



ELECTRODISOLUCIÓN SELECTIVA DE ACERO INOXIDABLE AISI 304 EN UN ELECTROLITO ECOLÓGICO A BASE DE NaCl

SELECTIVE ELECTRODISSOLUTION OF AISI 304 STAINLESS STEEL USING ECO-FRIENDLY NaCl-BASED ELECTROLYTE

H.V. Suárez Miranda^{1,*}, G. Vargas Gutiérrez²

¹ Universidad Nacional de Ingeniería. Área de Conocimiento de Agricultura. Managua, Nicaragua.

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), Unidad Saltillo Parque Industrial Saltillo, Ramos Arizpe, Coahuila, México

*hsuarez2017nic@gmail.com

(recibido/received: 26-06-2024; aceptado/accepted: 14-10-2024)

RESUMEN

Comúnmente, el procedimiento estándar de electrodisolución se realiza con electrolitos de base ácida, generando problemas ambientales y de seguridad. En esta investigación, se utilizó un electrolito ecológico compuesto por etilenglicol, cloruro de sodio y agua para electrodisolver selectivamente la superficie del acero inoxidable AISI 304. Para evaluar su comportamiento electroquímico, propiedades de humectabilidad, características superficiales y resistencia a la corrosión en agua de mar simulada; se usaron técnicas de voltamperometría, ángulo de contacto, microscopía electrónica de barrido y polarización potenciodinámica cíclica, respectivamente. La electrodisolución se efectuó en una celda electroquímica con un arreglo de tres electrodos (platino como contraelectrodo, Ag/Ag⁺ como electrodo de referencia y un disco de ½" de acero inoxidable AISI 304 como electrodo de trabajo). Los resultados de las pruebas electroquímicas y de caracterización superficial indican que las mejores condiciones de electrodisolución, 4V y 30 minutos, se logran con un electrolito compuesto por 10.14% m/m NaCl, 67.40% m/m EG y 22.46% m/m H₂O. En estas condiciones se obtuvo una superficie hidrofóbica, con un aumento del 72.15% en la resistencia a la corrosión por picaduras y una reducción del 96.71% en la velocidad de corrosión general, con respecto al acero inoxidable AISI 304 sin tratamiento.

Palabras clave: Electrodisolución; Corrosión; Acero inoxidable; Etilenglicol; Cloruro de sodio.

ABSTRACT

Commonly, the standard electrodisolution procedure is carried out with acid-based electrolytes, generating environmental and safety problems. In this research, an environmentally friendly electrolyte composed of ethylene glycol, sodium chloride and water was used to selectively electrodisolve the surface of AISI 304 stainless steel. To evaluate its electrochemical behavior, wettability properties, surface characteristics and corrosion resistance in simulated sea water; voltammetry, contact angle, scanning electron microscopy and cyclic potentiodynamic polarization techniques were used respectively. Electrodisolution was carried out

* Autor de correspondencia.
Correo: hsuarez2017nic@gmail.com

in an electrochemical cell with a three-electrode arrangement (platinum as counter electrode, Ag/Ag⁺ as reference electrode and a ½" AISI 304 stainless steel disc as working electrode). The results of the electrochemical and surface characterization tests indicate that the best electrodisolution conditions, 4V and 30 minutes, are achieved with an electrolyte composed of 10.14% m/m NaCl, 67.40% m/m EG and 22.46% m/m H₂O. Under these conditions, a hydrophobic surface was obtained, with a 72.15% increase in resistance to pitting corrosion and a 96.71% reduction in the general corrosion rate, with respect to untreated AISI 304 stainless steel.

Keywords: Electrodisolution; Corrosion; Stainless Steel; Ethylene glycol; Sodium chloride.

1. INTRODUCCIÓN

El agua de mar es un entorno altamente corrosivo para los aceros inoxidable, no solo por la presencia de iones cloruros, bromuros y yoduros, sino también por su actividad biológica. Según (Phull, 2010), cuando el acero se sumerge en el agua de mar se cubre con una biopelícula que modifica la interfaz metal/solución induciendo cambios que dependen del tipo y concentración de iones, valores de pH, niveles de oxígeno, velocidad del flujo y comportamiento electroquímico, haciéndolo más susceptible a la corrosión localizada. Este fenómeno conduce al deterioro del material y en consecuencia a un acortamiento de su vida útil, provocando grandes pérdidas económicas.

La electrodisolución selectiva es un tratamiento superficial electroquímico que busca mitigar el fenómeno de corrosión localizada al promover el incremento de la relación Cr/Fe en la superficie de los aceros inoxidable. Sin embargo, usualmente se realiza en electrolitos ácidos concentrados, como ácido fosfórico, ácido sulfúrico, ácido perclórico y sus mezclas, y como disolvente comúnmente se usa metanol, glicerol y ácido acético glacial, ocasionando serios problemas medioambientales y de seguridad. (Han y Fang, 2020) estudiaron el uso de un electrolito alternativo ecológico compuesto por etilenglicol y cloruro de sodio en la electrodisolución del acero inoxidable 316L, comparándolo con un electrolito convencional a base de ácido sulfúrico. Sus resultados revelaron que el electrolito a base de cloruro de sodio no solo permitió un mejor efecto de electropulido a temperatura ambiente, sino que se obtuvo una rugosidad superficial menor en comparación con el electrolito a base de ácido sulfúrico, logrando duplicar la tasa de eliminación de material gracias a la mayor eficiencia de corriente del electrolito a base de NaCl.

Por otro lado, Rodríguez, Martínez y Videá (2020) realizaron una metodología ecológica para hacer crecer nanotubos de TiO₂ en un baño electrolítico de etilenglicol, agua y cloruro de sodio. La electrodisolución fue realizada a 20V durante 60 min en una solución de NaCl 0.9 M en etilenglicol. Los resultados mostraron que a contenidos de agua superiores al 50% se obtuvieron nanotubos, mientras que con un 25% de agua se promueve la electrodisolución, observándose la formación de una película delgada de óxido. En este contexto, la presente investigación analiza el efecto de un electrolito no convencional, compuesto por etilenglicol, cloruro de sodio y agua sobre la electrodisolución selectiva del acero inoxidable AISI 304; evaluando además las propiedades de humectabilidad y resistencia a la corrosión en agua de mar simulada. Con ello, se pretende ofrecer una alternativa sostenible para incrementar la vida útil del material, minimizando riesgos ambientales y operativos asociados al uso de electrolitos convencionales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales y reactivos

El estudio electroquímico y el proceso de electrodisolución se llevaron a cabo en una celda electroquímica, con un arreglo de tres electrodos (Figura 1), conectada a un potencióstato PARSTAT[®] multicanal, de la compañía AMETEK, controlado por el software Versa Studio[®].

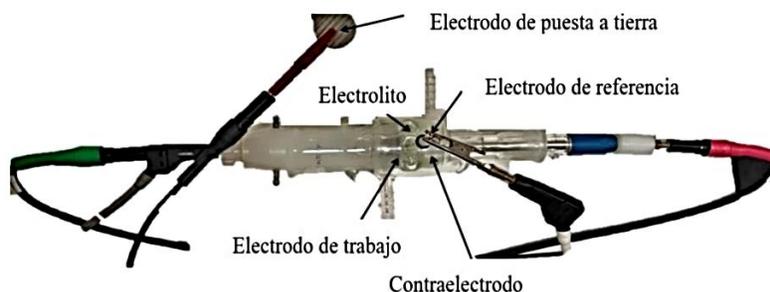


Figura 1. Montaje de celda electroquímica de 30 mL.

Como contraelectrodo se usó un electrodo de platino (Pt), como electrodo de referencia se utilizó un electrodo de Ag/Ag^+ y como electrodo de trabajo un disco de acero inoxidable AISI 304, de 13 mm de diámetro y 1 mm de espesor. La composición química de la pieza de trabajo se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del acero inoxidable AISI 304 (Laboratorio de Análisis Químico, CINVESTAV, Unidad Saltillo).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Fe
% en peso	0.015	0.243	1.68	0.044	0.014	18.04	1.76	9.56	0.541	0.079	68.08

La solución electrolítica se preparó con etilenglicol, IsaaQuim[®] (99% de pureza), agua destilada y cloruro de sodio comercial, Fagalab[®]. Según los datos de solubilidad del sistema ternario etilenglicol-agua-cloruro de sodio, detallados por (Trimble, 1931), se realizó un ajuste polinómico de la curva de equilibrio del sistema ternario (Figura 2) y a partir de la función obtenida se determinó la composición del electrolito, para un 25% de agua en etilenglicol, resultando una composición en porcentaje masa/masa de 10.14% NaCl, 67.40% EG, y 22.46% H_2O , en condiciones de equilibrio.

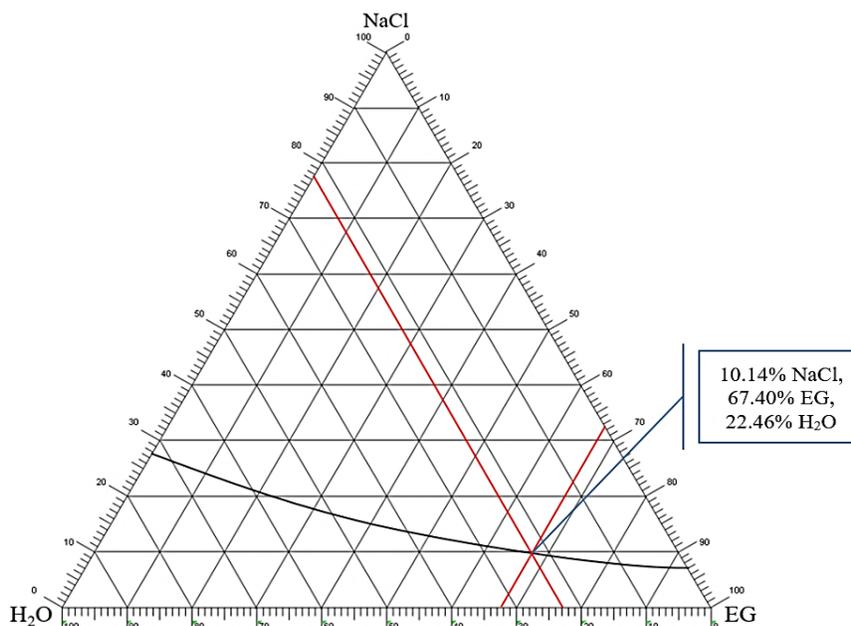


Figura 2. Diagrama ternario y curva de equilibrio del sistema etilenglicol-agua-cloruro de sodio (adaptado de Trimble, 1931).

2.2. Estudio electroquímico

La voltamperometría de barrido lineal se realizó a una velocidad de barrido de 5 mV/s, a temperatura ambiente y en un intervalo de potencial de 0-10V.

La técnica de cronoamperometría se aplicó a temperatura ambiente, durante 10, 20 y 30 minutos, a los potenciales establecidos por la prueba de Voltamperometría de Barrido Lineal (LSV por sus siglas en inglés) (4, 5 y 6V).

2.3. Proceso de electrodisolución selectiva

Previo al montaje de la celda electroquímica, se realizó una limpieza del contraelectrodo de platino, usando un paño de pulido y pasta de diamante de 3 micras. Posteriormente, se le realizó una limpieza ultrasónica en etanol durante 10 minutos y se enjuagó con agua destilada. Además, se realizó una limpieza y desengrasado a las piezas de acero inoxidable AISI 304 de acuerdo con la norma ASTM B322-99.

Para el montaje de la celda, el electrodo de trabajo se conectó a la fuente de potencia, en el polo positivo. En el polo negativo se conectó el contraelectrodo de platino. El intervalo de potencial aplicado entre 4 y 6V corresponde a la zona de estabilización de la densidad de corriente.

2.4. Caracterización superficial

Prueba de ángulo de contacto y energía superficial. El ángulo de contacto se determinó con un goniómetro modelo SI-CAM2000D. Inicialmente, se colocó una gota de agua desionizada sobre la superficie con una jeringa de 50 μ L. Posteriormente, se realizó un enfoque con la cámara del equipo y se calculó el ángulo de contacto con la ayuda del software SI-CAM2000D, considerando tres puntos de referencia. La energía superficial de las probetas, se determinó a partir del ángulo de contacto según la ecuación 1. En la Tabla 2, se detallan los parámetros usados para el cálculo de la energía superficial.

$$\gamma^{SV} = \gamma^{SL} + \gamma^{LV} \cos \theta \quad (1)$$

Tabla 2. Parámetros de energía superficial del líquido (LabGeni)

Líquido	γ_L^P	γ_L^D	γ_L	γ_L^P/γ_L^D
Agua	51	21.8	72.8	2.36

Rugosidad. Las pruebas de rugosidad superficial se realizaron mediante un rugosímetro surfest SJ-210-178-561-02A, aplicando la norma ISO 4287:1997. Las longitudes de onda de corte aplicadas fueron $\lambda_c=0.8$ cm y $\lambda_s=2.5$ μ m, a una velocidad de 0.5 mm/s, con un número de cálculo N=5.

Microscopia Electrónica de Barrido (MEB). Se realizó un análisis de la microestructura de la superficie del acero inoxidable AISI 304 sin tratamiento y de las superficies electrodisueltas, mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés), marca PHILIPS®, modelo XL30ESEM. Los valores de los parámetros aplicados para la toma de imágenes fueron 15 kV de voltaje de aceleración, 10 μ m de apertura de lente (spot size) y una distancia de trabajo de 10.1, 10.3 y 10.4 mm.

2.5. Pruebas de corrosión

Para evaluar la resistencia a la corrosión se utilizó la prueba de polarización potenciodinámica cíclica, usando una celda electroquímica de tres electrodos (platino como contraelectrodo, Ag/AgCl como electrodo de referencia y un disco de acero inoxidable AISI 304 como electrodo de trabajo). Como electrolito se usó agua de mar simulada (ISO 11130, 2010). El equipo utilizado es un potenciostato PARSTAT® multicanal, controlado por el software Versa Studio®. Inicialmente, se realizó una desaireación con gas nitrógeno durante 1 hora para eliminar el oxígeno presente en la celda, posteriormente se aplicó la prueba de potencial en circuito abierto durante 50 minutos. La prueba de polarización potenciodinámica cíclica se realizó de acuerdo con los parámetros indicados en la norma ASTM G61-86, siendo la velocidad de escaneo de 0.6 V/h. A partir de los resultados obtenidos, se graficaron las curvas Tafel y se realizó una extrapolación lineal de las curvas anódica y catódica según las ecuaciones 2 y 3, mediante el software EC-Lab®.

$$y_a = \beta_a x + b_a \quad (2)$$

$$y_c = \beta_c x + b_c \quad (3)$$

Con los parámetros electroquímicos de corrosión calculados, se determinó la velocidad de corrosión en mm/año según la ecuación 4, mediante el software EC-Lab®.

$$CR = 3.27 * 10^{-3} \frac{J_{corr} EW}{\rho} \quad (4)$$

Donde CR es la velocidad de corrosión en mm por año, J_{corr} es la densidad de corriente de corrosión ($\mu A/cm^2$), EW es el peso equivalente de las especies corrosivas (g) y ρ es la densidad del material corrosivo (g/cm^3).

La resistencia a la corrosión por picaduras (R_{pit}) se evaluó mediante la ecuación 5, donde E_{corr} es el potencial de corrosión en estado estable y E_{pit} es el potencial de picaduras.

$$R_{pit} = |E_{corr} - E_{pit}| \quad (5)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Condiciones de electrodisolución

Voltamperometría de barrido lineal. La Figura 3 muestra la LSV obtenida para el acero inoxidable AISI 304 electrodisuelto en EG-NaCl-H₂O (25% de H₂O en EG). La curva de polarización muestra cuatro regiones, la primera región presenta fenómenos de grabado, en esta región hay un aumento acelerado en la densidad de corriente correspondiente a la disolución del metal en el ánodo. La segunda región es la región de pasivación donde ocurre una disminución en la densidad de corriente, lo que indica la formación de una película pasiva de óxido en el ánodo.

En la tercera región, denominada región de control óhmico, la densidad de corriente se estabiliza, este comportamiento está relacionado a la estabilización de la capa pasiva de óxido, por tanto, esta región es la de mejores condiciones de electrodisolución, sin dañar el acabado superficial. En la cuarta región hay nuevamente un aumento en la densidad de corriente, generándose picaduras en la superficie del metal, lo que a su vez está relacionado al incremento del potencial.

En la Figura 3, se observa que el potencial de la región óhmica (región III) se mantuvo entre 4 y 6V con una densidad de corriente de 50 mA/cm². Este valor de densidad de corriente fue mucho mayor que el observado cuando se usa como solvente únicamente etilenglicol, debido a la mayor conductividad eléctrica (19.55 mS/cm²) de la mezcla con 25% de H₂O en EG.

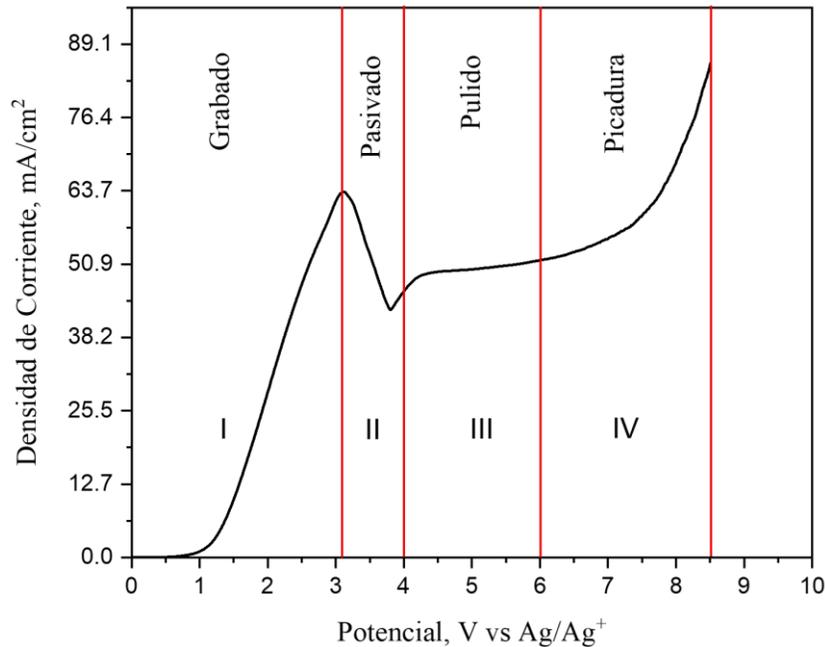


Figura 3. Voltamperometría de barrido lineal del acero inoxidable AISI 304 electrodisuelto en EG-NaCl-H₂O (25% de H₂O en EG). Velocidad de barrido de 5mV/s, temperatura ambiente, electrodo de referencia Ag/Ag⁺ [3.5M].

Cronoamperometría. Las curvas mostradas en la Figura 4 representan gráficamente el proceso de electrodisolución selectiva del acero inoxidable AISI 304, en el cual los componentes del sustrato se disuelven en el ánodo (6).



Las cronoamperometrías presentadas en la Figura 4, muestran un aumento en la densidad de corriente durante los primeros 40 segundos, consecuencia de una disolución acelerada, posteriormente ocurre una caída de corriente asociada a un aumento de resistencia debido a la formación de una película pasiva de óxido en la superficie. Luego de 2.5 minutos el proceso tiende a estabilizarse. En el caso de las piezas electrodisueltas a 4V la densidad de corriente se mantuvo cerca de 55 mA/cm². En las piezas electrodisueltas a 6V se observó un aumento en la densidad de corriente previo al periodo de estabilización. Según (Liu-You *et al.*, 2023), dicho comportamiento puede estar asociado a reacciones de oxidación. Esto resultó en un pulido superficial irregular. Por esta razón, en las condiciones estudiadas, si se requiere lograr una superficie tersa habría que limitar el potencial aplicado a valores entre 4 y 5V.

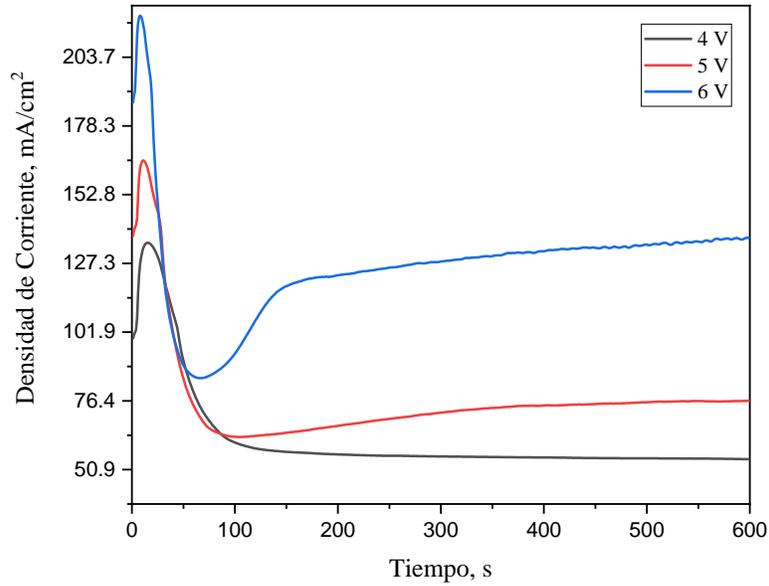


Figura 4. Cronoamperometría AISI 304 SS electrodisuelto en EG-NaCl-H₂O (25% de H₂O en EG). Potencial 4-6V, tiempo 10min, temperatura ambiente, electrodo de referencia Ag/Ag⁺ [3.5M].

3.2. Caracterización superficial

Ángulo de contacto y energía superficial. Los valores de ángulo de contacto del acero inoxidable AISI 304 electrodisuelto, mostrados en la Tabla 3, indican que el proceso de electrodisolución incrementa el ángulo de contacto de la superficie del acero sin tratamiento ($\theta = 34.85^\circ$) hasta 109.20° a 4V y 30 minutos de tratamiento. La pieza electrodisuelta a estas condiciones alcanza la propiedad de hidrofobicidad ($\theta > 90^\circ$), lo que permite promover un efecto autolimpiante. En la Tabla 3, se observa una disminución en la energía superficial con respecto al tiempo y el potencial de electrodisolución. A mayor tiempo de electrodisolución la energía superficial disminuye, por lo que las fuerzas de atracción en la superficie de dichas piezas son más débiles y por tanto hay un menor grado de adhesión. A menor potencial aplicado, la superficie de la pieza se vuelve más lisa y uniforme, haciendo que la gota de agua resbale con mayor facilidad, evitando que se adhiera a la superficie. En este sentido, las condiciones que presentan una menor energía superficial son 4V y 30 min.

Tabla 3. Ángulo de contacto y energía superficial de piezas electrodisueltas cuando se usa un solvente compuesto por 25% de H₂O en EG.

Tiempo, min	Potencial, V	Ángulo de contacto, °	Energía superficial, mN/m
10	4	105.68	26.98
	5	81.44	35.90
	6	73.89	38.63
20	4	108.03	26.14
	5	107.05	26.49
	6	79.61	36.57
30	4	109.20	25.73
	5	108.20	26.08
	6	88.58	33.26

La transición de la superficie del acero inoxidable AISI 304 hacia una condición hidrofóbica puede generar una barrera que dificulte la formación de una biopelícula. Además, la hidrofobicidad también contribuye a simplificar los requerimientos de mantenimiento, disminuyendo costos y tiempos de inactividad en equipos y dispositivos utilizados en agua de mar.

Como referencia, (Liu-Yin *et al.*,2007) realizaron una modificación superficial a una pieza de cobre mediante un pulido químico con una solución etanólica de ácido n-tetradecanoico, los resultados mostraron que los ángulos de contacto aumentaron en función del tiempo de inmersión, alcanzando un valor máximo de 158°, después de 10 días. Las piezas de acero inoxidable AISI 304 electrodisueltas en etilenglicol, agua y cloruro de sodio, analizadas en la presente investigación, alcanzaron un valor máximo de ángulo de contacto de 109.20°, siendo este un método más seguro para los operadores y más amigable con el ambiente, principalmente por la naturaleza del electrolito, además de un menor tiempo de exposición. Por otro lado, (Liu-Yin *et al.*,2007) encontraron que las superficies de cobre, con esta nueva propiedad de superhidrofobicidad, incrementaron la resistencia a la corrosión de las piezas sumergidas en agua de mar, demostrando la influencia que tienen las propiedades de humectabilidad en las propiedades anticorrosivas del material.

Rugosidad superficial. El incremento en la rugosidad media aritmética (R_m) y la altura máxima de rugosidad media (R_z), hace que las superficies de las piezas de acero sean más susceptibles a la formación de picaduras y, por tanto, a la corrosión localizada. Según la Tabla 4, al electrodisolver la pieza de acero inoxidable AISI 304 a 4V, se obtienen superficies menos rugosas que la del acero inoxidable AISI 304 sin tratamiento (0.242 μ m). A 5V y 6V la rugosidad aumenta por la presencia de cavidades que se forman al liberarse gas hidrógeno en el ánodo (7). Según (Kyungsik, 2015), estos acabados irregulares se deben a que la presencia de agua en los electrolitos aumenta la solubilidad de los óxidos formados, modificando el equilibrio entre disolución y formación de óxidos, generando así zonas de la superficie más propensas a llevar a cabo las reacciones de oxidación.



Tabla 4. Rugosidad del acero inoxidable AISI 304 electrodisuelto, solvente compuesto por 25% de H₂O en EG.

Potencial, V	Tiempo, min	R_m , μ m	R_z , μ m
4	10	0.157	1.027
	20	0.136	0.650
	30	0.107	0.568
5	10	0.953	5.829
	20	1.582	8.893
	30	2.320	11.782
6	10	2.193	10.652
	20	2.654	10.781
	30	3.593	16.983

La Figura 5 presenta una comparación del perfil de rugosidad del acero inoxidable AISI 304 sin tratamiento y las piezas electrodisueltas a 4, 5 y 6V, durante 30 minutos, observándose más a detalle los picos y valles presentes en la superficie del acero. Se observa que la altura entre pico y profundidad (R_z) de las piezas electrodisueltas a potenciales de 5V y 6V es mayor que la de las piezas electrodisueltas a 4V, lo que indica que al electrodisolver a 5V y 6V, se obtienen superficies más propensas a la corrosión localizada. Además,

se observa que la pieza electrodisuelta a 4V tiene un perfil de rugosidad con un R_z y R_m menor que el acero inoxidable sin tratamiento, por tanto, tiende a ser menos susceptible a la formación de picaduras que la pieza sin electrodisolver.

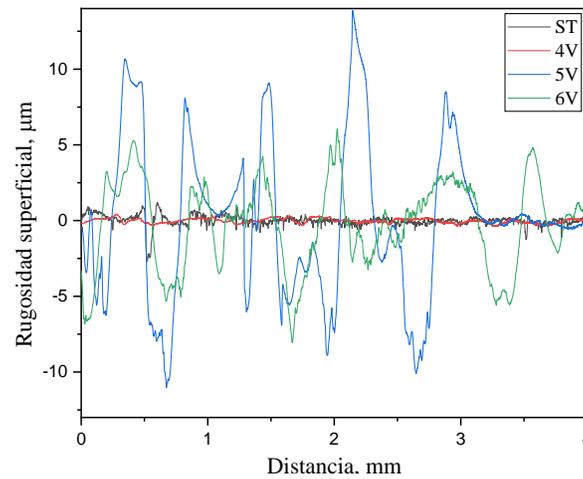


Figura 5. Perfil de rugosidad AISI 304 SS con y sin electrodisolución para potenciales entre 4V-6V, tiempo 30 min.

Microscopia Electrónica de Barrido (MEB). La Figura 6 muestra las microfografías obtenidas por MEB del acero inoxidable AISI 304 con y sin electrodisolución. En la Figura 6a se observa una microestructura superficial constituida por granos de austenita equiaxial, característica del acero inoxidable austenítico (Newby, 1985). Además, se observan algunos defectos producto del procesamiento y manejo de la lámina de acero. En las Figuras 6b-6d, se observa que la superficie del acero inoxidable AISI 304 se vuelve más uniforme y nivelada, revelándose los granos de austenita. Por otro lado, se observa que, a mayor tiempo de tratamiento, la intensidad del brillo aumenta, obteniéndose una superficie más lisa y brillante, de modo que, según (Łyczkowska-Lochyński *et al.*, 2020), la capa superficial queda protegida contra cambios estructurales.

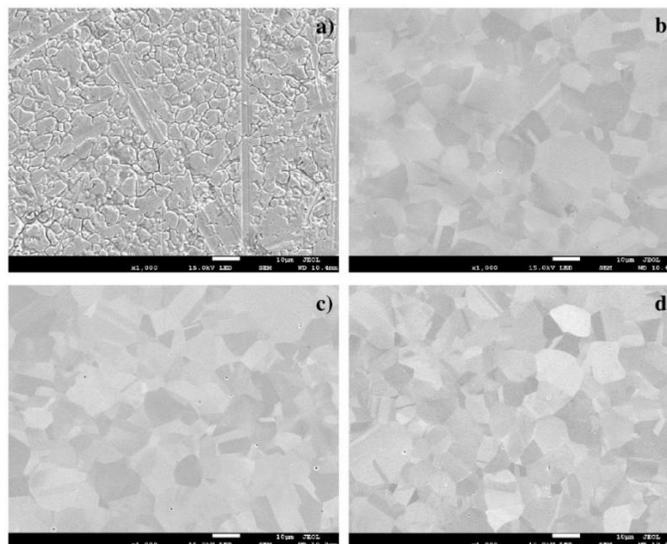


Figura 6. Microestructura del AISI 304 SS electrodisuelto a diferentes condiciones: a) Sin tratamiento, b) 4V, 10min, c) 4V, 20min, d) 4V, 30min. MEB a 1000X.

3.3. Resistencia a la corrosión

La Figura 7 muestra las curvas de polarización potenciodinámica cíclica (CPPC) del acero inoxidable AISI 304 sin tratamiento (Figura 7a) y del acero inoxidable AISI 304 electrodisuelto a diferentes condiciones (Figuras 7b-7d). En las CPPC se muestran las curvas anódica y catódica, y los potenciales que se requieren para el análisis de corrosión: potencial de circuito abierto o potencial de corrosión (E_{corr}), potencial de nucleación de picaduras (E_{pit}) y potencial de repasivación (E_{rep}), estos dos últimos potenciales permiten definir tres regiones características de la curva de polarización, de la siguiente forma (Zoski, 2007):

- $E > E_{pit}$ inicio de la formación de picaduras.
- $E < E_{rep}$ el acero inoxidable permanece en estado pasivo.
- $E_{rep} < E < E_{pit}$ no permite la formación de nuevas picaduras, pero sí el desarrollo de las ya existentes.

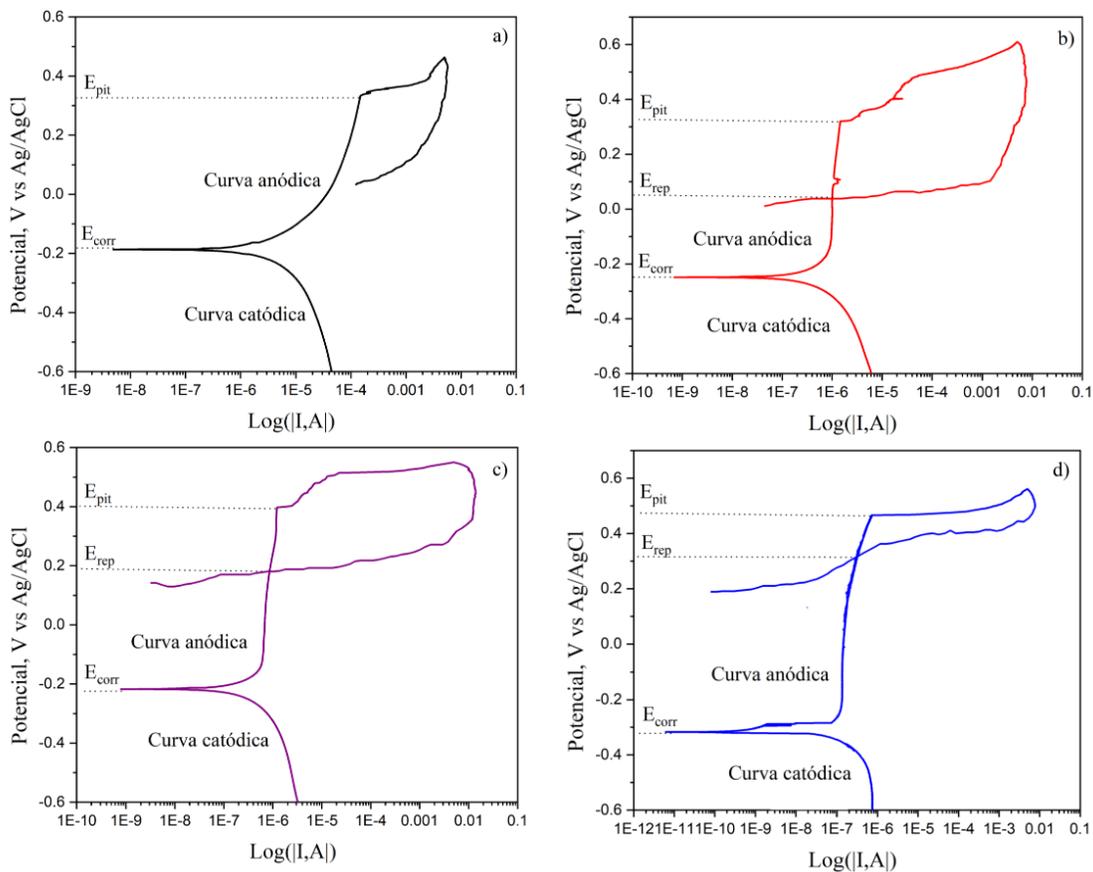


Figura 7. Curvas de polarización cíclica, 0.6 V/h. AISI 304 SS electrodisuelto, solvente 25% de H_2O en EG, 4V, a diferentes tiempos a) Sin tratamiento, b) 10min, c) 20min, d) 30min.

En la Figura 7 se observa que las CPPC de las piezas electrodisueltas, a diferentes condiciones, muestran un bucle de histéresis, lo que indica una repasivación de su superficie. La histéresis anódica positiva que se forma en el escaneo inverso, muestra que la corrosión por picaduras se produce a potenciales más positivos que E_{corr} , pero se detiene mediante la repasivación de las picaduras en la superficie (Esmailzadeh-Aliofkhazraei *et al.*, 2018).

Según la Tabla 5, la corriente de corrosión I_{corr} y, en consecuencia, la densidad de corriente de corrosión $J_{corr}(I_{corr}/A)$, disminuye en función del tiempo de electrodisolución, es decir hay una menor demanda de corriente, por tanto, según la ecuación 4, la velocidad de corrosión de las piezas electrodisueltas disminuye con respecto a la del acero inoxidable AISI 304 sin tratamiento. Además, se observó que los potenciales de corrosión (E_{corr}) de las piezas electrodisueltas son menores que el del acero inoxidable AISI 304 sin tratamiento, lo que indica que las piezas electrodisueltas tienden a ser más estables y menos reactivas que el material sin electrodisolver. En este sentido, la pieza electrodisuelta a 4V y 30 minutos, es la que presenta una menor velocidad de corrosión general (0.000684 mmpy) con respecto al acero inoxidable AISI 304 sin tratamiento (0.020825 mmpy); lo cual implica una reducción del 96.71%. Esta reducción es ocasionada por la alta disolución del hierro con respecto al cromo, asociada a la composición del electrolito, la densidad de corriente y el tiempo de electrodisolución. Esta mejora en la resistencia a la corrosión del material electrodisuelto, se asocia a la formación de una capa pasiva de Cr_2O_3 más uniforme y densa que la producida de forma natural en los aceros inoxidables. Además, la reducción de rugosidad producto del nivelado y suavizado de la superficie electrodisuelta, también reduce su corrosión.

Tabla 5. Parámetros de corrosión general y por picadura.

Composición del electrolito % (m/m)	Potencial V	Tiempo min	E_{corr} V	E_{pit} V	R_{pit} V	E_{rep} V	I_{corr} μA	CR mmpy
Sin tratamiento 67.40% EG, 10.14% NaCl, 22.46% H ₂ O	0	0	-0.188	0.304	0.492	0	1.585	0.020825
		10	-0.251	0.320	0.571	0.039	0.207	0.002623
	4	20	-0.218	0.400	0.618	0.180	0.099	0.001255
		30	-0.348	0.499	0.847	0.315	0.054	0.000684

De acuerdo con la Tabla 5, los valores de E_{pit} y E_{rep} aumentan con un tiempo mayor de electrodisolución, esto puede ocurrir debido a que las piezas electrodisueltas durante mayor tiempo, presentan menores valores de rugosidad superficial (reducción del 55.78% para el acero electrodisuelto, a 4V y 30 minutos, con respecto al acero sin tratar), lo que hace que la superficie del metal sea menos propensa al desarrollo de picaduras (Pedefferri, 2018). Además, se observa que el potencial de repasivación de las piezas electrodisueltas aumenta en función del tiempo de tratamiento, siendo $E_{rep} > E_{corr}$ en todos los casos, por tanto, el acero inoxidable AISI 304 electrodisuelto a 4V durante 10, 20 y 30min, tiene la capacidad de regenerar la capa pasiva ante una ruptura de la misma. Por otro lado, según los criterios de susceptibilidad a la corrosión por picaduras establecidos por (Saadawy, 2012), la forma más efectiva de evitar picaduras es la elección de las piezas que presenten mayores potenciales de nucleación de picaduras y de repasivación, con respecto al potencial de corrosión. Por tanto, el acero inoxidable AISI 304 electrodisuelto, en el electrolito compuesto por 67.4% EG, 10.1% NaCl, 22.5% H₂O, cuando se aplicaron 4V durante 30 minutos, es el que presenta mejores propiedades de resistencia a la corrosión por picaduras (R_{pit} de 0.847 V).

El método de electrodisolución selectiva desarrollado con base en electrolitos NaCl-etilenglicol- agua puede aplicarse como una alternativa a los métodos convencionales de electropulido de acero inoxidable de forma más sustentable, con menor impacto ambiental y con menor costo. En estas condiciones, la mejora de las propiedades superficiales (microestructura, rugosidad, humectabilidad) y resistencia a la corrosión del acero inoxidable AISI 304 mitigarían las condiciones de agresividad implícitas en el agua de mar, logrando un aumento en la vida útil del material y una reducción en los costos asociados con su mantenimiento.

4. CONCLUSIONES

El estudio electroquímico realizado mediante la técnica LSV, indica que el intervalo óptimo de potencial para realizar el proceso de electrodisolución selectiva del acero inoxidable AISI 304 es de 4-5 V, cuando se usa un electrolito compuesto por NaCl-25% H_2O -EG.

La incorporación del agua al etilenglicol permite incrementar la densidad de corriente debido al incremento en la conductividad del solvente formado por 25% de agua en EG.

Las pruebas de ángulo de contacto revelan que a 4V se obtienen superficies con $\theta > 100^\circ$, por lo que la pieza presenta una transición de hidrofílica a hidrofóbica, después del proceso de electrodisolución.

El análisis por MEB de las piezas electrodisueltas, revela los granos austeníticos característicos del acero inoxidable austenítico con una superficie más uniforme que la del acero inoxidable AISI 304 sin tratamiento. Según los valores obtenidos de rugosidad, se logró una reducción del 55.78%, en la rugosidad media aritmética de la pieza electrodisuelta con 4V durante 30 minutos, con respecto al acero sin tratar.

Los ensayos por CPPC mostraron que cuando se realiza una electrodisolución con 4V durante 30 minutos se logra una reducción del 96.71% en la velocidad de corrosión general y un aumento del 72.15% en la resistencia a la corrosión por picadura, con respecto al acero inoxidable AISI 304 sin tratamiento.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

-Halima V. Suárez Miranda: Metodología, Validación, Investigación, Análisis formal, Redacción- Borrador Original.

-Gregorio Vargas Gutiérrez: Conceptualización, Redacción- Revisión y Edición, Supervisión, Administración del proyecto, Adquisición de fondos, Recursos.

DECLARACIÓN DE INTERESES CONTRAPUESTOS

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses, ni económico ni profesional, que pudiera influir en los resultados o en la interpretación de los datos presentados.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos generados y/o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo a través del Proyecto 845101 “Descubrimiento Acelerado de Materiales Antibioincrustantes” como parte del Programa Ciencia Frontera en la Modalidad Sinergias (2019).

REFERENCIAS

ASTM (2018). ASTM G61-86: Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys. ASTM International.

- ASTM (2020). ASTM B322–99: Standard Guide for Cleaning Metals Prior to Electroplating. ASTM International.
- Esmailzadeh, S., Aliofkhaezai, M. y Sarlak, H. (2018). Interpretation of Cyclic Potentiodynamic Polarization Test Results for Study of Corrosion Behavior of Metals. Review article. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 54 (5), 976-989.
- Espríu, S. (2020). Empleo de solventes eutécticos profundos en el proceso de electropulido de piezas metálicas [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Zoski, C. (2007). *Handbook of Electrochemistry* (1.a ed). Elsevier B.V.
- Han, W. & Fang, F. (2020). Eco-friendly NaCl-based electrolyte for electropolishing 316L stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 1257-1269.
- ISO 11130 (2010). Corrosion of metals and alloys-Alternate immersion test in salt solution.
- ISO 4287 (1997). Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture: Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters.
- Kyungsik, D., Sung S., Yonghwan, K. y Chung, W. (2015). Effect of added ethanol in ethylene glycol–NaCl electrolyte on titanium electropolishing. *Corrosion Science*, 98, 494-499.
- Liu, K., You, J., Jian, S.; Chang, Y., Tseng, C. y Ger, M. (2023). Effect of electropolishing parameters of WE43 magnesium alloy on corrosion resistance of artificial plasma. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 4989–5000.
- Liu, T., Yin, Y., Chen, S., Chang, X. y Cheng, S. (2007). Super-hydrophobic Surfaces Improve Corrosion Resistance of Copper in Seawater. *Electrochimica Acta*, 52(11), 3709–3713.
- Łyczkowska, E., Lochyński, P. y Nawrat, G. (2020). Electrochemical Polishing of Austenitic Stainless Steels. *Materials*, 13.
- Newby, J. (1985). *Metals Handbook: Metallography and Microstructures*. ASM International, The Materials Information Society.
- Pedefferri, P. (2018). *Corrosion Science and Engineering*. Springer Nature Switzerland AG.
- Phull, B. (2010). Marine Corrosion. *Shreir's Corrosion*, 2, 1107-1148.
- Rodríguez, O., Martínez, L. y Videá, M. (2020). Electropolishing and anodization of titanium in water/ethylene glycol baths for the production of TiO₂ nanotubes. *Journal of Nanoparticle Research*, 22 (119).
- Saadawy, M. (2012). Kinetics of Pitting Dissolution of Austenitic Stainless Steel 304 in Sodium Chloride Solution. *International Scholarly Research Network*.
- Trimble, H. (1931). Solubilities of Salts in Ethylene Glycol and in Its Mixtures with Water. *ACS Publications*, 2, 165–167.