

Corrosión de un acero inoxidable austenítico en biodiesel

Corrosion of an austenitic stainless steel in biodiesel

A. S. Roman ^{b,*}, C. M. Mendez ^b, A. E. Ares ^{a,b}

^a CONICET

^b Instituto de Materiales de Misiones (IMAM) - Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales
Universidad Nacional de Misiones (UNaM) - Félix de Azara 1552. 3300 Posadas, Misiones, Argentina.

Recibido: 08/11/14; aceptado: 08/07/15

Actualmente existe un gran interés por el empleo de fuentes de energía renovables como el biodiesel, por poseer grandes ventajas con mínimos daños al ambiente. Sin embargo, el manejo de biocombustibles puede ocasionar problemas de corrosión por incompatibilidad del mismo con los materiales metálicos.

En el presente trabajo se pretende evaluar la susceptibilidad frente a la corrosión en biodiesel, de un acero inoxidable austenítico, a partir de estudios electroquímicos. Se efectuaron medidas del potencial de circuito abierto en función del tiempo, polarizaciones potenciodinámicas, ensayos de espectroscopía de impedancia electroquímica y de voltametría cíclica. Los resultados obtenidos permiten señalar un buen comportamiento frente a la corrosión del acero inoxidable estudiado, en biodiesel obtenido a partir de aceite de soja.

Palabras Claves: Biodiesel, corrosión, acero inoxidable, espectroscopia de impedancia electroquímica.

Essentially there is a great interest in the use of renewable energy sources such as biodiesel, attributable to great advantages with minimal damage to the environment. However, handling of biofuels can lead to corrosion problems due to the incompatibility of biodiesel with metallic materials.

In the present work is intended to evaluate the corrosion susceptibility in biodiesel of an austenitic stainless steel using electrochemical techniques. Measures at open circuit potential versus time, potentiodynamic polarization curves, electrochemical impedance spectroscopy and cyclic voltammetry assays were performed. The results show a good resistance to corrosion of stainless steel tested in biodiesel obtained from soybean oil.

Keywords: Biodiesel, corrosion, stainless steel, electrochemical impedance spectroscopy.

* alejandrroman@fceqyn.unam.edu.ar.

I. INTRODUCCIÓN

El gradual reemplazo de los combustibles fósiles por otras formas de energía es un tema de absoluta actualidad, debido al agotamiento de las reservas petroquímicas así como también la toma de conciencia por preservar el medio ambiente. [1-4]. Las mayores perspectivas para el futuro están puestas en diversas fuentes de energía como el hidrógeno, la energía eólica, la geotérmica, los biocombustibles [1,3].

El biodiesel, como fuente de energía ecológicamente correcta, resulta de gran interés ya que además de disminuir las emisiones de gases generadores del efecto invernadero, reduce las emisiones de otros gases contaminantes, y puede funcionar como un factor de desarrollo para varias industrias, generando además seguridad energética dentro del país, reduciendo las importaciones de aceite diesel [3,5]. Sin embargo, el biodiesel posee algunas características desfavorables, como inestabilidad oxidativa, propiedades pobres como disolvente a bajas temperaturas, menor proporción de energía y torques más bajos que el diesel de petróleo [6]. Un aspecto de gran importancia es la compatibilidad del biocombustible con los materiales que comúnmente se hallan en contacto con los combustibles convencionales. Deberán considerarse las mejores alternativas para lograr el adecuado manejo del biodiesel.

En la literatura se reporta que el biodiesel, de diferentes orígenes, resulta más corrosivo que el diesel de petróleo [6-12]. Sin embargo, la revisión efectuada por el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Malaya [6] revela que no se disponen de pruebas concluyentes de sí la medida de la corrosión encontrada está dentro de los límites aceptables para los componentes de los automotores. Este grupo de trabajo ha llevado a cabo varios estudios para evaluar la resistencia de diferentes metales en biodiesel de palma [8,9, 13-16]. Realizaron estudios gravimétricos para comparar la resistencia a la corrosión de aluminio, cobre y acero inoxidable en diesel de petróleo y biodiesel, encontrando que el cobre y el aluminio fueron susceptibles a sufrir ataque corrosivo en el biocombustible [8]. Los resultados aportados en referencia al comportamiento de materiales no ferrosos en biodiesel [6-8,13-15] como ser aluminio, cobre, latón, magnesio, bronce con plomo, indican que los mismos son susceptibles a sufrir corrosión, siendo las aleaciones de cobre y plomo las más vulnerables.

Varios autores concuerdan respecto a la resistencia de los aceros en biodiesel de diferentes orígenes [9,10,17], así como también respecto a la susceptibilidad de las materiales no ferrosos mencionados [10, 11]. Enzhu Hu y col. [18] concluyeron que los efectos corrosivos del biodiesel de colza sobre cobre y acero al carbono fueron más severos que sobre acero inoxidable y aluminio. Sin embargo, es posible encontrar en la literatura, trabajos

que señalan que la interacción entre los metales y los biocombustibles dependerá del origen de estos últimos [4, 9, 19]. Pérez-Quiroz y col, [4] efectuaron pruebas de inmersión y pérdida de peso, para evaluar el comportamiento frente a la corrosión del aluminio y del acero inoxidable 439 en contacto con biodiesel. Los resultados indicaron que los materiales presentan tendencia a corroerse, pero no aportan información del mecanismo de corrosión. M. Luciano [12] evaluó el potencial corrosivo de biodiesel proveniente de aceite de soja, de mezclas de diesel y 5% biodiesel, y del diesel en estado puro en contacto con acero al carbono. Los resultados indicaron que el proceso de corrosión es selectivo y termodinámicamente favorable en contacto con todas las muestras de combustible, pero la velocidad de reacción es muy lenta. La presencia del biodiesel en el diesel aumentó su potencial corrosivo.

Los aceros inoxidables austeníticos son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales debido a su elevada resistencia mecánica y a la corrosión, su facilidad de trabajo mecánico, y su excelente conductividad eléctrica y térmica. En este grupo, el acero inoxidable AISI 316 es de gran interés práctico, ya que encuentra aplicación en la industria farmacéutica, petroquímica, alimenticia, en el transporte marítimo y en la construcción de estructuras en contacto con agua de mar, entre otros usos. Los aceros inoxidables AISI 304 y 316 se utilizan para manejar el ácido muy diluido a baja temperatura [20]. La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables es proporcionada por una película superficial delgada que se forma espontáneamente al contacto con soluciones acuosas o con aire húmedo conocida como película pasiva [20 -25]. Es generalmente aceptado que la película pasiva formada en los aceros inoxidables tiene una doble estructura que consiste en una región externa rica en hierro que contiene compuestos que se forman en la interfase metal / solución, y una película subyacente formada por óxido de cromo [20,21].

La composición de la aleación, las características del medio y las condiciones de formación de la película, son los factores que afectan el proceso de pasivación, resultando un proceso complejo [24].

En el presente trabajo se pretende evaluar la susceptibilidad frente a la corrosión en biodiesel de origen vegetal a temperatura ambiente de un acero inoxidable austenítico, a partir de estudios electroquímicos.

II. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de los ensayos electroquímicos se obtuvo un electrodo de trabajo del material en estudio, acero AISI 316 (Figura 1), cuya composición se presentan en la Tabla 1. Previamente a cada prueba, el mismo se pulió con papel de CSi hasta una granulometría

#1200, se lavó con agua desionizada y se secó por flujo de aire natural.

Tabla 1. Composición Química del material estudiado.

Acero AISI 316	Composición								
	C	Cr	Ni	Mo	Ti	Si	Mn	P	S
	0.080	18.00	10.00	2.00	0.1	1.00	2.00	0.045	0.030

Como materia prima para la obtención de la solución se utilizó biodiesel de origen industrial producido a partir de aceite de soja. Debido a la alta resistividad del mismo, se realizó una extracción acuosa para obtener la fracción iónica acuosa del biocombustible, que genera el proceso de corrosión [26]. Se midieron 50 ml de biodiesel y 100 ml de agua desionizada, se mezclaron para formar una emulsión durante 10 minutos (Figura 2 a), y se dejaron reposar durante 20 horas en una ampolla de decantación [26] (Figura 2 b). Luego de transcurrido este tiempo, se extrajo la fase acuosa que se utilizó como medio para los ensayos electroquímicos, manteniéndolo naturalmente aireado y a temperatura ambiente. Todos los ensayos electroquímicos se realizaron en el extracto acuoso del biocombustible. Para los mismos se utilizó una celda electroquímica de vidrio Pyrex® de tres electrodos (ASTM G-5), empleando un electrodo de referencia de Ag/AgCl y un contraelectrodo de platino (Figura 3). Todos los potenciales que figuran en el trabajo se encuentran referidos al electrodo de Ag/AgCl.

Se obtuvo la curva de polarización potenciodinámica, siguiendo la ASTM G5-87. El barrido de la misma se inició 250 mV por debajo del potencial de circuito abierto y finalizó al alcanzar un potencial de 150 mV. Se trabajó con un potencióstato/galvanostato Gamry Reference 600. Se registró la variación del potencial de corrosión E_c para evaluar su comportamiento en el tiempo, durante un período de 8 horas. Se efectuaron también medidas de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) empleando un potencióstato/galvanostato Gamry Reference 300. Se realizó un período inicial de estabilización del sistema de 600 segundos para determinar el potencial de circuito abierto y se trabajó con una amplitud de potencial de 10 mV alrededor de este. Para el ajuste de los resultados se utilizó el método de mínimos cuadrados no lineales diseñado por Bouckamp [27]. Los voltamperogramas se obtuvieron a una velocidad de barrido de 50 mV/s, desde un potencial inicial igual a -1100 mV hasta un potencial final de 900 mV. Estos dos últimos ensayos se efectuaron a diferentes tiempos de inmersión del electrodo de acero en la solución de estudio.



Figura.1. Electrodo de trabajo acero AISI 316.

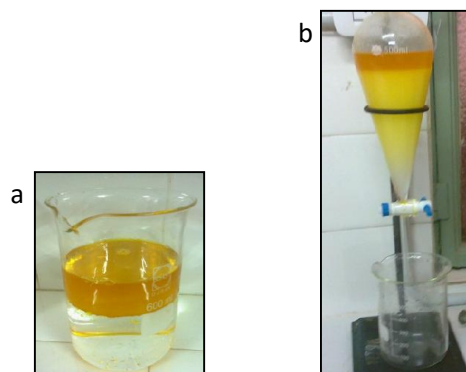


Figura.2. Etapas de la extracción de la fracción acuosa del biodiesel.

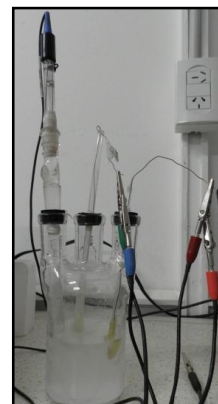


Figura.3. Celda electroquímica de tres electrodos.

III. RESULTADOS Y DISCUSION

Medida de Polarización potenciodinámica

En la Figura 4 se muestra la curva de polarización potenciodinámica obtenida en el extracto acuoso del biodiesel para el acero AISI 316. Puede observarse que el material se pasiva espontáneamente, presentando un potencial de corrosión E_c de -66 mV. El resultado obtenido está de acuerdo con lo esperado a partir de la revisión de la bibliografía respecto al comportamiento para los aceros inoxidable en diferentes medios acuosos [20 -25]. Los efectos transpasivos se visualizan recién a potenciales tan altos como 1300 mV mostrando el material un amplio rango de potenciales pasivos en el medio de estudio.

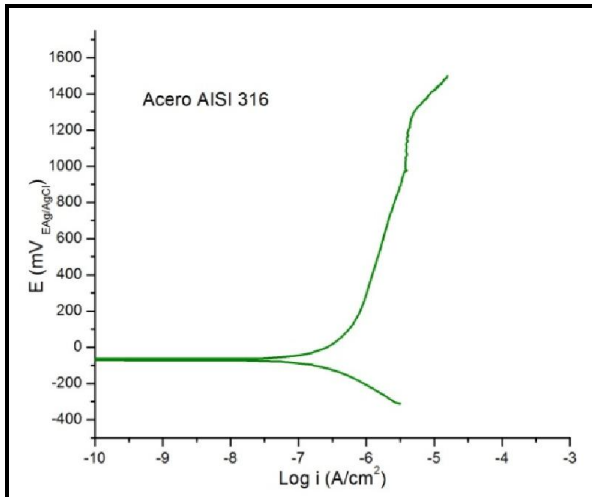


Figura 4. Curva de polarización potenciodinámica del acero AISI 316 en el extracto de biodiesel.

Medida de Potencial de circuito abierto en el tiempo

La evolución del potencial de circuito abierto del acero inoxidable AISI 316 durante 8 horas puede observarse en la Figura 5. La forma de la curva, con el aumento del potencial a valores más nobles indicaría que el metal se está pasivando [28]. El material se estabiliza a un potencial de 20 mV, pero tarda aproximadamente 5 horas en alcanzarlo. Dicho valor de potencial se halla muy alejado de la zona de transpasivación, y una vez alcanzado se mantiene constante en el tiempo. La curva obtenida no presenta ningún signo de ataque localizado, por lo que se puede deducir que el material es resistente al picado en la condición de estudio [25].

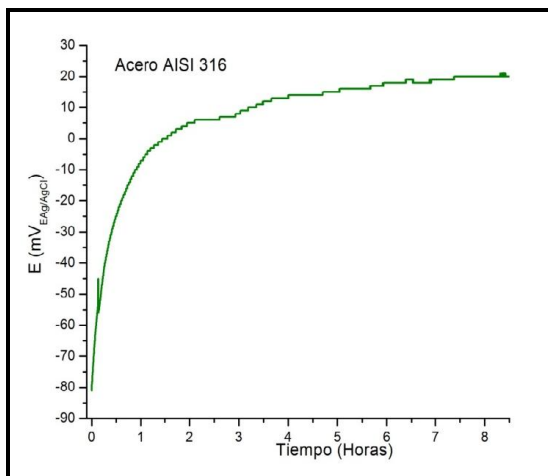
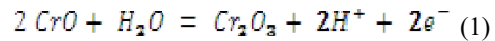


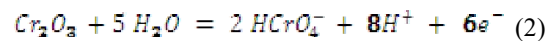
Figura 5. Curva de polarización potenciodinámica del acero AISI 316 en el extracto de biodiesel.

Medidas de Voltametría cíclica

El voltagrama obtenido para el acero AISI 316 en el medio en estudio se presenta en la Figura 6. En el barrido anódico de la curva pueden identificarse cuatro picos de corriente, que pueden explicarse en base a los equilibrios de Pourbaix [29]. A pH de la solución de trabajo, pH= 5,9 el pico A_I que se presenta a -950 mV puede deberse a la solubilidad del cromo [29], que se describe por la reacción



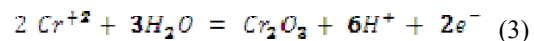
En el rango de potencial del pico A_{II} es termodinámicamente posible identificar la oxidación anódica del Fe [29-31], para dar un óxido de Fe²⁺. El pico A_{III}, observable a un potencial de -96 mV correspondería a la oxidación de Fe²⁺ a Fe³⁺ [29]. El último pico anódico, A_{IV} presente a 420 mV describe la reacción de oxidación del cromo,



En el barrido catódico pueden observarse también cuatro picos de corriente, que pueden deberse a las reacciones de reducción y a los equilibrios inversos de las reacciones asociadas a los picos anódicos ya descritos.

Se realizaron medidas voltamétricas luego de efectuar la inmersión del electrodo de trabajo durante dos períodos de tiempo diferentes en la solución de estudio (3 horas y 5 horas), de manera de contrastarlas con la gráfica obtenida sin ninguna inmersión previa y evaluar la evolución de las reacciones en el tiempo. En la Figura 7 se observan las voltametrías del acero AISI 316 obtenidas sin ninguna inmersión previa, y con un tiempo de inmersión de 3 horas.

La curva obtenida luego de 3 horas de inmersión presentó los picos anódicos A_{II}, A_{III} y A_{IV}. Se observa la ausencia del pico A_I, en cambio aparece un pico A_I' que correspondería a la siguiente transformación



La disminución de los valores de corrientes alcanzados en los picos anódicos indicaría que las reacciones se producen a una menor velocidad. El barrido anódico evidenció los picos C_{II}, C_{III} y C_{IV}.

En la Figura 8 puede verse el voltagrama obtenido luego de 5 horas de inmersión. En el mismo se evidencian los 3 picos anódicos identificados en el voltagrama obtenido sin inmersión (A_{II}, A_{III}, A_{IV}), mientras que aparece la misma reacción A_I' desplazada a potenciales más bajos debido a la mayor concentración de especies disueltas. En el barrido catódico puede notarse un acoplamiento de los picos C_{II} y C_{III}, asociados a la reducción del Fe [29]. Esto puede atribuirse a que los óxidos de hierro que

podrían formarse son muy insolubles y difíciles de reducir [30].

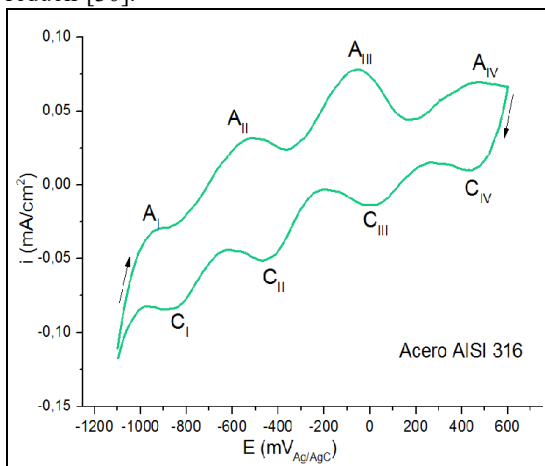


Figura 6. Voltagrama del acero AISI 316 en el extracto de biodiesel.

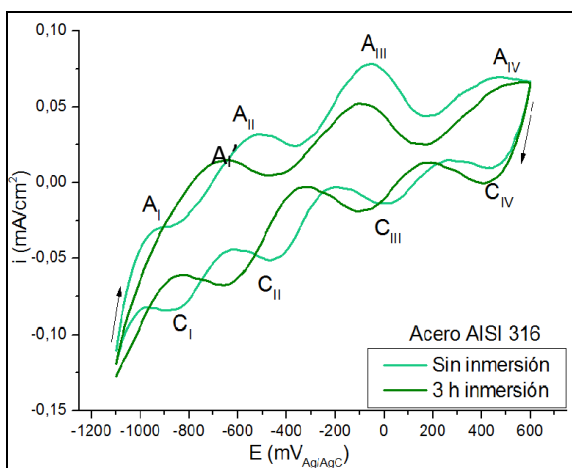


Figura 7. Voltagrama del acero AISI 316 en el extracto de biodiesel sin inmersión y luego de 3 horas de inmersión.

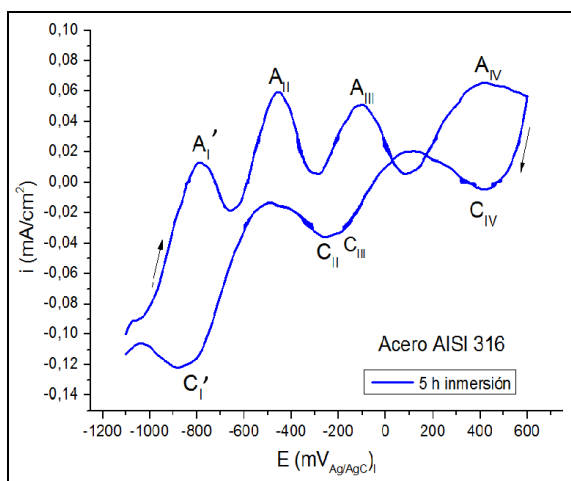


Figura 8. Voltagrama del acero AISI 316 en el extracto de biodiesel luego de 5 horas de inmersión.

Medidas de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica

La espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) se utiliza para explicar el comportamiento de las interfaces electrolito/solución, y generalmente los datos obtenidos son ajustados a modelos de circuitos equivalentes para su interpretación.

Las respuestas de impedancia obtenidas para el acero AISI 316 en los diferentes tiempos de inmersión en biodiesel se simularon mediante el circuito equivalente de Randles, que se muestra en la Figura 9, con un elemento de fase constante en lugar de una capacitancia [30,32]. Dicho circuito resulta apropiado para describir el comportamiento del acero AISI 316 en diferentes medios [30, 32, 33]. R_{Ω} corresponde a la resistencia del electrolito, R_1 corresponde a la resistencia de transferencia de carga asociado al elemento de fase constante CPE_1 . En la Tabla 2 se presentan los parámetros de ajustes de impedancia para los diferentes tiempos de inmersión. A mayor tiempo de inmersión del metal, se evidencia un aumento de la resistencia a la transferencia de carga, lo que indicaría un aumento a la resistencia a la corrosión. En la Figura 10 se presentan los diagramas de Nyquist, donde se observa el aumento de tamaño de los arcos capacitivos al aumentar el tiempo de inmersión del acero inoxidable en el biodiesel.

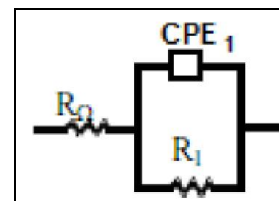


Figura 9. Circuito equivalente para el Ajuste de los datos experimentales.

Tabla 2. Parámetros del Ajuste de Impedancia.

Tiempos de Inmersión	$R_{\Omega_{mh}}$ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_1 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_1 ($\Omega^{-1} / \text{cm}^2$)	n_1
Sin inmersión	1180	71.800	7,9E-05	0,80
3 horas	1576	1588080	2,4E-05	0,85
5 horas	3900	8158800	3,6E-06	0,82

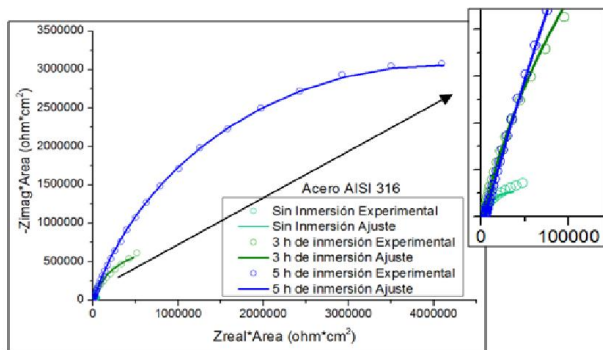


Figura 10. Diagramas de Nyquist del acero AISI 316 para diferentes tiempos de inmersión en biodiesel.

IV. CONCLUSIONES

El acero inoxidable AISI 316 en biodiesel presenta un amplio rango de pasivación. El potencial de circuito abierto se estabiliza aproximadamente luego de 5 horas, en un valor lejano a la zona de transpasivación.

Los ensayos voltamétricos para el acero AISI 316 en biodiesel indican que en el sistema tienen lugar las reacciones de oxidación del Fe y del Cr.

La película pasiva característica de los aceros inoxidables, se comporta de manera estable otorgándole resistencia a la corrosión al acero AISI 316 en biodiesel de soja, disminuyendo la tendencia a la corrosión del mismo, en el tiempo.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al FONCyT-ANPCyT por el subsidio recibido para financiar la presente investigación (PICT-2012-2952), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) de Argentina, y a la empresa BIONOGOYÁ, que donó el biodiesel utilizado para los ensayos.

VI. REREFENCIAS

- 1- Jorge Adámali, Rubén Ginzburg, Sebastián Torrella, Lucía Adámali, Biocombustibles: perspectivas ambientales en la Región Chaqueña, Bioenergía avances y perspectivas 2006. Selección de presentaciones correspondientes al SIMPOSIO INTERNACIONAL DE BIOENERGÍA (2006) 129-146.
- 2- E. L. Ploschuk, L.B. Winauer, Desarrollo de cultivos no tradicionales para la producción de biodiesel, Bioenergía avances y perspectivas 2006. Selección de presentaciones correspondientes al SIMPOSIO INTERNACIONAL DE BIOENERGÍA (2006) 69-81.
- 3- Guido Botta, Héctor Rosatto, Mario Tourn. Eduardo Souza, David Rivero, Soledad Stadler, Juan Vázquez, BIODIESEL. Desempeño en un motor de tractor agrícola, Bioenergía avances y perspectivas 2006.

Selección de presentaciones correspondientes al SIMPOSIO INTERNACIONAL DE BIOENERGÍA (2006) 1-14.

4- Pérez-Quiroz JT, Araujo-Areola NL, Torres-Murillo AI, Porcayo-Calderón J, Rendón-Belmonte M, Terán-Guillen J, Martínez-Madrid M, Pérez-Campos R., Corrosión y degradación de materiales por biocombustibles, Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. Barcelona, España; OmniaScience (2013) 69-85.

5- José Carlos Gameiro Miragaya, Biodiesel en Petrobras, Bioenergía avances y perspectivas 2006. Selección de presentaciones correspondientes al SIMPOSIO INTERNACIONAL DE BIOENERGÍA (2006) 173-183.

6- A.S.M.A. Hasseb, M.A.Fazal, M.I.Jahirul, H.H. Masjuki, "Compatibility of automotive materials in biodiesel: A review"; Fuel, 90, (2011) 922-931.

7- M.A.Fazal, A.S.M.A. Hasseb, H.H. Masjuki, "Comparative corrosive characteristics of petroleum diesel and palm biodiesel for automotive materials", Fuel Processing Technology, 91, (2010) 1308-1315.

8- M. A. Fazal, A.S.M.A. Hasseb, H. H. Masjuki, "Degradation of automotive materials in palm biodiesel", Energy, 10, (2012) 76-83.

9- Marcua Marie Maru, Marcia Maria Lucchese, Cristiano Legnani, Welber Gianini Quirino, Andrea Balbo, Isabele Bulhoes Aranha, Lilian Terezinha Costa, Cecilia Vilani, Lidia Ágata de Sena, Jailton Carreteiro Damasceno, Talira dos Santos Cruz, Leandro Reis Lidizio, Rui Ferreira e Silva, Ado Jorio, Carlos Alberto Achete, "Biodiesel compatibility with carbon steel and HDPE parts"; Fuel Processing Technology, 90, (2009) 1175-1182. -

10. B. Singh, John Korstad, Y.C. Sharma, "A critical review on corrosion of compresión ignition (CI) engine parts by biodiesel and biodiesel blends and its inhibition", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, (2012), 3401-3408.

11- Diana – Luciana Cursaru, Gheorghe Branoui, Ibrahim Ramadan, Florin Miculescu, "Degradation of automotive materials upon exposure to sunflower biodiesel", Industrial Crops and Products, 54, (2014) 149-158.

12- Milene Adriane Luciano "Avaliacao da corrosao do aco carbon ASTM A-36 quando em contato com biodiesel de variadas matrizes e diesel aditivado com 5% de biodiesel" Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Escola de Engenharia de UFMG, (2011).

13- A.S.M.A. Hasseb, H.H. Masjuki, L.J. Ann, M.A. Fazal, M., "Fuel Processing Technology Corrosion characteristics of copper and leaded bronze in palm biodiesel", 91, (2010) 329-334.

14- M.A. Fazal, A.S.M.A. Hasseb, H.H., "Corrosion mechanism of copper in palm biodiesel", 67, (2013) 50-59.

- 15- K. V. Chew, A.S.M.A. Hasseb, H. H. Masjuki, M. A. Fazal, M. Gupta, "Corrosion of magnesium and aluminum in palm biodiesel: A comparative evaluation", *Energy*, 57 (2013) 478-483.
- 16- M.A. Fazal, A.S.M.A. Hasseb, H. H. Masjuki, "Effect of temperature on the corrosion behavior of mild Steel upon exposure to palm biodiesel", *Energy*, 36 (2011) 3328-3334.,
- 17- Eurico Fernando de Miranda, "Comportamento quanto a corrosao de acos inoxidaveis na producao do biodiesel", Centro Universitario del Instituto Mauá, Sao Cayetano Sur, (2009).
- 18- Enzhu Hu, Yufu Xu, Xianguo Hu, Lijun Pan, Shaotong Jiang, "Corrosion behaviour of metals in biodiesel from rapeseed oil and methanol", *Renewable Energy*, 37, (2012) 371-378
- 19- Savita Kaul, R. C. Saxena, Ajay Kumar, M.S. Negi, A. K. Bhatnagar, H.B. Goyal, A.K. Gupta, "Corrosion behaviour of biodiesel from seed oils of Indian origin on diesel engine parts", *Fuel Processing Technology*, 88, (2007) 303-307.
- 20- Y. Ait Albrimi, A. Eddib, J. Douch, Y. Berghoute, M. Hamdani, R.M. Souto, "Electrochemical Behaviour of AISI 316 Austenitic Stainless Steel in Acidic Media Containing Chloride Ions", *International Journal of Electrochemical Science*, 6, (2011) 4616-4627.
- 21- R.M. Fernández-Domene, E. Blasco-Tamarit, D.M. García-García, J. García-Antón, "Effect of alloying elements on the electronic properties of thin passive films formed on carbon steel, ferritic and austenitic stainless steels in a highly concentrated LiBr solution", *Thin Solid Films*, 558, (2014) 252-258.
- 22- L. Freire, M.A. Catarino, M.I. Godinho, M.J. Ferreira, M.G.S. Ferreira, A.M.P. Simoes, M.F. Montemor, "Electrochemical and analytical investigation of passive films formed on stainless steels in alkaline media", *Cement & Concrete Composites*, 34, (2012) 1075-1081.
- 23- M. Metikoš-Hukovic, R. Babic, Z. Grubac, Z. Petrovic, N. Lajci, "High corrosion resistance of austenitic stainless steel alloyed with nitrogen in an acid solution", *Corrosion Science*, 53, (2011) 2176-2183.
- 24- C.M. Abreu, M.J. Cristóbal, R. Losada, X.R. Nóvoa, G. Pena, M.C. Pérez, "The effect of Ni in the electrochemical properties of oxide layers grown on stainless steels", *Electrochimica Acta*, 51, (2006) 2991-3000.
- 25- Claudia M. Méndez, Elsa R. Ruiz, "Evaluación de aceros inoxidables dúplex para la construcción de un digestor", *Rev. Cienc. Tecnol*, 16, (2013) 44-48
- 26- Siloé Vuelvas Rayo, "Evaluación del fenómeno de corrosión en el reactor de hidrosulfuración del diesel", Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia Michoacan, (2007).
- 27- "Boukamp"; 1989, B.A. Equivalent Circuit, University of Twente,.
- 28- Christian Vargel, "Corrosion of Aluminium"; 2004, Elsevier.
- 29- Marcel Pourbaix; "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions" 1974, Cebelcor.
- 30- Quintin W. Knapp, Jungsook Clara Wren, "Film formation on type-316L stainless steel as a function of potential: Probing the role of gamma-radiation", *Electrochimica Acta*, 80, (2012) 90-99.
- 31- M. Kuczynska-Wydorska, J. Flis, "Corrosion and passivation of low-temperature nitrided AISI 304L and 316L stainless steels in acidified sodium sulphate solution", *Corrosion Science*, 50, (2008) 523-533
- 32- Zsolt Kerner, Akos Horvath, Gabor Nagy, "Comparative electrochemical study of 08H18N10T, AISI 304 and AISI 316L stainless steels", *Electrochimica Acta*, 52, (2007) 7529-7537.
- KFKI Atomic Energy Research Institute, H-1525
- 33- José Luis Polo, Conceta Luz Torres, Emilio Cano, José María Bastidas, "Estudio de impedancia de la corrosión del acero inoxidable 316 en las regiones pasiva y de picadura", *Rev. Metal. Madrid*, 35, (1999), 368-378.