biocombustibles son la gasificación de biomasa, licuefacción, transesterificación de grasas animales y el uso de aceites crudos de origen vegetal con la visión del uso eficiente como combustible en motores diésel [4].

Las principales características reportadas en estudios sobre el uso de aceites crudos en motores diésel ha sido sobre las diferencias que se presentan entre los combustibles, debido a que los motores son sensibles a la calidad de los aceites utilizados, ya que presenta atraso en la ignición y disminución de la potencia debido a la mayor densidad y viscosidad en los aceites, tienen menor poder calorífico, mayor punto de llama, mayor densidad y viscosidad. [5]

Las primeras experimentaciones en Brasil con aceites crudos, fueron en motores diésel de aspiración natural aplicados a generación eléctrica. El uso de aceite de palma crudo mostró que estos motores que presentaron atraso en la ignición y disminución de la potencia debido a la mayor densidad y viscosidad en los aceites. El aceite crudo de palma tiene menor poder calorífico, mayor punto de llama, mayor densidad y viscosidad. Para mejorar estas propiedades físicas del aceite, se calentó hasta 85°C, con el objetivo de disminuir su viscosidad a un valor cercano al del diésel a temperatura ambiente, [6]

El aceite crudo de palma puede afectar la durabilidad del motor, en estudios realizados en la India, sobre el efecto del uso de mezclas de combustible diésel y aceite de palma en las partes del motor, se encontró, abundantes depósitos de carbón en la cámara de combustión, marcas de desgaste en los anillos del pistón, en las partes de la bomba de inyección y desigual pulverización en las toberas del inyector, la pieza que más desgaste mostró por el uso del aceite vegetal fueron en las válvulas de admisión causado por los depósitos de carbón en los asientos de las válvulas, esto puede afectar el rendimiento del motor hasta un 20%. [6,7]

El aceite crudo de jatropha se está utilizado cada vez más en motores de encendido por compresión, y se han planteado parámetros de calidad que exija a los fabricantes de aceites que tengan ciertas normas de calidad similares a la del diésel, con el objetivo de que el funcionamiento de los motores con estos combustibles muestren una verdadera rentabilidad económica en su mantenimiento y operación. [8,9,11]. La importancia del uso de aceite crudo de jatropha consiste en que no es comestible y no compite con la canasta alimenticia y hace parte de un grupo de aceites entre ellos la karanja, mahua, linaza, semillas de caucho, algodón y neemoils que han sido estudiados como alternativa para ser explotados como combustible sustituto del diésel. [12,13,14]

En pruebas realizadas con ratones, células y órganos internos de estos, se pudo comprobar los efectos mutagénicos y citotóxicos de los gases de escape y del material partículado emitido en motores diésel operados con aceite de colza. El material partículado se recogió con filtros de fibra de vidrio recubiertos con plástico, en un mini túnel de dilución parcial utilizando diferentes ciclos de pruebas en motores montados en un banco dinamométrico. Se encontró aumento significativo de mutaciones para los extractos de partículas de ambos combustibles, pero para el diésel fue significativamente mayor, los valores más altos se encontraron en pruebas de arranque en frio, probablemente debido a la combustión incompleta en el motor en frio, los resultados indicaron una mayor capacidad de reacción mutagénica en las emisiones del diésel en comparación del diésel de colza, probablemente debido al menor contenido de compuestos aromáticos [15,19,20]

3 Montaje experimental

Se utilizó un motor Diésel de inyección directa marca HATZ de uso estacionario refrigerado por aire acoplado a un freno hidráulico GO-POWER SYSTEM SN RD2192 en un banco de ensayos instrumentado para medir y controlar sus principales variables, Figura 1. Las características técnicas del motor se mencionan en la Tabla 1.

TABLA 1: DATOS TÉCNICOS DEL MOTOR

| Configuración/tipo motor | 2 Cilindros/ 4 tiempos |
|--------------------------|-------------------------------|
| Desplazamiento | 912 cm ³ |
| Diámetro /carrera | 88/75 (mm) |
| Relación de compresión | 20:1 |
| Longitud de biela | 150 mm |
| Inyección | Directa |
| Aspiración | Natural |
| Par máximo | 43 N-m con combustible diésel |

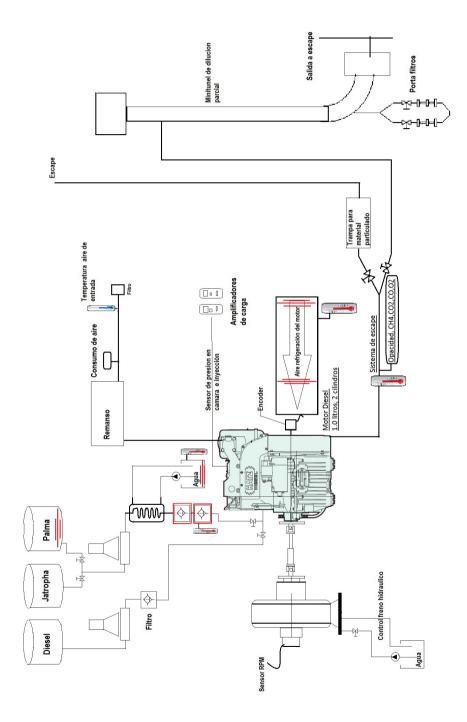


FIGURA 1. MONTAJE EXPERIMENTAL

Se diseñó, construyó y adaptó un sistema de conversión que permitió operar el motor con aceites vegetales crudos de jatropha y palma, tomando el diésel comercial, el cual tiene 10% de biodiesel de aceite de palma, como referencia de comparación para todos los parámetros analizados. Se mantuvo la temperatura de los aceites crudos a 80°C con el uso de resistencias en el tanque de combustible y en los filtros antes del ingreso a la bomba de inyección, esta temperatura de precalentamiento de los aceites se determinó de acuerdo a la temperatura promedio de operación de los motores de combustión interna con el objetivo de disminuir su viscosidad a un valor cercano al del diésel a temperatura ambiente [16]. Las propiedades de los combustibles utilizados se mencionan en la Tabla 2.

TABLA 2: PROPIEDADES DE LOS ACEITES UTILIZADOS [17,18]

| Combustible | Fórmula química | % Peso de O2 | Poder calorífico inferior PCI (kJ/kg) | Densidad (kg/m3) |
|--------------------|------------------------------|-----------------|---|---------------------|
| Diésel | C15.0371 H29.4106 O0.1975 | 1.2 | 42.580 | 841.7 |
| Aceite de Jatropha | C57 H104 O6 | 11.06 | 37.071 | 917 |
| Aceite de Palma | C51 H98 O6 | 11 | 36.543 | 875 |

La experimentación se realizó en dos condiciones, primero a régimen de giro constante (1800 min⁻¹) y tres grados de carga (15, 25 y 35 Nm) y la segunda a grado de carga constante (25Nm) y tres regímenes de giro (1800, 2400 y 3000 min⁻¹). En cada uno de los 21 ensayos: (3 combustibles x 3 velocidades) + (3 combustibles x 3 pares) + (3 pruebas de repetibilidad). Las variables de los ensayos se muestran en la Tabla 3.

TABLA 3: VARIABLES DE LOS ENSAYOS

| Parámetro | Unidad | Precisión | Incertidumbre |
|---------------------|--------|-----------|---------------|
| Consumo combustible | g | ± 0.1 | - |
| Consumo de aire | % | ± 1.2 | - |
| Par | Nm | ± 1 | - |
| Régimen de giro | min-1 | ± 3 | - |
| СО | % | ± 0.1 | - |
| THC | ppm | ± 1 | - |

| CONTINUACIÓN TABLA 3: VARIABLES DE L | OS ENSAYOS |
|--------------------------------------|------------|

| Parámetro | Unidad | Precisión | Incertidumbre |
|-----------------------------|--------|-----------|---------------|
| NOx | ppm | ± 1 | - |
| Temperatura de aire y gases | K | ± 1 | - |
| Gef | g/kWh | - | 15.7 |
| Rendimiento efectivo | % | - | 0.0012 |
| Dosado absoluto | | - | 0.00032 |

El procedimiento se realizó de forma que en cada prueba las condiciones fueran iguales. Luego de encender el motor se dejó en operación más de 20 minutos para que llegara a su temperatura de trabajo, en este punto se fija el régimen y par deseado para la prueba y se deja que se estabilice nuevamente, en estas condiciones se procede a hacer las mediciones de las variables. Garantizando en cada punto de medición el mismo procedimiento. En la Tabla 4 se mencionan las variables de ensayo y los equipos utilizados en la experimentación.

TABLA 4: VARIABLES DE ENSAYO, EQUIPOS UTILIZADOS E INCERTIDUMBRE MÍNIMA DE LOS EQUIPOS

| Medida | Equipo de medición | Incertidumbre mínima |
|---------------------------------|--|----------------------|
| Consumo combustible | Balanza electrónica (Shimatzu) | 0.1 g |
| Consumo de aire | Sensor de hilo caliente(- Thermatel TA2 Mass Flow Transmitter) | 1.2% de la lectura |
| Torque | Celda de carga | 1 Nm |
| Revoluciones por minuto | Sensor de efecto Hall | 5 min-1 |
| Monóxido de carbono (CO) | AVL Dicom 4000 | 0.01% Vol. |
| HC hexano (ppm)en volumen | AVL Dicom 4000 | 1 |
| NOx (ppm)en volumen | AVL Dicom 4000 | 1 |
| Presión en cámara de combustión | Cadena de Combustión Kistler (5011B) | 4.3 pC/N |
| Presión de inyección | Cadena de Combustión Kistler (5011B) | 4.3 pC/N |

CONTINUACIÓN TABLA 4: VARIABLES DE ENSAYO, EQUIPOS UTILIZADOS E INCERTIDUMBRE MÍNIMA DE LOS EQUIPOS

| Medida | Equipo de medición | Incertidumbre mínima |
|--|---|----------------------|
| Ángulo de giro de cigüeñal | Codificador angular (HEIDENHAIM) | 1/1024 pulso/rev. |
| Material particulado (Morfología) | Minitunel de dilución parcial (Ricardo) | Grado de dilución 10 |
| Material particulado (Pruebas químicas) | Trampa de paso (desarrollo propio) | NA |

Después de cada prueba con los aceites, se retiró todo el combustible de las líneas de alimentación del motor, se realizó el cambio de combustible y reinicio la prueba siguiente. La obtención de las curvas de presión en cámara y presión de inyección se obtuvieron utilizando sensores piezoléctricos instalados en la cámara de combustión y en la línea de presión antes del inyector, y un codificador angular adaptado al cigüeñal. Se capturaron 100 curvas por prueba para obtener un promedio de la curva para el análisis de diagnóstico de combustión. Con una tarjeta de adquisición de datos de la National Instrumens con puerto USB, se almaceno en un computador todos los datos de las pruebas.

En las emisiones contaminantes se utilizaron los equipos mencionados en la Tabla 4. Para las pruebas de toxicidad y mutagenidad se utilizó una trampa para el material particulado, en tres modos de las pruebas por un tiempo de dos horas.

4 Resultados y discusión

El análisis de resultados de desempeño energético y ambiental, se basó en la evaluación comparativa entre el combustible de referencia (diésel comercial adquirido en una estación de servicio) y aceite crudo de jatropha y palma.

4.1 Prestaciones mecánicas

4.1.1 Consumo específico de combustible (gef)

Indica la masa de combustible necesaria para producir una unidad de potencia en el eje

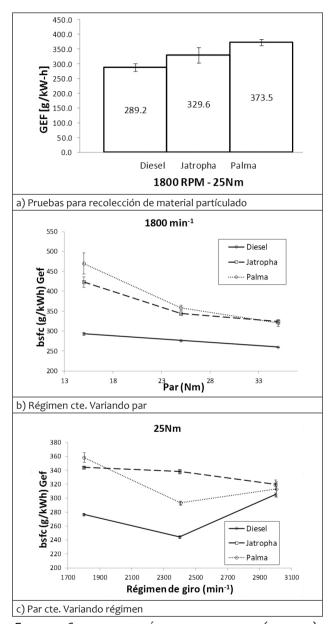


FIGURA 1: CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE (BSFC-GER).

En la Figura 1a, pruebas realizadas para la recolección de material particulado se observa que el combustibles de jatropha y palma produjeron un aumento en torno al 14% y 29.1% respectivamente en el consumo específico de combustible frente al combustible de referencia. El combustible de mayor

aumento el consumo fue el aceite de palma, este incremento de consumo se da para obtener el mismo par en el eje 25 Nm a 1800 RPM.

En la Figura 1b, se observa que a régimen constante y variando el par, presenta la tendencia de disminuir el *gef*, esto se da por el aumento de la temperatura en el cilindro que permite que el motor se acerque a la zona de menor consumo, el incremento del *gef*, en los aceites con referencia al diesel, se debe al menor poder calorífico y menor eficiencia del proceso de combustión. En la Figura 1c, a carga constante y variando régimen se obtuvo un comportamiento típico de la curva cóncava del *gef* para todos los combustibles, esto se explica que a bajo régimen el gef se incrementa por la mayor pérdida de calor por las paredes del cilindro, y en el caso de alto régimen este incremento se da por las pérdidas mecánicas.

Eficiencia de conversión de combustible (ηf)

Es la medida de la eficiencia con la que el motor convierte la energía química del combustible en potencia en el eje.

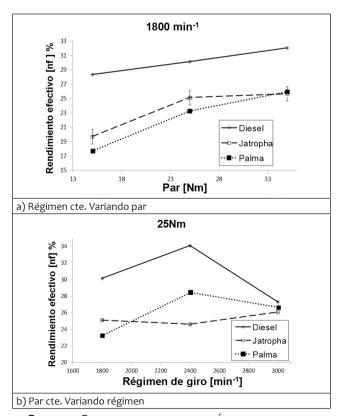


FIGURA 2. RENDIMIENTO DE CONVERSIÓN DE COMBUSTIBLE

En la Figura 2a, a régimen constante e incrementando carga, se observa que los tres combustibles presentan tendencia a aumentar el rendimiento efectivo del combustible (ηf), esto ocurre por el incremento de temperatura en el cilindro, por lo que se requiere entregar menos calor para obtener la energía que da el combustible. El ηf disminuyo con ambos aceites crudos respecto del combustible de referencia, El aceite de jatropha produjo una disminución en torno al 2.1% y el aceite de palma produjo una disminución en torno al 21.5% en la eficiencia de combustión frente al combustible de referencia, esto se debe al menor poder calorífico de los aceites. En la Figura 2b, este tiene el comportamiento inverso del gef, que se explicó anteriormente.

4.1.2 Temperatura de gases de escape

La temperatura de los gases de escape se midió a la salida del cilindro del motor.

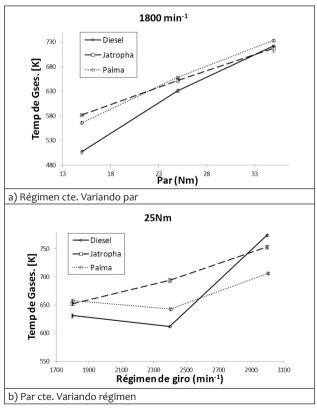


FIGURA 3. TEMPERATURA DE GASES

En la Figura 3a, a régimen constante y variando carga, El aceite de jatropha y palma produjeron aumento en la temperatura de gases de escape del 4.6% y 5.4% respectivamente. A mayor carga las temperaturas de los gases de escape tienden a ser similares para los tres combustibles, esto ocurre por el aumento de transferencia de calor al cilindro al aumentar el número de detonaciones por unidad de tiempo. La temperatura de gases de escape aumentó más con ambos aceites crudos respecto al combustible de referencia. Esto se debe al mayor contenido de oxigeno que hay presente en la combustión y al mayor grado de instauración.

En la Figura 3b, a par constante y variando régimen los tres combustibles presentan aumento en la temperatura de gases de escape. Esto se explica que para aumentar régimen hay que inyectar más combustible en el cilindro, es más energía que se convierte en calor que se transfiere a las paredes. Los dos aceites crudos presentaron mayor temperatura de gases de escape, esto se debe al mayor contenido de oxigeno que hay presente en la combustión y al mayor grado de instauración de los aceites crudos.

4.1.3 Dosado absoluto (F.abs)

El Dosado absoluto es la relación combustible/aire real, que entra al motor.

En la Figura 4a, los Aceites de jatropha y palma produjeron aumentos del 8.3% y 22.9% respectivamente en el *F.abs* frente al combustible diésel de referencia. El Aceite que provocó mayor aumento en el *F.abs* es el aceite de palma con 22.9%. Obsérvese que el diésel y los aceites de jatropha y palma presentaron diferencias estadísticas. Como era de esperarse los resultados de dosado absoluto mostraron una variación o tendencia similar a la observada en la temperatura de gases de escape, debido a que esta última depende directamente de la cantidad de combustible inyectado al motor. En la Figura 4b los aceites crudos presentan mayor *F.abs* con referencia al diésel, la razón de este comportamiento se debe al menor poder calorífico de los aceites, como consecuencia se debe inyectar mayor cantidad de combustible para obtener la misma potencia en el eje.

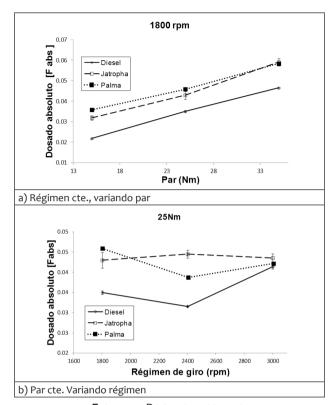


FIGURA 4. DOSADO ABSOLUTO.

4.2 Diagnóstico termodinámico

4.2.1 Presión en cámara de combustión.

El gradiente de presión máxima es un indicativo del ruido producido por el motor, a menor gradiente, menor ruido, la presión en cámara se ve afectada por el régimen, par y tipo de combustible. [21]

En la Figura 5a y 5b se muestran las curvas de presión en cámara de combustión, para las pruebas con régimen constante y variando par, y las curvas a par constante y variando régimen, en cada una de ellas se muestra las curvas de cada combustible utilizado en las pruebas con referencia del diésel.

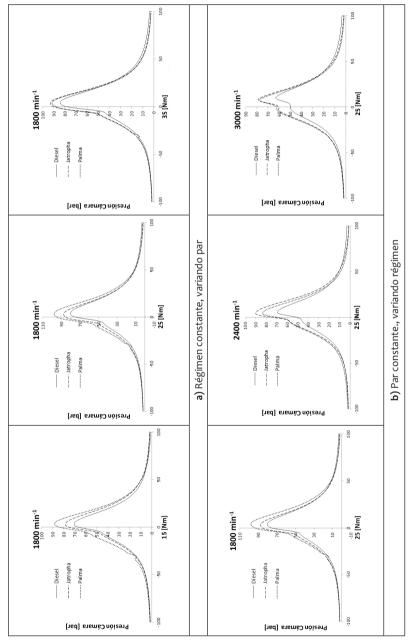


FIGURA 5. CURVAS DE PRESIÓN EN CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

Los aceite de jatropha y palma presentaron mayor presión en la cámara frente al combustible diésel de referencia. Esto se da por la mayor cantidad de aceite crudo inyectado para obtener la misma potencia deseada, el aumento de la presión se debe al aumento de la temperatura en el cilindro y el mayor contenido de oxígeno en los aceites crudos. además en conjunto con la temperatura media permiten interpretar el comportamiento de la formación de NOx en el motor, a mayor temperatura habrá incremento de NOx. [22,23]

4.2.2 Ángulo de inicio de inyección

El ángulo de inicio de inyección se toma con referencia al punto muerto superior (pms) del motor, los valores de los grados se miden antes del pms, esta información se obtuvo con el uso del sensor de presión piezoeléctrico instalado en la tubería del combustible en la entrada del inyector y un codificador angular instalado en el cigüeñal, con estas dos señales, caída de presión en la tubería de combustible y posición del cigüeñal se obtiene el ángulo de inicio de inyección. [21]

En la Figura 6a y Figura 6b, se observó que los combustibles al incrementar el grado de carga a régimen constante, se producía una disminución en el ángulo de inicio de inyección, pero a bajos regímenes los aceites crudos presentaron menor ángulo de inicio de inyección, a regímenes de 2400 min¹ presentaron valores cercanos entre sí, a altos regímenes es inverso el comportamiento, se tienen mayores ángulos de inicio de inyección con los aceites crudos de jatropha y palma.

Esto se debe a la mayor densidad de los aceites crudos, que al ser comprimidos transmiten más rápidamente la señal de presión dentro del inyector y se da más rápidamente la apertura del inyector.

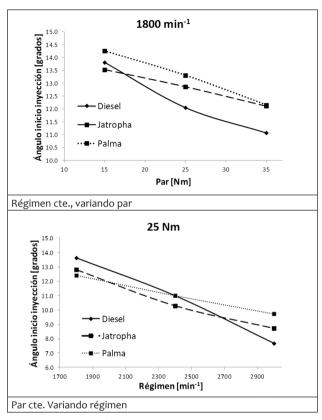


FIGURA 6. ÁNGULO DE INICIO DE INYECCIÓN

4.3 Emisiones gaseosas

4.3.1 Óxidos de nitrógeno (NOx)

Estos compuestos se producen durante la combustión por reacción entre oxígeno atómico y nitrógeno, son dependientes de la temperatura.

En la Figura 7, se observa aun con la variación de carga o régimen, una leve disminución de la emisión de NOx, con respecto al combustible de referencia. También esta disminución se puede dar por el mayor contenido de oxigeno del aceite crudo que hace que el motor trabaje con dosados globales más pobres, permitiendo menores temperaturas en la cámara de combustión [16].

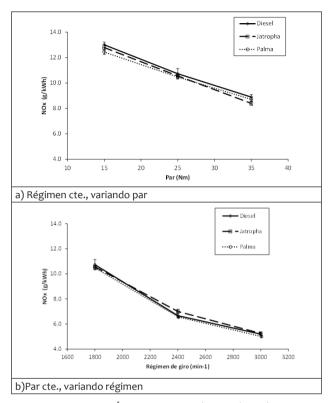


FIGURA 7: ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NOX).

4.3.2 Material Particulado Específico (spm)

El análisis del Material Particulado Específico (spm) siglas en inglés, de los gases de escape diluidos, Bajo la norma CEE-49 (Comunidad Económica Europea).

El material particuládo puede ser solido o líquido y está compuesto por una fracción insoluble que puede tener compuestos orgánicos e inorgánicos, en la que prevalecen el carbono (hollín), sulfatos, sales, agua y otros materiales orgánicos que dependen del combustible y por una fracción orgánica soluble (SOF) compuesta por hidrocarburos pesados provenientes del combustible y del aceite lubricante [17].

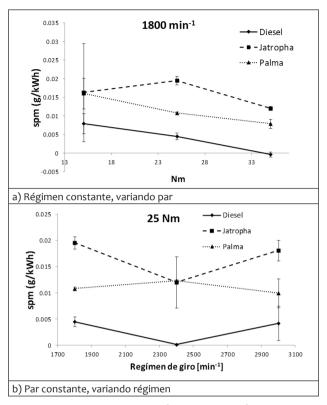


FIGURA 8. MATERIAL PARTÍCULADO ESPECÍFICO SPM

En la Figura 8a, se observa que independiente del tipo de combustible, al incrementar el grado de carga a régimen constante se produce una disminución en el material particuládo (hollín), se puede dar por la cinética química de las primeras fases de la combustión que hace que el tiempo de retraso sea más corto, permitiendo que se avance el momento de inicio de combustión lo que da más tiempo para la oxidación de las partículas. En la Figura 8b, a par constante y variando régimen se observa que el comportamiento de las emisiones es cóncava, esto muestra el punto de mejor operación del motor. El hollín se incrementó con ambos aceites crudos respecto al combustible de referencia, esto se debe a las características propias de los aceites como su viscosidad, poder calorífico entre otros.

Estos resultados indican que con el uso de aceites vegetales crudos de jatropha y palma es evidente el incremento en el material particuládo en las

emisiones del motor, este aumento del hollín tiene consecuencias en las partes mecánicas del motor. Se encontraron depósitos de hollín con espesores de hasta 3mm en los cuellos de las válvulas, múltiple de escape, cabeza del pistón y los inyectores.

4.4 Hidrocarburos (THC)

La emisión hidrocarburos totales en caliente (TCH), suele ser muy pequeña en motores diésel convencionales debido a su principio de operación (mezclas globales pobres con condiciones de llama difusiva con contorno estequiométrico).

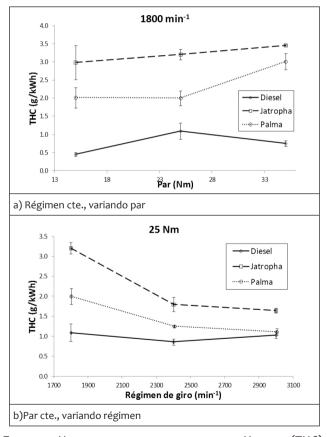


FIGURA 9. HIDROCARBUROS TOTALES EN BASE HEXANO (THC).

En la Figura 9^a, y 9b se encontró un aumento significativo en la emisión de THC, Los Aceites de jatropha y palma produjeron un aumento en torno al

86.3% 113.9% respectivamente en las emisiones de HC frente al combustible de referencia. Este valor continúa siendo muy bajo como emisión global del motor. No obstante, este incremento se puede explicar por una combustión más incompleta generada por el uso de los aceites crudos. Y el mayor contenido de oxígeno en la molécula de los aceites

4.5 Morfología y composición química del hollín

Al comparar visualmente los hollines de los combustibles utilizados en las pruebas se encontró que el aspecto del hollín del diésel era suelto, seco y opaco, el hollín del aceite de jatropha presento una apariencia un poco más aglomerada y brillante, y el hollín del aceite de palma presentó una apariencia húmeda, brillante y formaba grumos fácilmente.

Los resultados de esta prueba de fracción orgánica volátil son entregados por la balanza TGA. La prueba consiste en calentar las muestras por un periodo de tiempo y determinar qué cantidad de marial se evapora o volatiliza y se compara por pérdida de peso. En la Figura 10 se observa las curvas del hollín de los tres combustibles, se tiene que el peso inicial se considera un 100% y al final de la prueba las curvas representan la cantidad de masa perdida.

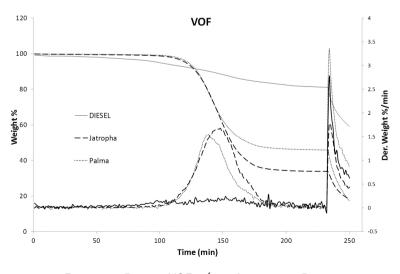


FIGURA 10. PRUEBA VOF DIÉSEL, JATROPHA Y PALMA

En la Figura 10, se observa la curvas de desvolatilización del hollín de los aceites crudos de jatropha y palma pierden peso más rápidamente que el hollín del combustible diésel, esto indica que la naturaleza del material particulado de los aceites crudos y el diésel son muy diferentes entre sí.

4.6 Actividad genotóxica

Cada uno de los extractos se diluyó en dimetilsulfoxido (DMSO), se trató 50.000 células con diluciones logarítmicas: 500, 50, 5, 0.5 y 0.05 de µg equivalentes de material particulado MP total, el tratamiento fue por 1 hora. En la Figura 11, aunque los tres combustibles presentaron alta actividad genotóxica, se encontró que está actividad es mayor en el combustible diésel, probablemente debido al incremento en las especies reactivas, también a los hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA) adheridos al MP y contenidos en el material orgánico extraíble. He et al [18], encontraron HPA característicos para diésel, biodiesel o biocombustible. También Krahl et al [19], encontraron diferencias entre las emisiones y en la actividad mutagénica del diésel, biodiesel y biocombustible de origen vegetal. Para determinar si el contenido de HPA es diferente en cada MP proveniente los combustibles usados en esta investigación, es necesario hacer caracterización química de cada MP.

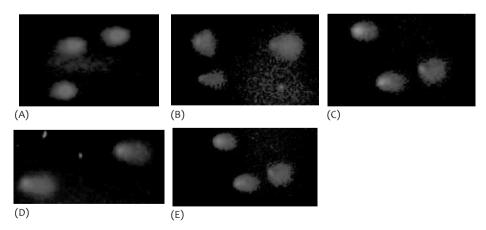


FIGURA 11. NÚCLEOS ALTAMENTE DAÑADOS CON LA DOSIS 5 µG EQUIVALENTES DE MP. (A). CONTROL NEGATIVO, (B) CONTROL POSITIVO. (C) COMBUSTIBLE DIESEL, (D) COMBUSTIBLE PALMAY (E) COMBUSTIBLE JATROPHA

5 Conclusiones y consideraciones finales

La operación del motor con los aceites crudos de Jatropha y palma fue estable, no presentó variaciones significativas de potencia, variaciones instantáneas (cascabeleo) de régimen o apagado espontaneo. El encendido del motor posterior del uso de los aceites no presento inconvenientes, se considera que se obtuvieron resultados muy positivos que estimulan al uso de este tipo de energía alternativa como solución a regiones no interconectadas

En la Tabla 5, se resume los resultados más significativos de las pruebas y sus conclusiones.

TABLA 5. TABLAS DE CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

| Conclusiones | | |
|--|-----------|---|
| Variable | Resultado | Observaciones |
| Consumo especifico de combustible GEF | - | El consumo especifico es mayor con los aceites crudos, esto es de esperarse ya que tienen un poder calorífico menor, el mayor incremento se presentó a bajas revolu- ciones, jatropha 445 a 15Nm, Palma59% a15Nm |
| Eficiencia de conver- sión de combustible | - | En la eficiencia de conversión de combustible los aceites de jatropha y palma se encontraron por debajo de la efi- ciencia del combustible diésel en un 30% |
| Temperatura de gases de escape | + | El incremento máximo con los aceites se presentó por encima del combustible diésel en un 30 y 25% con aceite de jatropha y palma respectivamente, aunque no se pre- sentó incremento en las emisiones de NOx |
| Dosado absoluto | - | El dosado está ligado al consumo de combustible si el consumo aumenta el dosado también aumenta, se en- contraron variaciones del 46 y 64% con aceite de jatro- pha y palma respectivamente |
| Duración de la combustión | + | |
| Tiempo de retraso | + | Hay menor tiempo de retraso con los aceites crudos, esto se debe a la densidad de los combustibles. |
| Presión en cámara de combustión | + | A pesar de lo los aceites crudos tienen menor poder ca- lorífico, se obtuvo mayores presión es en la cámara de combustión, esto se debe al mayor contenido de oxigeno |
| Fracción de calor liberado FQL | + | Se presenta adelanto en la fracción de calor liberado, esto se debe a que está directamente relacionado con los pará- metros anteriormente mencionados |
| Emisiones | | |
| Óxidos de nitrógeno NOx | + | A pesar de que hay aumento de temperatura y mayor presión en cámara, se presentó menores valores de NOx con los aceites de jatropha y palma |

| CONTINUACIÓN TABLA 5. | Tablas de conclusiones y observaciones |
|-----------------------|--|
|-----------------------|--|

| Conclusiones | | | |
|--|-----------|---|--|
| Variable | Resultado | Observaciones | |
| Hidrocarburos THC | - | Con los aceites de Jatropha y palma se presentó mayor hidrocarburos, esto se evidencia en el estudio de los ho- llines y en las pruebas de TGA | |
| Material particulado | - | Se encontró que hay mayor emisión de partículas con los aceites de jatropha y palma, y se encontró | |
| Prueba VOF (fracción orgánica volátil) | | Con esta prueba se comprobó el alto contenido de material volátil o combustible si quemar en el hollín de los aceites de jatropha y palma | |
| Actividad genotó- xica en linfocitos humanos | + | Los resultados muestran que los tres combustibles p sentan actividad genotóxica, el combustible diésel tie mayores valores. Para poder hacer una discusión men general y más asociada con los resultados hay que o codificar los combustibles y poder atribuir las diferent respuestas al diésel o a cada biocombustible usado | |

6 Agradecimientos

Me complace hacer el reconocimiento y agradecimiento al Grupo GIMEL, al profesor John Ramiro Agudelo Santamaría director del grupo de investigación del área de máquinas térmicas, a la Universidad de Antioquia, y la Universidad de Castilla-La Mancha, por sus aportes en el desarrollo de esta investigación

7 Referencias

- [1] UPME, Informe de avance del plan, normalización para aplicaciones de energias alternativas y difusion. Unidad de Planeacion Minero-Energética. Colombia." GAS Vol. 2. Pp. 46, 2005.
- [2] Benjamín, V., Rincón, M., Prada, S. M., Hormaza, F., Moreno, P. A., Leidy, P., ... & Romero, G.. Palma de aceite en Colombia (No. D-2123). Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma [Colombia], 2013.
- [3] E. Pedraza, D.Salinas. "Caracerizacion morosiologica de jatripha L. Variedad Brasil cultivada en dos zonas de Colombia". Acta Agronómica. Vol 59. Iss. 1 p 30-36, 2010.
- [4] Benjumea. P. ,Agudelo. J., Rios, L. BIODIESEL: Producción, calidad y ca¬racterización. Ed. Universidad de Antioquia. ISBN:978-958-714-347-8, 2009.
- [5] O.M.I. Nwafor "The effect of elevated fuel inlet temperature on performance of diesel engine running on neat vegetable oil at constant speed conditions". Renewable energy, Vol. 28 lss. 2,Pg. 171-181, 2003.

- [6] O.M.I. Nwafor. "The effect of elevated fuel inlet temperature on performance of diesel engine running on neat vegetable oil at constant speed conditions". Renewable Energy. Vol. 28. Pg 171–181, 2003.
- [7] Pimentel, V.S.B., Analysis of the use palm Oil as Fuel In Diesel Generators. COPPE, 2004.
- [8] Belchior, C.R.P., The use of pal oil in diesel engine COBEM, 2005.
- [9] Dhar, A. Experimental Investigations of Preheated Jatropha Oil Fuelled Direct Injection Compression Ignition Engine—Part 1: Performance, Emission, and Combustion Characteristics. JAI, 2010.
- [10] S. Bari, C.W., "Performance deterioration and durability issues while running a diesel engine with crude palm oil". SAGE, 2002.
- [11] Jan de Jongh, A.T.A., Jatropha oil quality related to use in diesel engines and refining methods. Technical Note, 2007.
- [12] S. Y. No. "Inedible vegetable oils and their derivatives for alternative diesel fuels in CI engines: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15. Pg. 131–149, 2011.
- [13] K. Pramanik. "Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in com-pression ignition engine". Renewable Energy, Vol. 28: p. 239–248, 2003.
- [14] Guenter Elsbett, M.B., Engines running on pure vegetable oil as regrowing fuel History, Development, Experience, Chances. Presentation for Shanghai International Sympo¬sium on I.C. Engine Vol 32 p. 1-18, 2003.
- [15] Jürgen Bünger, Jürgen Krahl, Hans-Ulrich Franke, Axel Munack, Ernst Hallier, Mutagenic and cytotoxic effects of exhaust particulate matter of biodiesel compared to fossil diesel fuel. Mutation Research Vol. 415. Pg. 13–23, 1998.
- [16] M. Lapuerta, O. Armas, R. Ballesteros, "Diesel particulate emissions from biofuels deri-ved from spanish vegetable oils" SAE paper Vol 01: p. 1657-2002., 2002.
- [17] Agudelo, M.I.P.J.R., Utilización de combustibles alternativos en motores térmicos. Modulo 2: p. 119-124, 2004.
- [18] G. H. He, J. Tan, K. You, X. Han, J. Wang. "Characteristics of polycyclic aromatic hydro¬carbons emissions of diesel engine fueled with biodiesel and diesel". Fuel. Vol. 89: p. 2040–2046, 2010.
- [19] J. Krahl, G. Knothe, A. Munack, Y. Ruschel, O. Schröder, E. Hallier & J. Bünger. "Comparison of exhaust emissions and their mutagenicity from the combustion of biodiesel, vegetable oil, gas-to-liquid and petrodiesel fuels". Fuel, Vol. 88(6), 1064-1069, 2009.

- [20] Gisela A. Umbuzeiro, A.F., Maria Helena Martins a, F´abio Kummrowa, Lilian Carval¬ho, Heinz H. Schmeiser, Jutta Leykauf, Marie Stiborova, Larry D. Claxton., Mutage¬nicity and DNA adduct formation of PAH, nitro-PAH, and oxy-PAH fractions of atmos¬pheric particulate matter from Sao Paulo, Brazil. Mutation Research, 2008.
- [21] Santamaría, A., Santamaría, A. F. A. & Hernández, J. R. B. Diagnóstico de la combustión de biocombustibles en motores (No. LC-0117). Universidad de Antioquia, 2007.
- [22] M. Salamanca, J. R. Agudelo, A. Santamaría."Influence of palm oil biodiesel on the chemical and morphological characteristics of particulate matter emitted by a diesel engine". Atmospheric Environment. Vol. 62. Pg 220-227, 2012.
- [23] F. O. Magín Lapuerta, J. R. Agudelo, A. L. Boehman, "Effect of fuel on the soot nanostructure and consequences on loading and regeneration of diesel parti¬culate filters". Combustion and Flame. Vol. 159. Pg 844–853, 2012.