

Pruebas de corrosión cíclica de fundiciones de hierro gris en diferentes Biodiesel

José D. Castro¹, Oscar E. Piamba¹, Jhon J. Olaya¹

¹Grupo de investigación en Corrosión, Tribología y Energía, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Universidad Nacional de Colombia, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.
jodcastro@unal.edu.co; oepiambat@unal.edu.co; jjolayaf@unal.edu.co

Resumen

La fundición de hierro gris es usada para construir muchos elementos mecánicos presentes durante la producción, almacenamiento o uso del Biodiesel. Este estudio evalúa los efectos corrosivos del Biodiesel en la fundición de hierro gris cuando está expuesta a ensayos de corrosión cíclica a temperaturas de 200°C durante 450 ciclos. Las probetas del material de estudio fueron confinadas en recipientes de acero inoxidable, con seis diferentes Biodiesel de diferentes orígenes: Sebo vacuno, Manteca de cerdo, aceite de girasol, aceite de soya, aceite de palma y aceite de coco. Las velocidades de corrosión fueron medidas por método gravimétrico y luego analizadas con el método de regresión lineal. Las velocidades de corrosión obtenidas mostraron magnitudes en un rango entre 0,101 a 0,151 mpy. Los resultados muestran que los Biodiesel son medios de corrosión agresivos sobre la fundición de hierro gris.

Abstract

The gray cast iron is used to make a variety of mechanical elements that are in contact with the biodiesel, either during the synthesis stage, storage or at final use stage of biodiesel. This study examined the corrosion effects of biodiesel on grey cast iron when the interface was exposed to a cyclic corrosion. The tests ran for 450 hours and the highest temperature was 200°C. The material was confined in Stainless Steel recipients with six different biodiesel (beef tallow, lard, sunflower oil, soybean oil, palm oil, and coconut oil). The corrosion velocity was evaluated by gravimetric method and analyzed by linear regression method. The corrosion velocities obtained show magnitudes within a range from 0,101 to 0,151 mpy. These results show that the biodiesels are aggressive fluids for the cast iron.

Palabras clave:

Biodiesel, Corrosión, Fundición de hierro gris

Keywords:

Gray cast iron, Cyclic corrosion, Biodiesel corrosion

Introducción

El Biodiesel, es un combustible de origen renovable denominado como éster alquílico de ácidos obtenido de fuentes vegetales o animales [1], [2]. Este es un combustible alternativo de origen renovable que se ha venido utilizando en la actualidad supliendo la necesidad energética de los países en el mundo. En todo el globo, este combustible ha tomado tal importancia que la producción mensual supera el 1'863.000 toneladas, lo que lo muestra como una de las principales energías renovables implementadas [3]. En Colombia, la Federación Nacional de Biocombustibles [4] reporta valores superiores a 40.000 toneladas producidas de Biodiesel al mes y según la regulación Colombiana, este Biodiesel es combinado con Diesel convencional en proporción 10-90 [5].

Las características del Biodiesel, lo hace técnicamente competitivo y una alternativa ambientalmente amigable al Diesel convencional [2]. Asimismo, que su uso a nivel masivo sea confiable y que no se requiera mayores modificaciones en las máquinas en las que se usa. Las materias primas que son utilizadas para la producción de Biodiesel, son de uso común en otros campos o desechos por lo que hace que su producción sea a bajo costo y asimismo viable [2], [6], [7].

Con la implementación de este nuevo combustible, se han realizado experimentación en la compatibilidad que tienen materiales como latón, cobre, bronce, acero al carbono, polímeros, entre otros [7], [8]. En la mayoría de los casos, estos estudios son realizados en inmersión estática a temperatura constante [8]–[10]. Fazal et al. [2], [7], [11] han llegado a la conclusión de que el Biodiesel afecta los componentes metálicos de manera significativa. También, concluye que en metales, el Biodiesel es más corrosivo que el Diesel. De los materiales estudiados por estos autores, se encontró que las aleaciones de cobre son más corroídas por el Biodiesel que las aleaciones de hierro y de aluminio. Kaul et al. [12] realizó un estudio de corrosión de diferentes Biodiesel con origen Hindú y acero al carbono obteniendo como resultado una corrosión sobre el material asociada al alto contenido de azufre. Tsuchiya et al. [13] investigaron la corrosión en una lámina de acero recubierta con aleación de Plomo-Estaño inmersa estáticamente en Diesel y en mezcla Diesel-Biodiesel en proporción de 5% (B5) fabricado por vía metálica. Después de 500 horas, encontraron picaduras sobre el material expuesto a la mezcla con Biodiesel y llegaron a la conclusión que el Número Total de Acidez (TAN) no era suficiente para explicar este fenómeno.

Uno de los materiales que por su uso en la industria está más expuesto al contacto con el Biodiesel es la fundición de hierro gris. Este es usado en fabricación de válvulas, carcasas, tuberías, y en especial en la industria automotriz [14], [15]. Sin embargo, este material posee una inestabilidad química que lo hace propenso a procesos corrosivos, afectando su vida de servicio. Esto conlleva a que las diferentes industrias tengan un gasto alto en mantenimiento de equipos fabricados en fundición de hierro gris. En este sentido, Amaya et. al [1], realizaron un estudio de corrosión de la fundición de hierro gris inmersa en Biodiesel de Palma a temperatura ambiente y bajo condiciones de ciclos de temperatura. Luego de los ensayos realizados, se demostró que el Biodiesel era más corrosivo que el Diesel siendo coherente con lo encontrado con Fazal et al [7]. Además, concluyó que la temperatura cíclica tiene un efecto acelerador en el proceso corrosivo.

Knothe et al. [16] estudió el comportamiento del índice de estabilidad de los aceites aplicado a los esteres monoalquílicos (Biodiesel metílico). En este estudio consideró que la composición del Biodiesel y el contacto con metales podrían afectar la estabilidad a la oxidación del Biodiesel, siendo los factores más representativos la concentración de radicales de ácidos grasos insaturados, el tipo de metal con que tiene contacto y finalmente la masa molecular del Biodiesel.

La velocidad de corrosión es uno de los indicadores que permite medir los efectos corrosivos de un medio sobre una muestra. La prueba de velocidad de corrosión se puede aplicar bajo condiciones de variación de temperatura y esto permite acelerar el proceso, corrosión cíclica. Los ciclos de temperatura ocasionan un incremento de los esfuerzos compresivos, como consecuencia de los diferentes coeficientes de expansión térmica, causando el desprendimiento de las capas de óxido formadas y el aumento en las velocidades de corrosión [17]. El aumento de las temperaturas también tiene efecto sobre la estabilidad del Biodiesel, acelerando las reacciones de oxidación en el fluido y disminuyendo su índice de estabilidad a la oxidación (OSI) [18]. El ensayo de corrosión cíclica permite simular las condiciones de interacción entre el Biodiesel y los materiales, las cuales frecuentemente son diferentes a la temperatura ambiente, desde su proceso de producción hasta su uso final en los motores de combustión interna o instalaciones industriales que usan este tipo de combustible.

Este estudio tiene como objetivo medir la velocidad de corrosión que ocurre en la exposición de la fundición de hierro gris a seis tipos diferentes de Biodiesel y analizar la relación entre la composición del Biodiesel y la velocidad de corrosión. El método de ensayo se basó en la norma técnica ASTM G31 [19], que describe el procedimiento de ensayos de corrosión a inmersión estática, sin embargo se aceleró el proceso aplicando ciclos de temperatura.

DESARROLLO

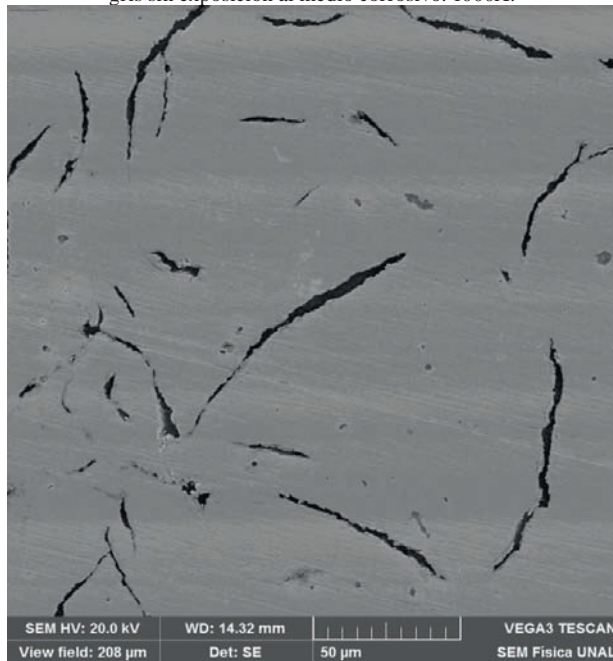
Materiales de estudio

En esta investigación se utilizó fundición de hierro gris obtenido de refacciones de un motor Diesel. Probetas de 18mm X 18mm X 7,5mm fueron obtenidas de la misma refacción de motor, por lo que se garantiza la homogeneidad del material en su composición y microestructura. Las probetas de fundición de hierro gris fueron cortadas con la técnica de electroerosión con hilo y pulidas. En la tabla 1 se presenta la composición del material medida mediante la técnica de espectroscopia de emisión óptica utilizando un equipo Baird-Spectrovac 1000. Según el cálculo del carbono equivalente (CE)= 4,0 [20] la fundición de hierro gris de estudio es hipoeutéctica. La figura 1 corresponde a una micrografía SEM tomada en el microscopio de barrido electrónico VEGA3 SBU. Dicha imagen permite establecer según la norma ASTM A48M-03 que el material es considerado como fundición Clase 30 con predominancia de estructura perlítica, con grafitos en forma laminar aleatoria tipo A.

Tabla 1. Porcentaje de elementos más significativos obtenidos la espectroscopia de emisión óptica en la composición química la fundición de hierro gris.

	Fe	C	Si	Mn	P
%	93,41	3,45	1,66	0,66	0,02

Figura 1. Micrografía de barrido electrónico de la fundición de hierro gris sin exposición al medio corrosivo. 1000X.



Preparación de medios corrosivos

Seis tipos de Biodiesel fueron fabricados a partir de diferentes materias primas. Las materias primas fueron seleccionadas con base en su composición, permitiendo obtener

muestras saturadas, insaturadas, de cadenas más largas y de cadenas cortas. Las materias primas utilizadas fueron el sebo vacuno, la manteca de cerdo, el aceite de coco, el aceite de soya, el aceite de Girasol y el aceite de palma. El Biodiesel fue producido mediante transesterificación por vía metílica con una relación volumétrica entre aceite y alcohol de 5:1. Los Biodiesel fabricados fueron hechos en reactores de vidrio de 1000 ml equipados con agitadores magnéticos, condensador y control de temperatura. La temperatura del proceso de transesterificación fue de 60°C. Los productos obtenidos (Biodiesel y Glicerina) fueron separados mediante decantación y filtrado. Cada Biodiesel obtenido, fue sometido a proceso de lavado y secado.

Las propiedades medidas para cada uno de los Biodiesel fabricados están consignadas en la Tabla 2. La composición del Biodiesel se midió utilizando la técnica de cromatografía de gases, según método de desarrollado por Narváez et al. [21], y los resultados se presentan en la Tabla 3. Según la composición de ácidos grasos obtenidos de cada una de las materias primas del estudio, se utilizó el método propuesto por Kyriakidis & Katsiloulis [22] para calcular el índice de yodo, así:

$$IV = xC_1 + yC_2 + zC_3 \quad (1)$$

En donde IV es el índice de yodo. C_1 , C_2 y C_3 , son las concentraciones de ácidos presentes en los Biodiesel clasificados en Mono-insaturado, Bi-insaturado y Tri-insaturado respectivamente. Los valores de x , y y z son 1, 1.5 y 2.62 respectivamente.

Ejecución de los ensayos.

Para el desarrollo de las pruebas de corrosión cíclicas cada probeta de fundición fue inmersa en Biodiesel dentro de un portamuestras hermético de acero inoxidable 304, garantizando el contacto total entre la muestra de fundición y el fluido. El portamuestras hermético tiene como objetivo evitar la oxidación y la volatilización del combustible. Se realizaron ensayos de oxidación cíclica con 30 minutos de exposición a 200°C, 15 minutos de exposición a temperatura ambiente con ventilación forzada y 15 minutos de ajuste en la curva de temperatura a alcanzar por el horno en cada ciclo. Cada ciclo duró una hora. El ensayo tuvo un tiempo total de ejecución de 450 horas.

Al finalizar el tiempo de exposición Las probetas de fundición de hierro gris fueron pesadas en una balanza digital marca Symmetry PA 220 con resolución de 0,0001g. La velocidad de corrosión para cada tratamiento se calculó según la norma ASTM G31[19], utilizando los valores medidos de la masa perdida (L) en kg, la densidad del material (d) en kg/m³, el área de contacto (A) en m² y el tiempo de exposición (t) en horas.

$$Velocidad\ de\ corrosión\ [mpy] = \frac{L * 3,46 * 10^6}{A * d * t} \quad (2)$$

Las morfologías de las superficies de las muestras fueron analizadas mediante micrografías SEM, utilizando el equipo VEGA3 SBU. Un Perfilometro Interferométrico Bruker Contour GT-K fue utilizado para estudiar la topografía de la superficie de las muestras.

Tabla 2. Propiedades del Biodiesel obtenido de diferentes materias primas.

Propiedad; Método utilizado	Sebo	Manteca	Palma	Soya	Coco	Girasol
Densidad [g/mL] (21 °C); ASTM D4052	0,8753	0,8750	0,8774	0,8831	0,8525	0,8869
Viscosidad Cinemática [mm ² /s] (40°C); ASTM D445	6,04	5,40	4,87	4,63	3,56	5,21
Masa Molecular [g/mol]; Calculado	302,5	332,6	284,8	293,1	239,5	331,3
Índice de Yodo; Método de Kyriakidis [20]	47,3	56,8	54,3	123,1	11,2	116,5
Corrosión en lámina de cobre; ASTM D130	1a	1a	1a	1a	1a	1a

Tabla 3. Composición de Biodiesel en radicales de los ácidos grasos.

% Ácidos Grasos	Sebo	Manteca	Palma	Soya	Coco	Girasol
Laúrico - 12:0	0	0	0	0	45,3	0
Mirístico - 14:0	4	1,0	1,9	0	32,5	2,4
Palmítico - 16:0	27,4	28,0	44,2	11,6	11,9	3,2
Esteárico - 18:0	25,6	13,0	4,5	3,2	1,7	6,3
Oleico - 18:1	39,1	46,0	39,6	20,4	3,3	47,0
Linoleico - 18:2	1,6	6,0	9,8	59,7	5,3	14,3
alfa-linolénico - 18:3	2,2	0,7	0	5,0	0	12,0

Resultados y discusión

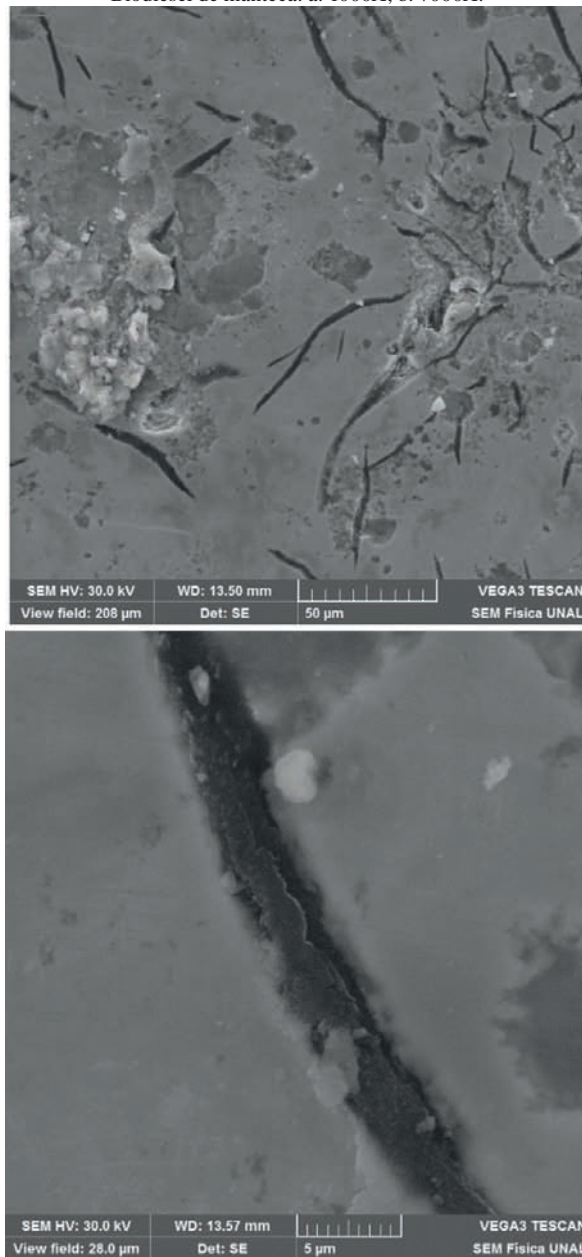
La figura 2 corresponde a dos micrografías SEM a 2000X y 7000X de la fundición de hierro gris después del ensayo de corrosión cíclica con Biodiesel de manteca. En la imagen se aprecia la formación de óxidos en la superficie del material (partes blancas) y la formación de picaduras. Además de esto también se puede observar la pérdida del grafito superficial, lo que se evidencia en la aparición de socavaciones con morfología similar a la de los grafitos. La figura 3 presenta las imágenes obtenidas por interferometría de las muestras afectadas después de 450 horas de tratamiento. Las imágenes permiten apreciar la pérdida de material en la superficie de las muestras. También se puede observar que el material no se afecta de manera uniforme. Este comportamiento mostrado por el interferómetro y las micrografías es típico de los materiales que presentan el mecanismo de corrosión por picaduras, que además de no presentar una corrosión uniforme en la superficie, también muestra que la corrosión es el resultado de un decaimiento localizado en una pequeña parte de la capa pasiva que se forma a causa del proceso de oxidación del material [23]. Comportamientos similares son reportados por Fazal et al. [24] al estudiar los efectos corrosivos del Biodiesel de palma sobre aluminio, bronce y cobre.

Las velocidades de corrosión del material expuesto en el ensayo de oxidación cíclica, calculadas a partir de la norma ASTM G31 [19], se muestran en la figura 4. Se puede observar que la mayor velocidad de corrosión, tras las 450 horas del ensayo, corresponde al ensayo realizado con Biodiesel de Girasol con un valor de 0,151 mpy. La menor velocidad de corrosión se presentó en el tratamiento realizado con Biodiesel de coco, 0,101 mpy. Los valores de velocidad de corrosión son comparables a los obtenidos en pruebas de inmersión a temperatura ambiente por un periodo de 2880 horas [8].

Para identificar la correlación entre la composición del Biodiesel y el efecto corrosivo del Biodiesel sobre el material de estudio, se hicieron dos tipos de análisis. El primer análisis busca identificar la correlación entre masa molecular del Biodiesel y la velocidad de corrosión. El segundo análisis evaluará la correspondencia entre la velocidad de corrosión y la presencia de enlaces covalentes insaturados en los esteres que componen el Biodiesel. Esta última característica se encuentra cuantificada como el Índice de Yodo. La masa molecular es calculada de acuerdo a la concentración de ácidos grasos presentes en los esteres del Biodiesel. Los datos de velocidad de corrosión y masa molecular del Biodiesel son analizados mediante la técnica de regresión lineal [25]. La figura 5 presenta los resultados del análisis de regresión lineal “Velocidad de corrosión vs. Masa molecular”. Este análisis indica que, aunque el tamaño de muestra es estadísticamente significativo para estudiar la correlación ($F=5,751$; valor crítico de $F=3,10 \times 10^{-2}$), el coeficiente de correlación R^2 es muy bajo, 0,291. Se puede inferir de estos resultados

que el tamaño de molécula de los esteres que componen el Biodiesel no tiene una incidencia predominante sobre la velocidad de corrosión que presenta el material.

Figura 2. Micrografía SEM del material expuesto a 450 horas en Biodiesel de manteca. a: 1000X, b: 7000X.



En la figura 6 se presentan los resultados del análisis de regresión lineal “Velocidad de corrosión, vs. Índice de Yodo”. Según los resultados obtenidos, el tamaño de la muestra es suficiente para el análisis ($F=155,3$; valor crítico de $F=1,18 \times 10^{-9}$), el coeficiente de correlación R^2 es muy alto: 0,97. Estos resultados permiten inferir que existe una relación entre la velocidad de corrosión y el índice de Yodo del Biodiesel. Los errores estadísticos calculados para el intercepto y la constante de proporcionalidad son significativamente menores a dichas constantes ($9,62 \times 10^{-2}$ y $1,18 \times 10^{-3}$ respectivamente) [25]. Este análisis muestra que la velocidad de

corrosión aumenta proporcionalmente a la concentración de ácidos grasos insaturados en la materia prima. Estos resultados coinciden con los presentados en estudios previos, que indican que los Biodiesel con mayor presencia de enlaces insaturados corresponden a los que generan mayores velocidades de corrosión [9], [12].

Figura 3. Medición con interferómetro en la superficie de una probeta de fundición gris y sometida a Oxidación cíclica por 450 horas con Biodiesel de manteca.

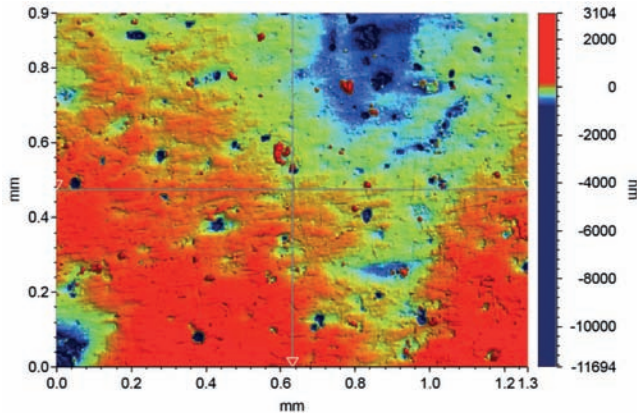
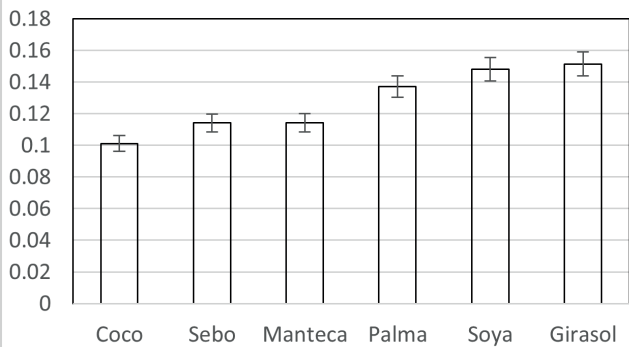


Figura 4. Gráfica de Velocidad de corrosión en la fundición de hierro gris por cada Biodiesel en el ensayo de corrosión cíclica.
Velocidad de corrosión en MPY



$$\text{Mpy} = 1.57\text{E}01 + 1.26\text{E}-02 * \text{Masa molecular} \quad (3)$$

Figura 5. Mediciones tomadas en el ensayo de corrosión a temperatura cíclica y su Regresión lineal con los datos calculados de masa molecular.
Velocidad de corrosión vs. Masa molecular

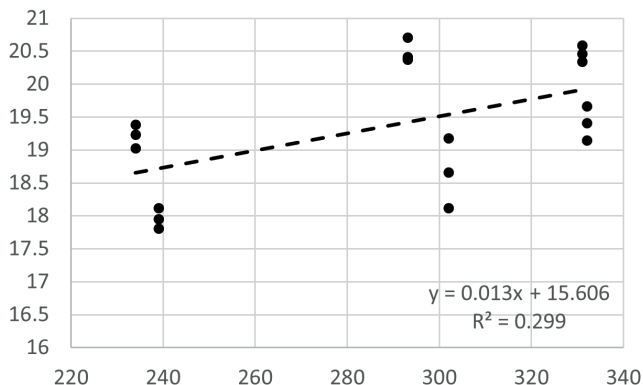
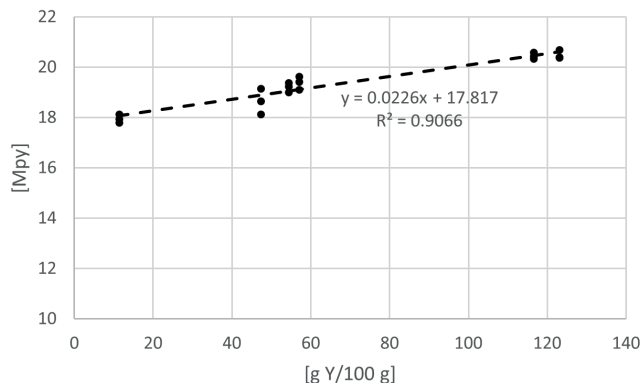


Figura 6. Mediciones tomadas en el ensayo de corrosión a temperatura cíclica y su Regresión lineal con los datos obtenidos de índice de Yodo.
Velocidad de corrosión vs. Índice de Yodo



$$\text{Mpy} = 1,78\text{E}01 + 2,26\text{E}-02 * \text{Índice de Yodo} \quad (4)$$

La correlación encontrada entre la velocidad de corrosión a alta temperatura y el índice de Yodo puede ser explicada como la consecuencia de procesos autoxidantes en los esteres insaturados. En dichos procesos los enlaces doble y triples, preferentemente los que presentan configuración bis-alílica, reaccionan con el oxígeno de la molécula dando inicio a una reacción de tres etapas en las que se producen peróxidos, ácidos o aldehídos. Los procesos oxidativos convierten los esteres en ácidos como el fórmico, acético y propiónico, que son altamente corrosivos. Esta reacción generalmente se ve acelerada por el efecto catalizador de los metales, sin embargo algunos resultados muestran que el efecto de los enlaces dobles y triples prevalece [26][27][28][29]. Los resultados experimentales permiten inferir que existe una correlación entre la insaturación de los esteres que componen el Biodiesel y el efecto de la corrosión medido como la pérdida de masa en la fundición de hierro gris.

CONCLUSIONES

En esta investigación se midió la velocidad de corrosión sobre la fundición de hierro gris inmersa en seis tipos diferentes de Biodiesel. El uso de una metodología de oxidación cíclica permitió acelerar los efectos corrosivos del Biodiesel. Las muestras sufrieron corrosión por picaduras que fue evidenciable en microscopia de barrido electrónico y en los interferogramas de las superficies atacadas. Los resultados obtenidos permitieron identificar que existe una baja correlación entre la velocidad de corrosión y la masa molecular del Biodiesel, indicando que los efectos corrosivos no están relacionados con la longitud de las cadenas de los ácidos grasos en la materia prima. También permitió concluir que la velocidad de corrosión está altamente correlacionada con el índice de yodo calculado del Biodiesel. De este hallazgo se infiere que la presencia de enlaces insaturados en las cadenas de ácidos grasos de las materias primas tiene una incidencia directa en la velocidad de corrosión. El Biodiesel proveniente de materias primas altamente insaturadas como

Girasol y Soya son más nocivos a la fundición de hierro gris que aquellos provenientes de materias primas saturadas, como coco y sebo bobino.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Dirección de Investigación y Extensión de la sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia, que financió esta investigación a través de los proyectos 14230 y 19070.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. A. Amaya, O. Piamba, and J. Olaya, "Estudio de los efectos corrosivos del diésel y biodiésel sobre una fundición de hierro gris", *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 2014.
- [2] M. A. Fazal, A. S. M. A. Haseeb, and H. H. Masjuki, "Effect of different corrosion inhibitors on the corrosion of cast iron in palm biodiesel," *Fuel Processing Technology*, vol. 92, no. 11, pp. 2154–2159, Nov. 2011.
- [3] "International Energy Statistics - EIA." [Online]. Available: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=79&pid=81&aid=1&cid=regions&syid=2008&eyid=2012&unit=TBPD>. [Accessed: 23-Oct-2015].
- [4] "Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia." [Online]. Available: <http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-produccion-titulo-Biodiesel.htm>. [Accessed: 23-Oct-2015].
- [5] Ministerio de Minas y Energía de Colombia, "Biocombustibles fuente de desarrollo sostenible para Colombia." [Online]. Available: <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivosEventos/4828.pdf>. [Accessed: 06-Jan-2015].
- [6] Biodisol, "Energías alternativas, renovables, bioenergías." 2014. [Online]. Available: <http://www.biodisol.com/temas/biocombustibles/biodiesel/>. [Accessed: 06-Jan-2015].
- [7] A. S. M. A. Haseeb, M. A. Fazal, M. I. Jahirul, and H. H. Masjuki, "Compatibility of automotive materials in biodiesel: A review", *Fuel*, vol. 90, no. 3, pp. 922–931, Mar. 2011.
- [8] M. A. Fazal, A. S. M. A. Haseeb, and H. H. Masjuki, "Degradation of automotive materials in palm biodiesel", *Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 76–83, Apr. 2012.
- [9] B. Singh, J. Korstad, and Y. C. Sharma, "A critical review on corrosion of compression ignition (CI) engine parts by biodiesel and biodiesel blends and its inhibition," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 3401–3408, Jun. 2012.
- [10] D. P. Geller, T. T. Adams, J. W. Goodrum, and J. Pendergrass, "Storage stability of poultry fat and diesel fuel mixtures: Specific gravity and viscosity," *Fuel*, vol. 87, no. 1, pp. 92–102, 2008.
- [11] M. A. Fazal, A. S. M. A. Haseeb, and H. H. Masjuki, "Investigation of friction and wear characteristics of palm biodiesel," *Energy Conversion Management*, vol. 67, pp. 251–256, Mar. 2013.
- [12] S. Kaul, R. C. Saxena, A. Kumar, M. S. Negi, A. K. Bhatnagar, H. B. Goyal, and A. K. Gupta, "Corrosion behavior of biodiesel from seed oils of Indian origin on diesel engine parts," *Fuel Processing Technology*, vol. 88, no. 3, pp. 303–307, Mar. 2007.
- [13] T. Tsuchiya, H. Shiotani, S. Goto, G. Sugiyama, and A. Maeda, "Japanese Standards for Diesel Fuel Containing 5% FAME: Investigation of Acid Generation in FAME Blended Diesel Fuels and Its Impact on Corrosion," 2006.
- [14] ASTM international, "ASTM A48 - Gray Iron Castings 1," vol. 03, Reapproved 2012, pp. 1–6, 2013.
- [15] J. L. Castiglioni, "Metales ferrosos y sus aplicaciones", *Materiales ferrosos y sus aplicaciones*, Universidad de Buenos Aires, 2008, p. 67.
- [16] G. Knothe and R. O. Dunn, "Dependence of oil stability index of fatty compounds on their structure and concentration and presence of metals", *Journal of American Oil Chemical Society*, vol. 80, no. 10, pp. 1021–1026, 2003.
- [17] F. J. Bolívar, "Evaluación del comportamiento a elevadas temperaturas de recubrimientos de Al, Si y de Al modificado con Si y Hf depositados mediante CVD-FBR sobre aceros ferrítico-martensíticos (9-12% Cr)", Universidad Complutense de Madrid. Tesis de Doctorado. Madrid, 2007. ISBN: 978-84-669-3115-1
- [18] E. Natarajan, "Stability studies of Biodiesel", *International Journal of Energy Science*. Vol. 2, Issue 4, PP.152-155, 2012. www.ijesci.org
- [19] ASTM international, *ASTM G31 - Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*. 2014.
- [20] T. Bex, "Chill testing: the effect of carbon equivalent", *Modern Casting*, 1991.
- [21] P. Narváez, J. Torres, F. Sánchez, and L. Ponce de León, "Determinación por cromatografía de gases de alquil ésteres (metílico y etílico) de ácidos grasos, en presencia de mono-, di- y triglicéridos", *Revista Ingeniería e Investigación*, no. 57, pp. 58–62, 2005.

- [22] N. B. Kyriakidis and T. Katsiloulis, "Calculation of iodine value from measurements of fatty acid methyl esters of some oils: Comparison with the relevant American Oil Chemists Society method", *Journal of American Oil Chemical Society*, vol. 77, no. 12, pp. 1235–1238, 2000.
- [23] H. Uhlig, *Uhlig's Corrosion Handbook*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011.
- [24] M. A. Fazal, A. S. M. A. Haseeb, and H. H. Masjuki, "Comparative corrosive characteristics of petroleum diesel and palm biodiesel for automotive materials", *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no. 10, pp. 1308–1315, Oct. 2010.
- [25] D. Cardona M., J. González R., M. Rivera, and E. Cárdenas, "Inferencia estadística Módulo de regresión lineal simple", no. 147, Universidad del Rosario. Facultad de Administración., 2013, p. 57.
- [26] E. Christensen, R. McCormick, "Long-term storage stability of biodiesel and biodiesel blends", *Fuel Processing Technology*. Vol 128, p. 339-348. 2014.
- [27] R. McCormick, M. Ratcliff, L. Moens, R. Lawrence, "Several factors affecting the stability of biodiesel in stabdar accelerated test", *Fuel Processing Technology*, vol 88, p. 651-657. 2007.
- [28] B. Singh, J. Korstad, Y. Sharma. "A critical review on corrosion of compression ignition (CI) engine parts by biodiesel and biodiesle blends and its inhibition", *Renewable and Sustainable Energy reviews*. Vol 16, p.3401-3408. 2012.
- [29] G. Knothe, "Some aspects of Biodiesel oxidative stability", *Fuel Processing Technology*. Vol. 88, p. 669-677. 2007.