



Evaluación del comportamiento de aceros de toberas en biocombustible ^a

Performance of Nozzle Steels in Biofuel

Recibido: Agosto 08, 2020 | Aceptado: Junio 16, 2021 | Publicado: Julio 27, 2022

David Leonardo Blanco-Estupiñan*

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8114-4764>

Angela Bermudez-Castañeda

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3766-2695>

Sebastian Márquez

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4120-6051>

^a Artículo de investigación

* Autor de correspondencia. Correo: david.blanco@escuelaing.edu.co

DOI: <https://doi.org/10.11144/javeriana.iued26.pnsb>

Como citar este artículo:

A. Bermudez-Castañeda, D. L. Blanco-Estupiñan, S. Márquez, "Evaluación del comportamiento de aceros de toberas en biocombustible" Ing. Univ. vol. 26, 2022. <https://doi.org/10.11144/javeriana.iued26.pnsb>

Resumen

Objetivo: evaluar la resistencia a la corrosión de las boquillas de inyección de acero inoxidable bajo ensayo de inmersión en biodiésel, y realizar una caracterización electroquímica bajo soluciones de HNO₃. **Métodos y materiales:** Se realizó la caracterización química del biodiésel para analizar su estabilidad. Se realizaron pruebas de inmersión durante 4 meses, evaluando el acero inoxidable 304 bajo 3 concentraciones diferentes de mezclas de diésel/biocombustible. Además, se realizaron ensayos de polarización con concentraciones de NOx superiores a los niveles medidos en las emisiones de los motores. **Resultados y discusión:** El uso de biocombustibles en Colombia ha sido impulsado en gran medida por la producción de etanol de origen vegetal. Su uso aporta algunas ventajas relacionadas con la reducción de las emisiones de partículas y gases tóxicos (principalmente, grupos aromáticos, NOx y CO₂). Sin embargo, puede producirse una degradación de los materiales cuando están en contacto directo con el biodiésel. Además, se ha informado de solidificación de ceras, que provoca el taponamiento de las boquillas. No obstante, se desconoce si esto influye en la difusión del oxígeno en la solución y, a su vez, afecta a la resistencia a la corrosión del acero inoxidable. **Conclusiones:** La resistencia a la corrosión del acero inoxidable 304 cambió bajo condiciones de inmersión, aunque su capa protectora no se vio afectada por las concentraciones de NOx registradas en las mezclas de biocombustible.

Palabras clave: biocombustible, toberas, acero inoxidable.

Abstract

Objective: To evaluate the corrosion resistance of stainless-steel injection nozzles under immersion test in biodiesel and perform electrochemical characterization under HNO₃ solutions. **Methods and materials:** Chemical characterization of biofuel was performed to analyze its stability. Immersion tests were carried out for 4 months, evaluating 304 stainless steel under 3 different diesel/biofuel mixtures concentrations. Additionally, polarization tests were done using NOx concentrations above the levels measured from engine emissions. **Results and discussion:** The use of biofuels in Colombia has been largely driven by ethanol production from vegetable sources. Their use brings some advantages related to reducing emissions of particles and toxic gases (mainly, aromatic groups, NOx, and CO₂). However, degradation of materials can occur when they are in direct contact with biodiesel. Furthermore, solidification into waxes, which leads to plugging of nozzles, has been reported. However, it is unknown whether this influences oxygen diffusion in the solution, and in turn, affects the corrosion resistance of stainless steel. **Conclusions:** The corrosion resistance of the 304 stainless steel changed under immersion conditions, even though its protective layer was not affected by the NOx concentrations registered in the biofuel mixtures.

Keywords: biofuel, nozzle, stainless steel.

Introducción

Los aceros inoxidable se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones industriales, que incluyen entornos muy agresivos. Esto ha influido en el desarrollo y el estudio de sus propiedades, que impactan fuertemente la vida útil de los componentes y equipos [1]. En particular, la industria del automóvil utiliza una amplia gama de piezas de acero inoxidable. Este es el caso, en particular, de los sistemas de combustión en los que las propiedades de estabilización mecánica y química desempeñan un papel crucial en el rendimiento de las boquillas, así como en los sistemas de baja presión en contacto con el combustible.

Los metales utilizados para la producción de automóviles, como el cobre, el aluminio y la fundición, son muy resistentes a la corrosión cuando se sumergen en diésel, pero sufren procesos de corrosión más acelerados cuando están en contacto con el biodiésel y sus mezclas. Por lo tanto, para prolongar la vida útil de estos metales, es importante estudiar la naturaleza corrosiva del biodiésel [2]. Esto es especialmente cierto si se tienen en cuenta las ventajas del biodiésel, que ha llevado a un aumento de su uso en todo el mundo. Las principales ventajas del biodiésel son su bajo contenido en azufre y el hecho de que no implica la quema de combustibles fósiles, dada la actual crisis medioambiental.

Los biocombustibles que se extraen de fuentes vegetales presentan diferencias significativas en cuanto a la emisión de partículas y la biodegradabilidad en comparación con el biodiésel convencional. Actualmente, el combustible diésel que se distribuye y utiliza en Colombia contiene alrededor del 10 % de material particulado [3].

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo se centra en el estudio de la resistencia a la corrosión del acero inoxidable AISI 304, el tipo utilizado en las boquillas comerciales, cuando se expone al combustible biodiésel puro y a su mezcla B50 (50 % aceite de palma, 50 % diésel comercial) en condiciones de inmersión estacionaria. Para separar la influencia de las especies de NO_x, se realizaron ensayos de polarización potencioestática bajo concentraciones de 0,1M, 1x10⁻³M y 1x10⁻⁴M.

En condiciones de inmersión estacionaria, el biodiésel sufrió una solidificación que se manifestó en la formación de cera, como se ha informado en la literatura [4]. Esto podría restringir o reducir el uso de mezclas con alto porcentaje de biocombustibles en lugares con clima frío (<18°C). Además, se observó corrosión localizada en las boquillas, aunque no se observó degradación en la prueba electroquímica, lo que sugiere que la corrosión fue causada por el agotamiento del oxígeno.

Materiales y métodos

Preparación de muestras

Para las pruebas de inmersión se utilizaron boquillas comerciales y barra de acero AISI 304, que es un material habitual en las boquillas. Las boquillas se desengrasaron en una solución básica y se enjuagaron con agua destilada. Posteriormente, se sometieron a una limpieza por ultrasonido en etanol durante 30 minutos. Una vez secas, las boquillas se sometieron a la prueba de inmersión. El mismo procedimiento se utilizó para limpiar un disco AISI 304 cortado de la barra, antes de realizar las pruebas electroquímicas.

Caracterización de muestras

Se obtuvieron muestras de biodiésel comercial y se mezclaron con diésel comercial para la prueba de inmersión. Sin embargo, las propiedades del biodiésel puro se analizaron según las pruebas descritas en la Tabla 1.

Tabla 1. Ensayos de caracterización del combustible

Ensayo	Norma
Contenido de biocombustible	EN 14078
Viscosidad a 40°C	ASTM D 445
Estabilidad a la oxidación (Rancimat)	EN 14112-EN 15751
Índice de Yodo	EN 14111
Número ácido	ASTM D664
Glicerina libre, monoglicéridos, diglicéridos, triglicéridos, glicerina total	ASTM D6584

Fuente: Elaboración propia

Evaluación del comportamiento del acero inoxidable en condición de inmersión total en biocombustible

Las boquillas de acero inoxidable y los discos de AISI 304 se sometieron a pruebas de inmersión estacionaria durante 4 meses. Las soluciones utilizadas en las pruebas fueron el 100 % de biodiésel y una mezcla de biocombustible (50 %) y diésel comercial (50 %). Esta proporción se tomó de un estudio anterior, en el que se analizó el efecto de diferentes mezclas en la eficiencia de la combustión de un motor [5]. En todos los casos, las muestras estaban cubiertas por el biodiésel o la mezcla. Se midió la temperatura ambiental, en donde se obtuvo un rango entre 14°C y 20°C.

Caracterización electroquímica del acero inoxidable en el biocombustible

Las mediciones de las emisiones de NO_x se realizaron a partir de la combustión del biodiésel en un motor de prueba para medir la concentración de esas especies en el biocombustible. El valor registrado de partes por millón se tomó como la concentración más baja en el electrolito

utilizado para realizar las pruebas potencioestáticas, realizadas en un potencioestado Autolab 305. Se utilizó una celda estándar de 3 electrodos, compuesta por un electrodo de referencia de Ag/AgCl, un contraelectrodo de platino y un disco de AISI 304 como electrodo de trabajo. Se utilizaron como electrolitos soluciones de HNO₃ con concentraciones de 0,1M, 1x10⁻³M y 1x10⁻⁴M, y las curvas de polarización se realizaron en un rango entre -1V y 1V.

Resultados

Caracterización química del biocombustible

Para determinar las propiedades básicas de mezclas de biodiésel y combustible de aceite de palma, las reglas de mezcla se evalúan en función de la fracción de volumen de biodiésel en la mezcla [6]. Se puede usar en motores diésel modernos en su forma pura (B100) o puede mezclarse con petróleo diésel [7]. Además de ser fuentes renovables, el biodiésel ofrece una serie de distintas ventajas: es biodegradable, no es tóxico, reduce las emisiones de escape, es ecológico con combustible diésel [8]. Sin embargo, como se mencionó, también tiene algunos características desfavorables, tales como inestabilidad oxidativa, pobre-baja, propiedades de temperatura, propiedades similares a solventes, etc. Puede, así mismo, proporcionar potencia y par ligeramente más bajos, y, por tanto, mayor consumo de combustible [9]. Por ello, se realizó una caracterización química para determinar la estabilidad y las propiedades oxidativas del biocombustible utilizado.

La viscosidad del biodiésel empleado depende, principalmente, de la composición e insaturación de cadenas del biocombustible, así como de la temperatura. La viscosidad cinemática cuyo rango puede estar entre 1.9 a 6 mm²/s, según la norma ASTM D6751 [10], para este biodiésel alcanzó valores alrededor de 4.43 mm²/s. Dicha medición se hizo bajo el procedimiento regulado por la norma ASTM D445 [11]. El valor de esta medida, aunque se encuentra en el rango establecido, está por encima de la mitad del mismo y puede corresponder a un menor número de dobles enlaces [propiedades fisicoquímicas del biodiésel [12]. Lo anterior, se analiza dado la tendencia a la oxidación del biodiésel a mayor saturación de cadena. Así mismo, se realizó la medición del índice de acidez bajo el procedimiento ASTM D664 [13] que indica la cantidad de reactivo de hidróxido de potasio que se necesita para neutralizar 1 gramo de metil ésteres [12]. Cuando mayor sea este valor, que según la norma ASTM D6751 puede ser hasta 0.5 mg KOH/g de biodiésel [10], mayor será el efecto corrosivo del biocombustible. El biodiésel alcanzó un valor de 0.23 mg KOH/g, lo que puede entenderse como una probabilidad baja de impacto en los materiales que se encuentren en contacto con el mismo.

Respecto a la estabilidad química, se hicieron análisis respecto del índice de yodo, cuyo límite máximo se encuentra alrededor de 120gI₂/100g [12]. El valor obtenido es 59,3 g yodo/100 g de FAME de acuerdo con el procedimiento descrito en EN 14111 [14]. Así

mismo, se hizo una caracterización en la que no se detectaron triglicéridos, lo cual indica una completa transformación de los componentes de partida. Los principales componentes identificados en porcentaje en masa de este biodiésel son principalmente diglicéridos y glicerina ligada.

Composición química de toberas comerciales

La composición química descrita en la Tabla 1, según la norma ASTM A570 [15] corresponde a un acero inoxidable UNS S30200 tipo 302.

Tabla 1. Composición de toberas comerciales

Elemento	Porcentaje en peso (%)
Carbono	0.091
Silicio	0.452
Manganeso	1.350
Cromo	17.640
Molibdeno	0.549
Níquel	8.110
Fósforo	0.0358
Azufre	0.0231

Fuente: Elaboración propia

Composición química discos acero inoxidable

La composición química descrita en la Tabla 3, según la norma ASTM A570 [15], corresponde a un acero inoxidable UNS S30400 tipo 304.

Table 3. Composición discos acero inoxidable.

Elemento	Porcentaje en peso (%)
Carbono	0.0708
Silicio	0.446
Manganeso	1.55
Cromo	18.22
Níquel	8.36
Nickel	0.0323
Fósforo	0.0221

Fuente: Elaboración propia

Caracterización de dureza toberas comerciales

La caracterización de dureza descrita en la Tabla 4 se realizó según norma ASTM E 18-03 [16]. Como se observa, la variación de la dureza no es significativa y puede corresponder al trabajo en frío que haya podido sufrir el material.

Tabla 4. Dureza de toberas comerciales

Dureza Rockwell (HRb)	
Tobera 1	90.53
Tobera 2	91.02
Tobera 3	92.46

Fuente: Elaboración propia

Ensayo de inmersión toberas

Las pruebas de inmersión estática y el control de la pérdida de masa se llevaron a cabo según el procedimiento descrito en la norma ASTM G31 - 72 [17]. Los discos de acero inoxidable AISI 304 y las boquillas comerciales se evaluaron durante 154 días (aproximadamente 3696 horas) en B50 y gasóleo comercial bajo temperaturas de 14°C-18°C, humedad (80 % HR) y condiciones estáticas controladas.

Como se observa en las Figuras 1a y 1b, se formó una cera sólida o depósitos. Como se ha informado en estudios anteriores [18], esta cera se produce al separar los componentes del biodiésel por debajo de los 13°C. Sin embargo, estas ceras aparecen alrededor de los 16°C, lo que puede obstruir las boquillas del inyector en ciudades donde la temperatura ambiental puede alcanzar valores relativamente bajos, como Bogotá.

Figura 1. Ensayos de inmersión

(a) Discos de acero inoxidable



(b) Toberas comerciales



Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizada la prueba, se observó óxido y depósitos en el diésel comercial, así como en el B50. Además, se encontró corrosión localizada en el interior de la boquilla, como se muestra en la Figura 2b. Este mecanismo de degradación se atribuye al agotamiento del oxígeno, que podría producirse por la disminución de la evolución del oxígeno en una

solución estática. La falta de oxígeno afecta a la integridad de la capa pasiva de acero inoxidable. Este fenómeno sólo se encontró en condiciones de inmersión estática.

Figura 2. Inspección visual toberas

(a) Antes de inmersión



(b) Después de inmersión



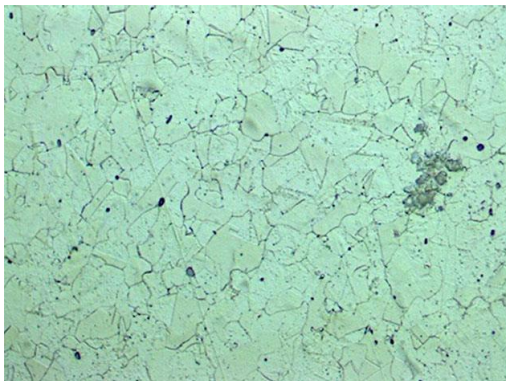
Fuente: Elaboración propia

Para analizar si estos puntos de corrosión en el acero recomendado para las toberas, AISI 304 se analizaron metalográficamente las superficies de los discos de este material antes y después de la exposición al diésel y a la mezcla de este último con biodiésel.

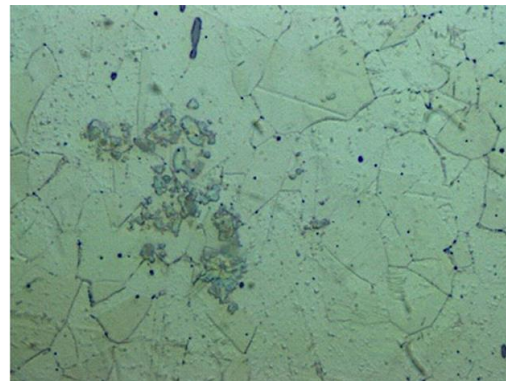
Tres probetas que fueron preparadas de acuerdo con la norma ASTM E3-01 [19], con el objetivo de revelar la estructura de la aleación, determinación de constituyentes presentes, análisis de discontinuidades. Para revelar las microestructuras, las muestras fueron atacadas químicamente con Vilella (5ml de HCl, 1 g de ácido pícrico y 100 ml de etanol), según la norma ASTM E407-07 [20] y durante 19 minutos, este procedimiento se realizó dos veces, antes y después del ensayo de inmersión.

Figura 3. Micrografías antes de inmersión.

(a) 100x



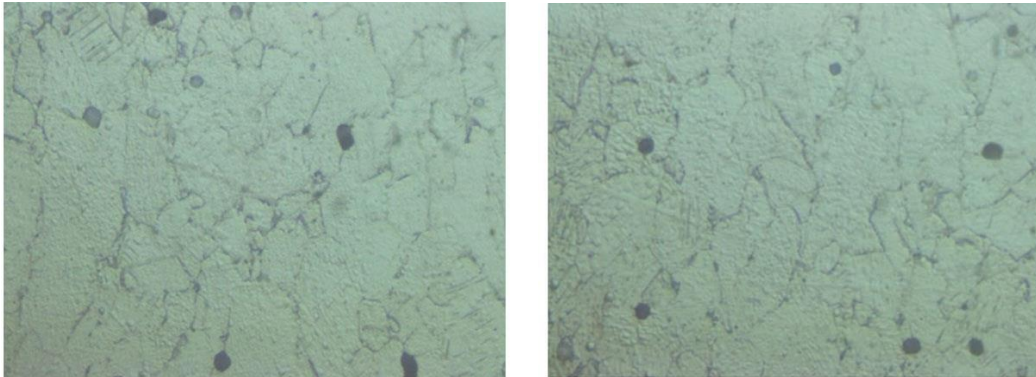
(b) 500x



Fuente: Elaboración propia

Las imágenes tomadas de las metalografías se compararon con imágenes de la literatura, dos de ellas tomadas del *Handbook de Metalografía* de la ASM [21], aunque eran superficies atacadas con KOH y el aumento es de 200x son bastante similares. Como puede apreciarse en la Figura 3a y Figura 3b, las estructuras obtenidas antes de la inmersión evidencia matriz austenítica por los granos equiaxiales de austenita, con presencia de carburos (zona negra).

Figura 4. Micrografías después de ensayo de inmersión.
(a) 100x **(b) 500x**



Fuente: Elaboración propia

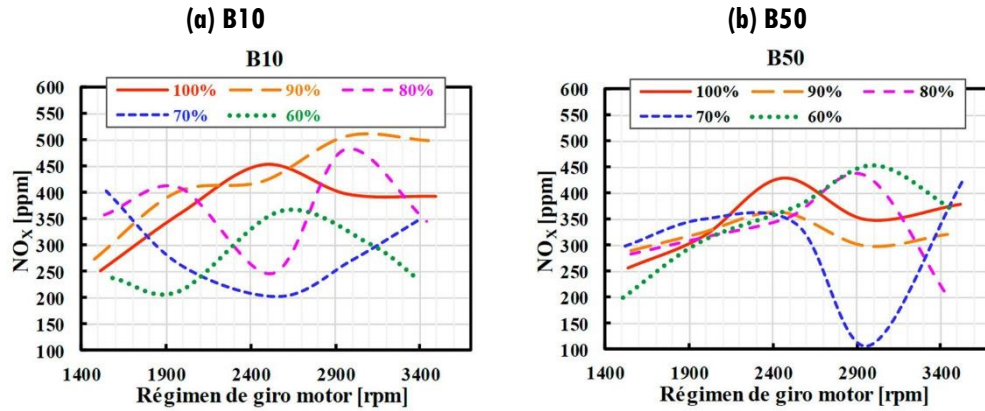
Tal como se muestra en las figuras 4a y 4b, no se evidencian cambios en la microestructura.

Caracterización electroquímica del acero inoxidable en el biocombustible

Como la identificación de compuestos ricos en N a partir de mezclas de biodiésel es muy difícil, se consideraron algunos valores de referencia de las emisiones para determinar el rango de especies de NO_x que pueden estar en contacto con el biodiésel. Las mediciones de las emisiones de gases se realizaron a partir de los subproductos de la combustión de un motor en el que se utilizó una mezcla de diésel y biodiésel. El rendimiento del motor y las características de la combustión se recogen en otro documento [22].

Las figuras 5a y 5b muestran el contenido de NO_x en los gases de combustión para las diferentes mezclas utilizadas. En todos los casos, dichas emisiones son inferiores a 500 partes por millón (ppm), lo que corresponde a concentraciones en torno a $1 \times 10^{-3} M$ y $1 \times 10^{-4} M$ de HNO₃. Se realizaron pruebas de polarización bajo esas concentraciones y 0,1 M de HNO₃. La última de ellas se utilizó para comparar los resultados de $1 \times 10^{-3} M$ y $1 \times 10^{-4} M$ de HNO₃.

Figura 5. Mediciones de emisiones de NOx durante la combustión

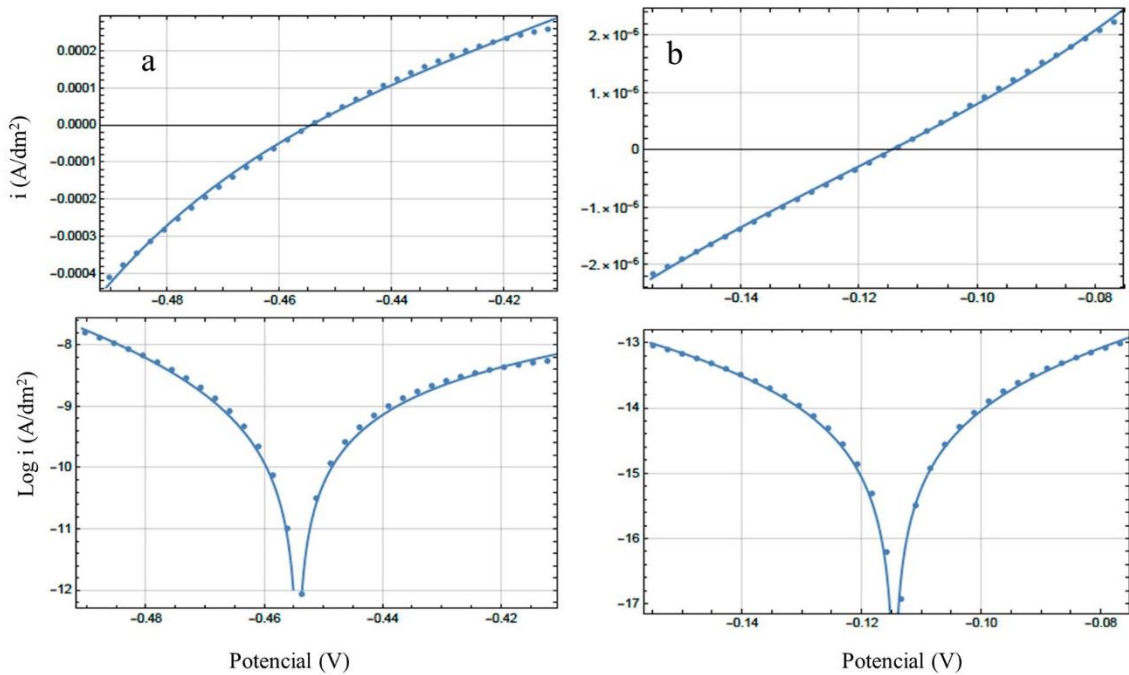


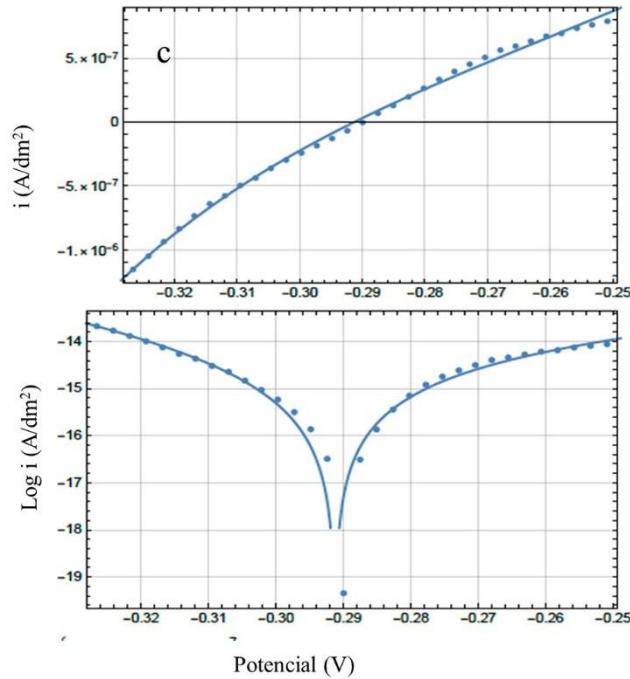
Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en las figuras 6a, 6b y 6c, no se observó ninguna variación significativa en la velocidad de corrosión ni en el comportamiento pasivo del acero inoxidable AISI 304.

Figura 6. Curvas de polarización acero Inox 304

(a) 0.1M. (b) 1×10^{-3} M. (c) 1×10^{-4} M.





Fuente: Elaboración propia

Las mayores velocidades de corrosión están asociadas al material expuesto a la solución de HNO₃ 0,1M. Esto se observa en los parámetros de corrosión, ya que la corriente de corrosión (i_{corr}) y el potencial de corrosión (E_{corr}) son menores para concentraciones inferiores a $1 \times 10^{-3} \text{M}$ y $1 \times 10^{-4} \text{M}$, como se muestra en la Tabla 5. Esto significa que el potencial de corrosión se produce a potenciales más altos. Asimismo, la corriente de corrosión (i_{cor}) para 0,1M HNO₃ tiene dos magnitudes más altas en relación con las otras dos concentraciones. Sin embargo, a partir del ensayo electroquímico se puede concluir que una mayor proporción de las especies de NO_x puede provocar el desplazamiento del potencial de corrosión y llevar al sistema a una pasivación más rápida del acero inoxidable, como se ha informado en algunos otros estudios de investigación sobre el acero inoxidable de la serie 300 [23, 24].

Tabla 5. Datos de curvas de polarización de acero inoxidable en diferentes concentraciones de HNO₃

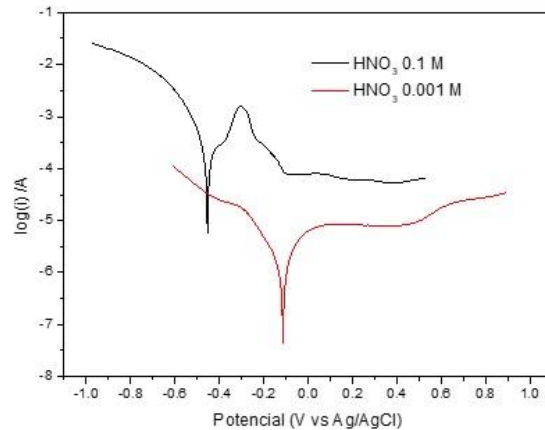
[HNO ₃] (M)	i_{corr}	E_{corr}
0,1	2 E-04	-0,45
1×10^{-3}	1.3E-06	-0.12
1×10^{-4}	6.1E-07	-0.29

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, al analizar las curvas de polarización completas para las concentraciones de 0,1M y $1 \times 10^{-3} \text{M}$ de HNO₃ (Figura 7), se puede analizar que las diferencias en la concentración muestran el desplazamiento el E_{corr} mencionado. Las diferencias en la corriente pueden ser a su vez atribuida a la caída óhmica por hacer el ensayo sin electrolito

de soporte que mejore la conductividad. La superficie analizada no mostró picaduras ni fenómenos corrosivos en todos los casos, dado que no se llevó el material hasta los potenciales de picadura.

Figura 7. Comparación curva polarización a diferentes concentraciones de HNO₃



Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se observa que para bajas concentraciones el hombro correspondiente a la formación de la capa pasiva no se observa con claridad a diferencia de la curva que corresponde al material en 0.1M de HNO₃. Esto se puede deber a que bajo estas condiciones la capa pasiva está formada desde potenciales más bajos. Es decir, que la capa pasiva es más estable.

Conclusiones

- El biodiésel producido de aceite de palma muestra estabilidad, una baja tendencia a la oxidación y los componentes de este biocombustible son, principalmente, diglicéridos y glicerina ligada.
- Bajo condiciones de inmersión en las toberas comerciales se encontraron fenómenos de corrosión localizada producto de celdas diferenciales de oxígeno en condiciones estática.
- Los aceros inoxidables AISI 304 no muestran cambios metalográficos apreciables después de tres meses de inmersión. Dicha diferencia en el ataque respecto a las toberas comerciales se puede explicar por la diferencia en la composición química.
- La cera se formó alrededor de los 16°C. Esto puede provocar la obstrucción de las boquillas cuando se utilizan concentraciones más altas de biodiésel en la mezcla de combustible.
- Según las pruebas de corrosión, la concentración de NO_x del biodiésel no afecta a la capa pasiva ni al rendimiento autoprotector del acero.

- Las concentraciones equivalentes de especies de NO_x del biodiésel muestran un potencial de corrosión y una corriente de corrosión bajas, lo que significa una menor velocidad de corrosión. Además, no se identificaron fenómenos de degradación bajo ninguna de las concentraciones de HNO₃ utilizadas.

Referencias

- [1] A. Iversen, *Sheir's Corrosion*, 1st ed., Elsevier Science, 2010.
- [2] S. Deshpande, A. Joshi, S. Vagge and N. Anekar, "Corrosion behavior of nodular cast iron in biodiesel blends", *Eng. Fail. Anal.*, vol. 105, pp. 1319-1327, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.060>
- [3] F. Anguebes-Franceschi et al., "Physical and Chemical Properties of Biodiesel Obtained from Amazon Sailfin Catfish (*Pterygoplichthys pardalis*) Biomass Oil," *Journal of Chemistry*, vol. 2019, p. 7829630, ene. 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/7829630>
- [4] E. C. Zuleta, L. Baena, L. A. Rios and J. A. Calderón, "The oxidative stability of biodiésel and its impact on the deterioration of metallic and polymeric materials: a review," *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 23, no. 12, pp. 2159-2175, 2012, <https://doi.org/10.1590/S0103-50532012001200004>
- [5] J. Agudelo, E. Gutiérrez y P. Benjumea, "Análisis experimental de la combustión de un motor diésel de automoción operando con mezclas diésel-biodiésel de palma" *Dyna*, vol. 76, no. 159, p. 103-113, 2009.
- [6] P. Benjumea and J. Agudelo, "Basic properties of palm oil biodiesel – diesel blends," vol. 87, no. 10-11, pp. 2069-2075, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.11.004>
- [7] S. Lebedevas and A. Vaicekauskas, "Research into the application of biodiesel in the transport sector of Lithuania", *Transport*, vol. 21, no. 2, pp. 80-87, 2006, <https://doi.org/10.3846/16484142.2006.9638047>
- [8] G. Knothe, "'Designer' Biodiesel: Optimizing Fatty Ester Composition to Improve Fuel Properties," *Energy & Fuels*, vol. 22, no. 2, pp. 1358-1364, 2008. <https://doi.org/10.1021/ef700639e>
- [9] A. Demirbas, "Progress and recent trends in biofuels," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 33, no. 1, pp. 1-18, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.06.001>
- [10] ASTM D6751-15 International, Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels, 2020.
- [11] ASTM D445-17 International, Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), 2019.
- [12] S. García-Muentes, F. Lafargue Perez, B. Labrada, M. Díaz and A. Campo-Lafita, "Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador" *Revista Cubana de Química*, vol. 30, pp. 142-158, abr. 2018.
- [13] ASTM D664-18 International, Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels, 2018.
- [14] UNE EN 14111, Fat and oil derivatives. Fatty Acid Methyl Esters (FAME). Determination of iodine value, 2003.
- [15] ASTM A570-98 International, Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, Carbon, Hot-Rolled (Withdrawn 2000), 1998.
- [16] ASTM E18-03, Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials, 2003.
- [17] ASTM G31-72 International, Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, 2004.

- [18] G. Dwivedi and M. Sharma, “Impact of cold flow properties of biodiesel on engine performance”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 650-656, 2014.
- [19] ASTM E3-01 International, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, 2001.
- [20] ASTM E407-07 International, Standard test methods for microetching, 2007.
- [21] G. F. Vander Voort et al., “ASM handbook”, *Metallogr. Microstruct.*, vol. 9, pp. 44073-0002, 2004.
- [22] O. H. Venegas and L. F. Mónico, “Estudio de la influencia del uso de combustibles alternativos en un motor de combustión interna”, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C., Informe de investigación, 2019.
- [23] D. Kolman, D. Ford, D. Butt and T. Nelson, “Corrosion of 304 stainless steel exposed to nitric acid-chloride environments”, *Corros. Sci.*, vol. 39, no. 12, pp. 2067-2093, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(97\)00092-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(97)00092-9)
- [24] K. Ishimi, Y. Ida, F. Tsutaka and Y. K. Sugimoto, “Nitric Acid Passivation Treatment of Type 304 Stainless Steels with Different Surface Polishing Conditions and Changes in Pitting Inhibition Effect of The Treatment with Exposure to Corrosion Environments”, *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, vol. 66, no. 4, pp. 158-164, 2015, <https://doi.org/10.4139/sfj.66.158>