

Comportamiento en un motor diesel de mezclas de destilados de ácidos grasos con combustible diesel

Behavior of blends of fatty acid distillates with diesel fuel on a diesel engine

Ramón Piloto-Rodríguez^{1*}, Indira Tobío-Pérez¹, Yosvany Díaz-Domínguez¹, Yamir Sánchez Torres¹, Leonardo Goyos Pérez²

¹Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría, Cujae, 19390, La Habana, Cuba.

²Universidad de Fuerzas Armadas-ESPE. Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Ave. Gral. Rumiñahui s/n, Sangolquí, Ecuador.

*Autor de correspondencia: rpiloto@tesla.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 6 enero 2022 **Aceptado:** 21 febrero 2022 **Publicado:** 24 febrero 2022

Resumen

El empleo de residuales industriales como precursores para la obtención de biocombustibles es una opción efectiva con vistas a reducir la dependencia de combustibles fósiles y el impacto ambiental generado por el vertimiento de estos. En el presente trabajo se realiza un análisis basado en el comportamiento de mezclas de destilados de ácidos grasos proveniente de la refinación de aceite vegetal, con combustible diesel en un motor en un motor monocilíndrico Lister Petters. Los ensayos se realizan en un banco de motores equipado para la evaluación de prestaciones y proceso de combustión. Para ello primeramente se analizan resultados obtenidos en pruebas y ensayos físicos realizados a diferentes mezclas de destilados de ácidos grasos con combustible diesel. Se analiza fundamentalmente la viscosidad y la densidad del combustible. Como resultado del trabajo se evidencia un incremento notable de las emisiones y aumento del 7% de consumo específico de combustible y de HC y CO en 76% y 58% respectivamente. Se concluye además que acorde a lo observado, si no hay conversión química previa, los destilados de ácidos grasos no se pueden utilizar sin mezclar pues ni siquiera precalentando es posible llegar a los niveles establecidos por las normas. La mejor forma de usar este tipo de residuales en un motor diesel es mediante el empleo de la conversión química para transformar el residual en metil ésteres antes de su introducción en el sistema.

Palabras clave: destilados de ácidos grasos, motor diesel, mezclas, biocombustible

Abstract

The use of industrial wastes as feedstock for biofuels production is an effective option for reduction of fossil fuels dependence and the environmental impact these wastes generate. The behavior of blends of fatty acid distillates and diesel fuel are in this work assessed. The fatty acid distillates are a by-product of the vegetable oil refining industry and its blend are on a Lister Petters diesel engine tested. First, physical tests are developed focused on density and viscosity determination. The tests are developed on an engine test bench prepared for performance and combustion assessment. From the obtained results, and important increase on exhaust emissions and 7% increase of specific fuel consumption and HC and CO in 76% and 58% respectively. As part of the conclusions, the chemical conversion is the only effective route to use this by-product for fueling diesel engines. If this conversion is avoided, the fatty acid distillates cannot directly used on engines and only blends are a partial solution because the pre-heating of the distillates are not enough to decrease the viscosity of

the fuel to the levels required by the standards. The best solution for the use of this by-product as a biofuel for diesel engines is through the chemical conversion to methyl esters.

Keywords: fatty acid distillates, diesel engine, blends, biofuel

1. Introducción

El desarrollo vertiginoso de las sociedades industrializadas ha originado un consumo intensivo de combustibles fósiles, que conlleva a una contaminación creciente del medio ambiente dando lugar a fenómenos preocupantes que afectan a todos los sectores y niveles de la sociedad. Por otro lado, debido al cambio climático, el progresivo agotamiento de la reserva de los combustibles fósiles y la demanda de alimentos de la población mundial, es necesario buscar fuentes alternativas de energía, y una de estas es la producción de energía a través de los biocombustibles [1, 2]. En la actualidad, el consumo de aceites vegetales refinados en la industria alimentaria también aumenta y como resultado se genera un incremento en la disponibilidad de sus subproductos; con el aprovechamiento de esos subproductos se evita la discusión ética acerca de la competencia del uso del suelo para la producción de alimentos.

No es novedosa la implementación de combustibles derivados de materiales de desecho mediante los denominados biocombustibles de segunda generación [3-6]. En un inicio habían sido desplazados del panorama energético debido a las ventajas económicas del petróleo respecto a ellos; sin embargo, hoy el mundo se encamina nuevamente al uso de los biocombustibles o de una alternativa para el transporte automotor.

El aceite vegetal crudo se compone principalmente por triglicéridos, pero también contiene numerosos compuestos no comestibles que necesitan ser eliminados mediante un proceso de refinado antes de ser consumidos. Algunos subproductos de bajo valor comercial se obtienen a partir de estos procesos de refinación [7-9]. El proceso de refinación del aceite comienza con un filtrado inicial que limpia el aceite crudo de partículas indeseables. Luego en el secado, se evapora la humedad que pueda traer el crudo. Posteriormente se somete el aceite a un proceso de desgomado, en el cual se usa ácido cítrico, ácido fosfórico o ambos, para eliminar las gomas, resinas y proteínas y permitir la remoción por métodos gravitacionales. Si las gomas son hidratables, se remueven con agua; seguidamente se adicionan tierras de blanqueo que adsorben sustancias colorantes; el proceso culmina con la desodorización, en donde se separan los ácidos grasos libres presentes en el aceite y las sustancias que ocasionan mal olor. Este proceso se puede realizar de forma física o química.

Los destilados de ácidos grasos (AGD) provenientes del proceso de producción de la refinación del aceite vegetal para su uso alimentario, se componen de una mezcla de ácidos grasos y triglicéridos y su composición dependerá del aceite vegetal de procedencia [9, 10]. Los aceites y residuos no deben ser utilizados directamente como combustibles debido a que presentan una serie de inconvenientes. Dentro de los más importantes se encuentran la formación de gomas, la formación de depósitos de carbono en los pistones y la pérdida en las prestaciones del motor en comparación con el combustible diesel. Sin embargo, estos acorde a sus propiedades físicas y químicas tienen gran potencial para ser empleados como combustible en motores diesel.

Hay reportes de uso de aceite vegetal como combustible sin ningún tratamiento previo, pero habría que tener en cuenta algunos cambios desde el punto de vista mecánico, químico y de mantenimiento según las necesidades de la investigación. Otro enfoque, se basa en tratar de aproximar las propiedades físicas del aceite a las del combustible diesel, usándolo en mezclas con combustible

diesel en determinados porcentajes o precalentando el aceite o el residuo antes de la combustión [11-13], aunque lo generalizado es el uso del biodiesel obtenido a través de esos aceites. Tomando como base lo anteriormente expuesto, este trabajo tiene como objetivo el estudio del comportamiento de mezclas de destilados de ácidos grasos con combustible diesel en un motor diesel, para explorar una alternativa a la transesterificación del residual sin modificaciones mecánicas al motor. Para ello primeramente se realizan pruebas y ensayos físicos de densidad y de viscosidad en función de la temperatura de precalentamiento del combustible para diferentes mezclas (5, 15 y 25%) de destilados de ácidos grasos con combustible diesel. Posteriormente se realizan pruebas de banco para evaluar en un motor diesel las mezclas seleccionadas.

2. Materiales y Métodos

Los destilados de ácidos grasos utilizados en la investigación provienen del proceso de refinación del aceite de soya para su uso alimentario. En los experimentos realizados se analizaron tres mezclas de ácidos grasos destilados con combustible diesel, en un rango de 5-25%. Los materiales utilizados para determinar la densidad de cada una de las mezclas fueron: un picnómetro estándar de 25 mL, una balanza Sartorius con un error de 0,1 g y cristalería general.

Viscosidad

Se analizaron mezclas de destilados de ácidos grasos con combustible diesel así como destilados de ácidos grasos sin mezclar. Todo el estudio se realizó con variación de la temperatura. El viscosímetro utilizado fue un Viscotester VT-03F con posibilidades de mediciones en tres escalas: 50-300 mPa·s, 15-150 mPa·s y 1-33 mPa·s; esta última fue la utilizada en las mediciones con un error de 1 mPa·s. Acoplado al sistema hay un termopar GEFRA con una precisión de 0,1°C, un agitador manual y una fuente de calor.

El sistema de inyección del motor diesel está diseñado para operar con combustible diesel el cual tiene una viscosidad de 3-6 mPa·s. Para analizar el comportamiento de la viscosidad para diferentes temperaturas de las mezclas de ácidos grasos destilados con combustible diesel, se analizaron muestras hasta 100°C para conocer cuál es la temperatura de pre-calentamiento que garantiza disponer de niveles de viscosidad acorde a lo establecido para el motor diesel.

Pruebas de banco

Las pruebas se realizaron en un motor diesel Lister Petter modelo VT-03F, de inyección directa y activación mecánica, siendo sus especificaciones técnicas las mostradas en la Tabla 1. En la sala de control se encuentra el panel de control en el cual se pueden registrar las temperaturas de entrada y salida del agua, temperatura de los gases de escape, torque, frecuencia de rotación y además se encuentra el control del freno. El sistema de adquisición de datos está compuesto por dos sensores de presión Kistler 4075A y Kistler 4067A, un sensor de presión piezoeléctrico Kistler 6067C1, dos amplificadores uno Kistler 5064 y el otro Kistler 4665 (piezoresistivo), un multiplicador de pulso, un codificador mecánico Kistler 2614A1, un codificador electrónico Kistler 2614A2, un chasis National Instruments DAQ-9174, dos módulos NI 9215-BNC y NI 9401 y una celda de torque. Para la evaluación en el banco se fijó la carga y se trabajó a 1500 rpm.

Los resultados de los experimentos realizados se compararon con los obtenidos con el combustible diesel. El esquema general del banco de motores se muestra en la Figura 1. El equipamiento utilizado

para medir las emisiones de los gases de escape fue un analizador de emisiones Testo 350 XL, con una resolución de 1 grado.

Tabla 1. Especificaciones del Motor Lister Petter

Item	Especificaciones
Detalles generales	Cuatro tiempos. Inyección directa
Cilindros	1
Cilindrada	659 cm ³
Potencia a 1500 rpm	3.14 kW
Angulo de inyección	24°
Relación de compresión	16,5:1

Para el análisis de los resultados se tuvo en cuenta el comportamiento de la densidad, viscosidad del carburante, así como la viscosidad en función de la temperatura de precalentamiento y el comportamiento de algunos parámetros en un banco de pruebas como son la presión del combustible, la presión de inyección, la razón de calor liberado y el diferencial de presión contra el ángulo de giro del cigüeñal. Además, se analizó el comportamiento del consumo específico de combustible y las emisiones.

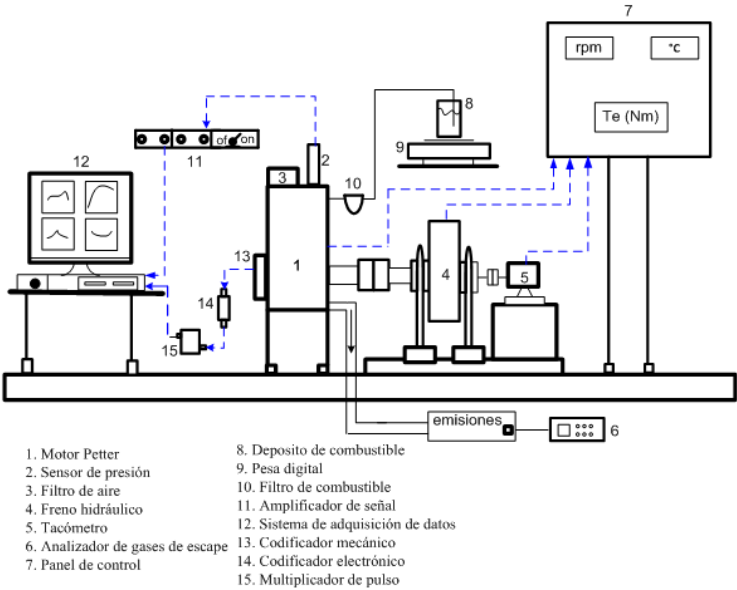


Fig.1 Instalacion de pruebas con motor Lister Petters

3. Resultados y Discusión

Análisis físico de las mezclas de los destilados de ácidos grasos con combustible diesel

El resultado de la determinación de la viscosidad dinámica para el caso de los destilados de ácidos grasos fue de 930 kg/m³ (15°C). Este valor se encuentra fuera del rango establecido por la norma EN14214 para biodiesel. Sin embargo, para el caso de mezclas con combustible diesel, el cual tiene una densidad mucho menor, es de esperar valores intermedios para la densidad de la mezcla y tomando en consideración que en este trabajo solo se proponen mezclas hasta un 25%, no constituye un problema partir de una densidad relativamente alta. Un incremento de la densidad con respecto al combustible diesel implica que el chorro de combustible que es transmitido por los inyectores hacia la cámara de combustión, no tendrá el mismo efecto en la combustión que al

utilizar el combustible diesel, ocasionando la combustión incompleta del combustible [9]. También ello influirá notablemente en las características del cono de la atomización del combustible.

Con respecto a la viscosidad dinámica, su comportamiento a medida que aumenta el porcentaje de los ácidos grasos destilados en la mezcla y en función de la temperatura, se muestra en la Figura 2. Un incremento notable de la viscosidad del combustible con respecto al combustible diesel de referencia se constata, lo cual dificulta la circulación del combustible a lo largo de los conductos del sistema de alimentación y la pulverización empeora al acceder a los orificios de la tobera, antesala de la cámara de combustión. La viscosidad es la propiedad con mayor importancia para seleccionar un combustible alternativo como una vía de sustitución del combustible diesel. Calentar a más de 70°C traería problemas en el motor pues al elevar demasiado la temperatura, el combustible varía sus propiedades y se degrada en mayor grado, empeorando el funcionamiento del motor en general o generando un impacto negativo en las partes en contacto [14, 15].

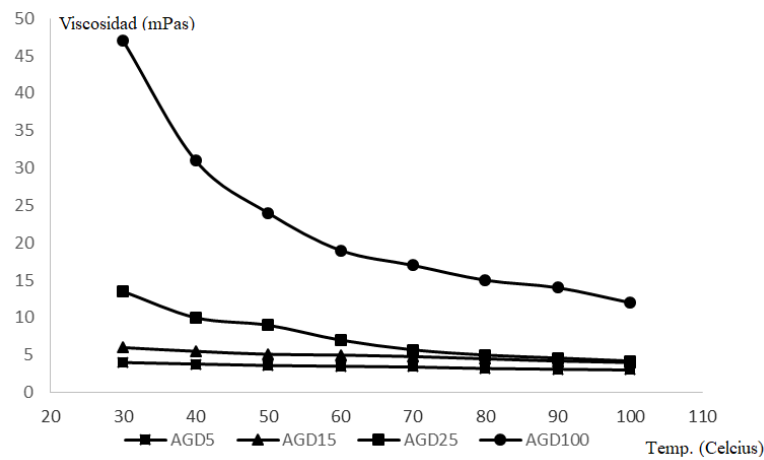


Fig.2 Variación de la viscosidad con la temperatura y composición de la mezcla

Como se observa en la Figura 2, las mezclas de AGD5 y AGD15 son muy similares en cuanto a viscosidades y a partir de 70°C no hay diferencias significativas con AGD25. Ello determina que desde el punto de vista de viscosidades, a partir de esta temperatura de pre-calentamiento se mantiene un comportamiento bastante cercano de viscosidad a los del combustible diesel. Por ello, si se va precalentar, se podría emplear cualquiera de las tres variantes sin afectaciones significativas debido a las variaciones en la viscosidad del combustible. Por otro lado, el empleo directo de los AGD implica que incluso pre-calentando por encima de 100°C, no se llega a los valores requeridos de viscosidades del combustible para motores diesel.

Pruebas en banco de motores diesel

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de bancos de motores diesel, se analizaron las curvas de presión, incremento de presión y razón de calor liberado solamente para los combustibles diesel y 100% de los ácidos grasos destilados, debido a que se dedujo que el comportamiento de cualquiera de las mezclas analizadas debe estar entre esos dos combustibles. Los valores de presión dentro de la cámara de combustión y en la línea de suministro de combustible a alta presión del motor se obtuvieron para cada uno de los combustibles probados en el motor. Para analizar los resultados se toman las curvas correspondientes al régimen de 28 Nm a 1500 rpm del motor. En la Figura 3 se observa que en los ensayos realizados en el motor, los AGD alcanzan los menores valores de presión en la cámara de combustión comparados con el combustible diesel. La inyección

del combustible diesel comparado con la de los AGD ocurrió después como se puede observar en la Figura 4. Este comportamiento se observó en todos los experimentos realizados.

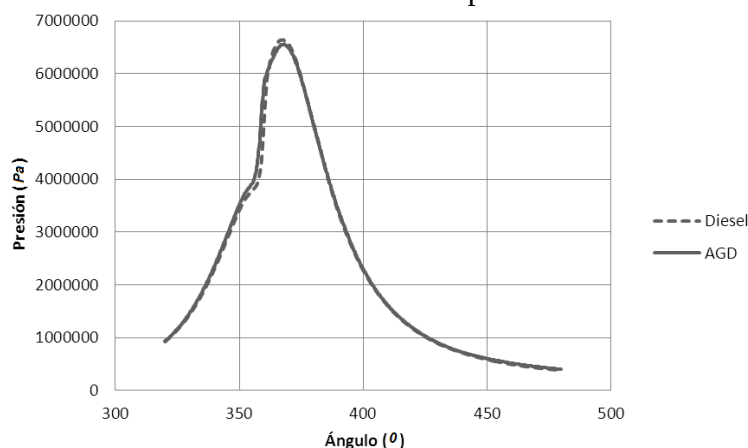


Fig.3 Curvas de presión vs. ángulo de giro del cigüeñal a 28 Nm y 1300 rpm

El retardo de la inyección y el retardo en el incremento de presión en la línea de suministro de combustible, está relacionado con el mayor valor del módulo de compresibilidad de los aceites. Este parámetro mide la resistencia de un material a su compresión uniforme. Los resultados, que reflejan esta relación concerniente a los aceites y el combustible diesel, tienen una importancia significativa en el momento de inyección y como consecuencia de esto en la presión interna del sistema. Ello conlleva a que en el sistema de inyección al emplear los ácidos grasos destilados, como se observa en la Figura 4, el incremento de presión en la inyección, ocurra en menor tiempo. En la Figura 5 se muestran las curvas relacionadas con la razón de calor liberado al utilizar en el motor los AGD o combustible diesel. Los valores del calor liberado siguen la misma tendencia. El mayor valor pertenece a los ensayos realizados con el combustible diesel, mientras en los ácidos grasos destilados presentan valores más bajos.

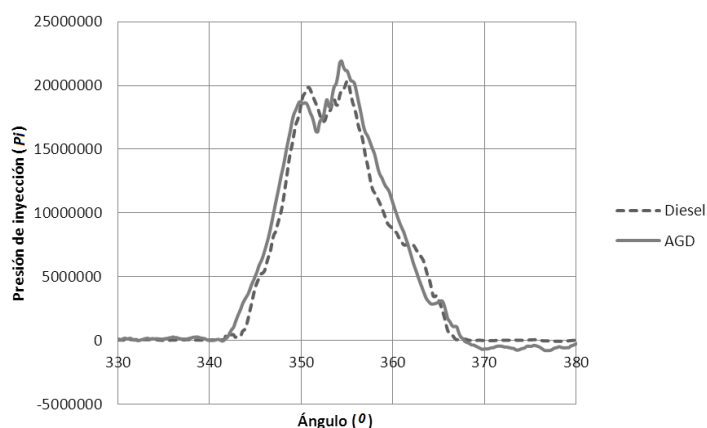


Fig.4 Presión de inyección vs. ángulo de giro del cigüeñal a 28 Nm y 1300 rpm

El desplazamiento hacia menores valores de ángulos de giro de la curva de calor liberado en el caso del combustible AGD es debido a un menor tiempo de retardo de la ignición asociado posiblemente a un mayor número de cetano de este biocombustible con respecto al combustible de referencia. Este comportamiento se reafirma al observar la primera derivada de la presión en la cámara de combustión, tal y como se muestra en la Figura 6. Este comportamiento ejerce influencia en el comportamiento de la razón del incremento de la presión, en la cual al usar el combustible diesel se alcanza el mayor valor en este parámetro. Ello está relacionado con una mejor mezcla del

combustible diesel con el aire antes de que ocurra el proceso de combustión. El valor de viscosidad más bajo en el diesel permite una mejor atomización por consiguiente una mejor mezcla con el aire dentro de la cámara de combustión. Por otra parte el área bajo la curva es mayor en el combustible diesel relacionado con el mayor contenido calórico de este combustible con respecto a los destilados de ácidos grasos.

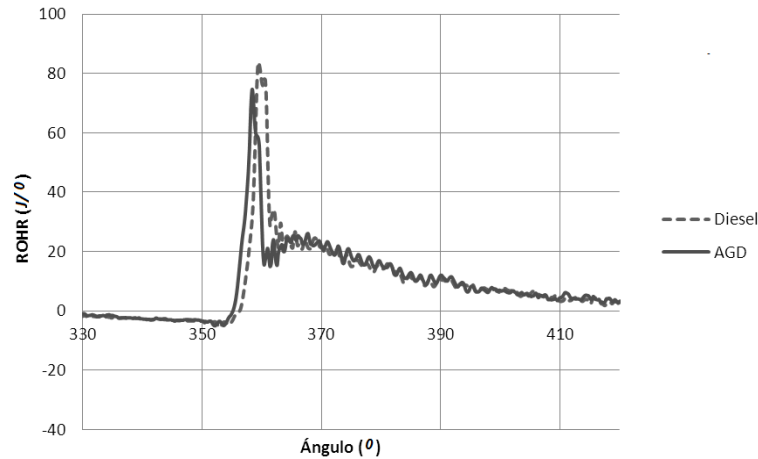


Fig.5 Razón de calor liberado vs. ángulo de giro del cigüeñal a 28 Nm y 1300 rpm

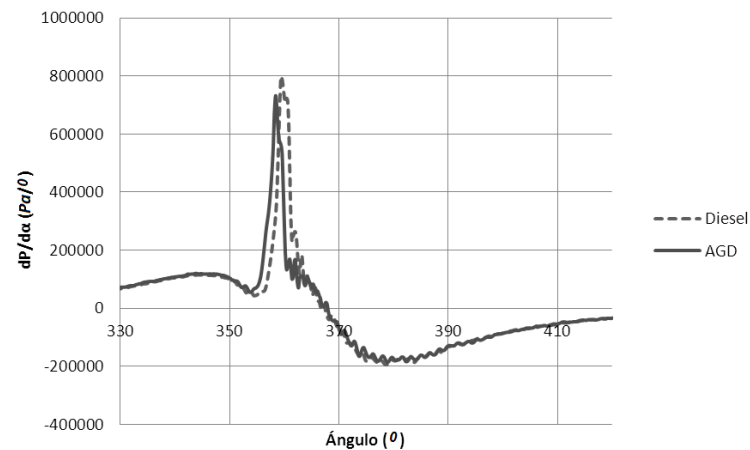


Fig.6 Diferencial de presión vs. ángulo de giro del cigüeñal a 28 Nm y 1300 rpm

De las curvas de Consumo Específico de Combustible (CEC) mostradas en la Tabla 2, se observan los niveles de afectación debido al cambio de combustible y al menor contenido calórico de los AGD. Ello implica que para satisfacer los requerimientos de carga y de velocidad impuestos al motor, es necesario combustionar una mayor cantidad de combustible, en este caso para la mezcla.

Tabla 2. Emisiones para los diferentes combustibles a 1500 rpm y 28 Nm

Comb.	CEC (g/kWh)	NO _x (ppm)	HC (ppm)	CO (ppm)
Diesel	280	800	570	495
AGD5	285	792	600	510
AGD15	289	780	790	750
AGD25	300	730	1005	785

Es conocido que las emisiones de NO_x son favorecidas por las altas temperaturas en la cámara de combustión y las altas presiones [16, 17]. La formación de estos gases contaminantes ocurre predominantemente en la región donde la llama se desarrolla en un medio pobremente mezclado con el combustible durante la fase de combustión de premezcla. En esta fase se obtienen los mayores valores de desprendimiento de calor. Una parte importante es formada en la fase de quemado difuso, por lo tanto acciones tomadas para reducir la emisión de NO_x en la primera fase tendrán un efecto amplificador en la formación en la segunda. Se puede observar que mientras el contenido de ácidos grasos destilados aumenta en la mezcla, las emisiones de NO_x disminuyen. El mayor porcentaje de combustible diesel en la mezcla favorece el aumento de la temperatura en la cámara de combustión debido a su mayor contenido calórico y el adelanto de la combustión en el residual es determinante en la ocurrencia de la combustión, provocando menores temperaturas en la cámara de combustión y por tanto menores emisiones de NO_x. Con respecto a las emisiones de HC, se observa que en la medida en que aumenta el porcentaje de ácidos grasos destilados en la mezcla, aumentan las emisiones. Todo ello se debe a un empeoramiento de la atomización de combustible, de los parámetros de inyección y de la ocurrencia de los procesos de combustión en el motor cuando se aumenta el porcentaje de AGD en la mezcla con combustible diesel.

El monóxido de carbono es un subproducto de la combustión incompleta y es esencialmente combustible parcialmente quemado. Si la mezcla aire-combustible no tiene suficiente oxígeno presente en la combustión, no se quema completamente. Cuando la combustión tiene lugar en un entorno sin la suficiente cantidad de oxígeno, entonces no se pueden oxidar completamente los átomos de carbono. Las variaciones de las emisiones de CO se comportan de la siguiente manera: a medida que el porcentaje de AGD aumenta, se incrementan las emisiones de CO porque la mezcla no garantiza una combustión completa.

Se puede resumir que el empleo de mezclas de combustible diesel con AGD hasta un 25% implica incrementos del consumo específico de combustible de hasta un 7% con reducción de NO_x hasta en 8% pero con unos incrementos muy significativos en las emisiones de HC y CO en 76% y 58% respectivamente.

A partir de los resultados obtenidos, se considera que el uso directo de destilados de ácidos grasos en un motor diesel sin conversión química previa implica para una condición de prestación del motor un incremento notable de las emisiones y aumento del consumo de combustible. Esto último hace que el ahorro del portador energético diesel por uso del combustible alternativo sea muy bajo pues consumir más mezcla implica más combustible diesel por unidad de consumo. Por otra parte, el uso de estas mezclas implica un precalentamiento hasta 70°C para poder garantizar los niveles requeridos de viscosidad. Ello implica que no se debe utilizar los AGD sin mezclar pues ni siquiera precalentando es posible llegar a los niveles establecidos por las normas. En este último caso, es importante señalar que el uso directo de AGD en un motor diesel podría traer serios problemas de corrosión en las partes del motor debido al elevado contenido de ácidos grasos e índice de acidez que tiene este residual. La mejor forma de usar este tipo de residual en un motor diesel es mediante el empleo de la conversión química para transformar el residual en metil ésteres antes de su introducción en el sistema [18-20], independientemente del incremento del costo de producción del biocombustible y sus mezclas. Ello implicaría dos etapas químicas: esterificación para reducir los niveles de ácidos grasos libres en el residual y transesterificación para convertir entonces los glicéridos a metil ésteres.

4. Conclusiones

El uso directo de destilados de ácidos grasos en un motor diesel sin conversión química previa implica para las condiciones estudiadas en el trabajo un incremento notable de las emisiones y aumento del consumo de combustible, acompañado de 7% de aumento en CEC y de HC y CO en 76% y 58% respectivamente. Si no hay conversión química previa, los destilados de ácidos grasos no se pueden utilizar sin mezclar pues ni siquiera precalentando es posible llegar a los niveles establecidos por las normas. El uso directo de AGD en un motor diesel podría traer serios problemas de corrosión en las partes del motor debido al elevado contenido de ácidos grasos que tiene este residual. La mejor forma de usar este tipo de residuales en un motor diesel es mediante el empleo de la conversión química para transformar el residual en metil ésteres antes de su introducción en el sistema.

Referencias

1. ElBassam, N., *Handbook of bioenergy crops*, 2010. Earthscan: Londres. ISBN: 978-1-84407-854-7.
2. Colectivo de Autores, *Biodiesel. Producción y Uso*, 2021. Editorial Pastos y Forrajes: Matanzas. ISBN: 978-959-7138-48-8.
3. Juan, C.J., Kartika, D.A., Wu, T.Y., Taufiq-Yap, Y.H., *Biodiesel production from Jatropha oil by catalytic and non-catalytic approaches: An overview*. Bioresource Technology, 2011. **102**: p. 452-460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.093>.
4. Dumont, M.J., Narine, S.S., *Characterization of soapstock and deodorizer distillates of vegetable oils using gas chromatography*. Lipid Technology, 2008. **20**(6): p. 136-138. DOI: <https://doi.org/10.1002/lite.200800032>.
5. Hass, M.J., *Improving the economics of biodiesel production through the use of low value lipids as feedstocks: Vegetable oil soapstock*. Fuel Processing Technology, 2005. **86**. p. 1087-1096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.004>.
6. Colectivo de Autores, *Biocombustibles para su uso en motores diesel*, 2014. ISBN: 978-959-234-095-4. Ed. IDICT: La Habana.
7. Piloto-Rodríguez, R., Melo, E.A., Goyos, L., Verhelst, S., *Conversion of by-products from the vegetable oil industry into biodiesel and its use in internal combustion engines: a review*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2014. **31**(2): p. 287-301. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20140312s00002763>.
8. Cherng-Yuan, L., Yi-Wei, L., *Fuel Characteristics of Biodiesel Produced from a High-Acid Oil from Soybean Soapstock by Supercritical-Methanol Transesterification*. Energies, 2012. **5**: p. 2370-2380. DOI: <https://doi.org/10.3390/en5072370>.
9. Yan, L, Xiao-Dong, Z., Li, S., *Fatty acid methyl esters from soapstocks with potential use as biodiesel*. Energy Conversion & Management, 2010. **51**: p. 2307-2311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.04.003>.
10. Pereda, J., Barriga, F., Alvarez, P., *Aprovechamiento de las oleinas residuales procedentes del proceso de refinado de los aceites vegetales comestibles, para la fabricación de biodiesel*. Grasas y Aceites, 2003. **54**(2): p. 130-137. DOI: <https://doi.org/10.3989/gya.2003.v54.i2.255>.
11. Rrabakaran, R., Manikandan, G., Kumar, P.G., Salman, M., Jegadheesan, C., Kim, S.C., *Feasibility of tea tree oil blended with diethyl ether and diesel as fuel for diesel engine*, Case Studies in Thermal Engineering, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101819>.
12. Pandey, K.K., S.S., Murugan, S., *Combustion Parameters of LHR Diesel Engine Fueled with Jatropha Biodiesel and Its Blends*, Innovations in Energy, Power and Thermal Engineering.

- Select Proceedings of ICITFES 2020, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4489-4_13.
13. Piloto-Rodríguez, R., Tobío-Pérez I., Suárez-Hernández, J., *Diesel engine fuelled with blends of Jatropha curcas oil and diesel fuel*. Revista Cubana de Ingeniería, 2020. **11**(2): p. 12-19.
 14. Pramanik, K. *Properties and use of Jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine*. Renewable Energy, 2003. **28**: p. 239-248.
 15. Rakopoulos, C., Antonopoulos, K.A., Rakopoulos, D.C., Giakoumis, E.G., *Comparative performance and emissions study of a direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins*. Energy Conversion & Management, 2006. **47**(18-19): p. 3272-3287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.01.006>.
 16. Cao, D.N., Hoang, A.T., Luu, H.Q., Bui, V.G., Tran, T.T.H., *Effects of injection pressure on the NOx and PM emission control of diesel engine: A review under the aspect of PCCI combustion condition*. Energy Sources Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1754531>.
 17. Dev, S., Lafrance, S., Liko, B., Guo, H., *Study on effect of engine operating parameters on NOx emissions and exhaust temperatures of a heavy-duty diesel engine during idling*. International Journal of Energy Research, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1177/14680874221076087>.
 18. Piloto-Rodríguez, R., Ortiz-Alvarez, M., Suárez-Hernández, J., Tobío-Pérez, I., Melo-Espinosa, E.A., Díaz, Y., Sotolongo, J.A., *Data on combustion chamber measurements of a diesel engine fuelled with biodiesel of Jatropha curcas and fatty acid distillates*. Data in Brief, 2020. **31**: p. 105799. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105599>.
 19. Ribeiro, L.H., Lopes, T.A.L., Zamora, H.D., de Moraes, L.C., Pasquini, D., *Synthesis of methyl biodiesel by esterification using magnetic nanoparticles coated with sulfonated lignin*. Biomass Conversion and Biorefinery, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02214-1>.
 20. Rajesh, K., Aravindhan, N., Manimaran, B., Elavarasan, D., Kumar, L.D., Kumar, T.M., *Study On Performance and Emission Characteristics of VCR Diesel Engine Fuelled with Palm Fatty Acid Distillate Biodiesel*. Journal of Physics: Conference Series, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2054/1/012034>.

Conflicto de Intereses

Los autores consideran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Ramón Piloto-Rodríguez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-4189>

Conceptualización y desarrollo de los experimentos. Redacción del manuscrito.

Indira Tobío-Pérez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0001-0172>

Participación en los experimentos y análisis de resultados. Revisión del manuscrito.

Yosvany Díaz-Domínguez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5522-0746>

Análisis de resultados y revisión del manuscrito.

Yamir Sánchez Torres. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4321-276X>

Análisis de resultados y revisión del manuscrito.

Leonardo Goyos Pérez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1364-8979>

Conceptualización, análisis de resultados y revisión del manuscrito.