

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ INSTITUTO DE
CIENCIAS BIOMÉDICAS DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICO-
BIOLÓGICAS



INFLUENCIA DE *Escherichia coli* EN EL PROCESO DE CORROSIÓN
DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061 EXPUESTA EN UN MEDIO
MARINO ARTIFICIAL

POR
MARÍA ISABEL SAÉNZ LÓPEZ

TESIS
LICENCIATURA EN QUÍMICO FARMACO BIÓLOGO
CD. JUÁREZ, CHIH NOVEMBRE, 2021



DRA. MÓNICA GALICIA GARCÍA
DIRECTORA DE INVESTIGACIÓN

DRA. ROXANA ESTELA MALPICA CALDERÓN
CO-DIRECTORA DE INVESTIGACIÓN

DOC. CLAUDIA LUCIA VARGAS REQUENA
COORDINADORA DEL PROGRAMA DE QFB

DOC. JOSE ALBERTO LOPEZ DIAZ J
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS

DOC. SALVADOR DAVID NAVA MARTINEZ
DIRECTOR DEL INSTITUTO DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS

DEDICATORIA

El éxito en la vida o se mide por lo que logras, si no por los obstáculos que superas.

La depresión es una prisión en la que eres tanto el prisionero como el cruel carcelero.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, me gustaría agradecerle a mi mamá por apoyarme durante toda mi carrera, motivándome a concluir con mi tesis y por fin poder egresar, que sé que ella siempre estará en todos mis logros, para que se sienta orgullosa de mí. A mis hermanos que están siempre apoyándome en todo lo que pueden.

A mis abuelitos que en paz descansan Virginia y Rene López, que me apoyaron durante todo el transcurso de mi carrera, apoyándome en todos los aspectos, me hubiera gustado que estuvieran en este momento y ver su cara de orgullo, que tanto esperaban verme egresada, pero sé que desde el cielo lo verán.

De igual forma poder agradecerle a la Doctora Galicia por todo lo que me ayudó durante la elaboración de mis tesis, además de darme el apoyo y la motivación para poder concluir con mi tesis y mi carrera, no tengo más palabras, por todo lo que me apoyo y me escuchó cuando lo necesité. También a la Doctora Malpica que me apoyo con todo lo relacionado al área microbiológica, y ayudándome a poder concluir con mi tesis.

A mi pareja Jorge Colmenero que llegó a mi vida para motivarme a terminar ya por fin mi carrera, a terminar todo a tiempo con respecto a mi tesis, siempre preguntándome si ya hice mi tarea, recordándome mis clases y apoyarme en los demás aspectos de mi vida.

Gracias a todos los que me motivaron cuando pensé tirar todo por la borda, que ya no tenía ánimos de nada pude salir de mi abismo, me ayudaron a seguir adelante para concluir mi tesis y licenciatura.

Resumen

Las bacterias pueden encontrarse en las tuberías que transportan hidrocarburos, drenaje y agua, las cuales pueden generar corrosión que provoca fugas de hidrocarburo o material peligroso, lo que en última instancia ocasionaría contaminación marina afectando el hábitat de muchas especies, y posibles explosiones que provoquen pérdida de vidas humanas. Una de las principales bacterias que ocasiona corrosión es *Escherichia coli*.

En este proyecto se realizaron procedimientos para poder medir el proceso de la corrosión provocada por microorganismos. En este caso por *E. coli* en medio marino. Se montaron dos celdas electroquímicas con todos los electrodos utilizando agua de mar artificial, una contiene la bacteria y la otra celda control sin la bacteria. Se conectaron al potencióstato, para realizar las mediciones electroquímicas de monitoreo del proceso de la corrosión de unos electrodos de Aluminio 60601 en presencia de *E. coli*. Las técnicas electroquímicas realizadas fueron potencial a circuito abierto (OCP), polarización potenciodinámica (PP, evaluación de pendientes de Tafel), y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE), las cuales indicaron el comportamiento de la corrosión que se genera en el electrodo de aluminio con respecto a su medio. Estas mediciones se realizaron durante 7 días consecutivos, y las celdas permanecieron conectadas de manera constante. Finalizado los 7 días los electrodos de aluminio se llevaron a un microscopio electrónico de barrido (SEM) para determinar de manera visual el daño físico que se genera en el aluminio expuesto a *E. coli* y el que no contiene la bacteria, ambos en medio marino artificial para así comparar los dos electrodos de aluminio y verificar y comparar la morfología de los electrodos con respecto al comportamiento detectado por las técnicas electroquímicas y la influencia de la presencia de la bacteria en el proceso de corrosión. Los resultados obtenidos en las pruebas de impedancia electroquímica demostraron que durante los primeros 7 días, una biopelícula de la bacteria protege a la aleación contra la corrosión, en comparación con la aleación sin la cepa. Al séptimo día inició una disminución de la resistencia a la transferencia de carga lo que indicó que comienza a generarse corrosión.

ÍNDICE

1. ANTECEDENTES

1.1 Aluminio y sus aleaciones

1.1.1 Características de aluminio y sus aleaciones

1.1.2 Clasificación de las aleaciones de aluminio

1.1.3 Aplicaciones industriales y tecnológicas de las aleaciones de aluminio

1.1.4 Proceso de pasivación en aluminio

1.2 Corrosión

1.2.1 Tipos de corrosión

1.2.1.1 Corrosión química

1.2.1.2 Corrosión electroquímica

1.2.1.3 Corrosión uniforme o generalizada

1.2.1.4 Corrosión de dos metales o galvánica

1.2.1.5 Corrosión por picadura

1.2.1.6 Corrosión por hendidura

1.2.1.7 Corrosión intergranular

1.2.1.8 Corrosión bajo tensión

1.2.1.9 Corrosión por erosión

1.2.1.10 Daño por cavitación

1.2.1.11 Corrosión por desgaste

1.2.1.12 Corrosión selectiva

1.2.1.13 Corrosión por suelos

1.2.2 Tipos de corrosión características en Aluminio

1.2.3 Corrosión influenciada microbiológicamente MIC

1.2.3.1 Biopelícula componentes de la corrosión

- 1.2.3.2 Principales microorganismos que generan MIC
- 1.3 Técnicas electroquímicas para el estudio de la corrosión
 - 1.3.1 Potencial de corrosión y corriente de corrosión
 - 1.3.2 Potencial de circuito abierto OCP
 - 1.3.3 Polarización, potencia dinámica y pendientes de Tafel. PP
 - 1.3.4 Ley de Tafel
 - 1.3.5 Espectroscopia de impedancia electroquímica
- 1.4 Técnicas para análisis superficial
 - 1.4.1 Microscopia electrónica de barrido
 - 1.4.2 Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS)
- 1.5 Hipótesis
- 1.6 Objetivos
 - 1.7.1 Objetivo general
 - 1.7.2 Objetivos específicos
- 2. MATERIALES Y MÉTODOS
 - 2.8.1 Preparación del medio de cultivo de *Escherichia coli*.
 - 2.8.2 Incorporación de *Escherichia coli* al medio.
 - 2.8.3 Preparación de la celda electroquímica
 - 2.8.4 Polarización potenciodinámica (método de Tafel)
 - 2.8.5 Monitoreo electroquímico por potencial a circuito abierto (OCP)
 - 2.8.6 Análisis superficial de los electrodos por microscopia electrónica de barrido
- 3. RESULTADOS
- BIBLIOGRAFÍA

Comentado [ALSG1]: MAYUSCULAS

Comentado [ALSG2]: MAYUSCULAS

Comentado [ALSG3]: MAYUSCULAS

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro I. Aplicaciones específicas de algunas de las más interesantes aleaciones de aluminio

Cuadro II. Principales microorganismos que generan corrosión

Comentado [ALSG4]: CUADROS CON NUMEROS ROMANOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de la ley de Tafel (Vera, 2010)

Figura 2. Onda sinusoidal.

Figura 3. Representación onda potencial e intensidad.

Figura 4. Descomposición vectorial de la impedancia.

Figura 5. Diagrama Nyquist.

Figura 6. Diagrama de Nyquist de la celda control con el electrodo de aluminio 6061 en de agua de mar artificial, durante los 7 días.

Figura 7. Diagrama de Nyquist de la celda control con el electrodo de aluminio 6061 en presencia de agua de mar artificial, durante los 7 días.

Figura 8. Diagrama de Nyquist generado por la aleación de aluminio 6061 en presencia de *Escherichia coli* en un medio marino artificial durante los 7 días.

Figura 9. Resistencia presentada en la aleación de aluminio 6061 con respecto a los días que se realizaron las mediciones en la celda control.

Figura 10. Resistencia a la transferencia de carga presentada en la aleación de aluminio 6061 con respecto a los días que se realizaron mediciones en la celda en presencia de *Escherichia coli*.

Figura 11. Potencial presentado por la aleación de aluminio 6061 durante los 7 días en la celda control.

Figura 12. Potencial presentado por la aleación de aluminio 6061 durante los 7 días en la celda con *Escherichia coli*.

Figura 13. Comparación de las impedancias con respecto a los días de la celda con la bacteria de *E. coli* y la celda control.

Figura 14. Comparación de los potenciales generados durante los siete días de medición de la celda con *E. coli* y la celda control.

Figura 15. Comparación en el microscopio electrónico de barrido de: A) Electrodo de aluminio 6061 control y B) Electrodo de aluminio 6061 en presencia de *E. coli*, a x250.

Figura 16. Comparación en el microscopio electrónico de barrido de: A) Electrodo de aluminio 6061 control y B) Electrodo de aluminio 6061 en presencia de *E. coli*, a x1000.

Figura 17. Comparación en el microscopio electrónico de barrido de: A) Electrodo de aluminio 6061 control y B) Electrodo de aluminio 6061 en presencia de *E. coli*, a x3500.

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio tienen cientos de aplicaciones, principalmente en la industria aeronáutica y la industria petrolera en el transporte de hidrocarburos. Estas aleaciones son susceptibles de ser atacadas por microorganismos, generando biocorrosión o la denominada corrosión influenciada por microorganismos (MIC). Los microorganismos forman una biopelícula la cual es la principal causa de problemas técnicos y de pérdidas económicas de diversas industrias (Saravia, 1991). *E. Coli* puede encontrarse en medios marinos ya que, al ser eliminado principalmente por humanos a través de tuberías, llegando muchas de estas a los mares. *E. coli*, junto con otros microorganismos marinos forman una biopelícula en los ductos de tuberías de drenaje, como del transporte de hidrocarburos. Es importante aprender a monitorear el comportamiento que tiene la bacteria y las formaciones de la biopelícula respecto a la aceleración de la corrosión, para así poder tener un control del cómo prevenir la corrosión o retardarla. Al caracterizar el proceso de la corrosión microbiológica en las aleaciones de aluminio, para identificar cuáles factores la propician y cómo es que se va desarrollando este fenómeno, para de esta forma poder proporcionar las variables que tendrían que ser eliminadas, para controlar la MIC.

En este proyecto se evaluó electroquímicamente la influencia de *E. coli* expuesta en un medio marino en el proceso de corrosión de la aleación de aluminio 6061. Además, se evaluar la aleación de aluminio 6061 mediante análisis superficiales de microscopía electrónica de barrido, y se empleará un mecanismo de formación de la biopelícula de *E. coli* y su influencia en el proceso de corrosión del aluminio 6061. Los resultados obtenidos tienen de utilidad para la industria petrolera ya que ayudara a solucionar fallas por corrosión asociadas por microorganismos reduciendo la generación de derrames de hidrocarburos que contaminan los mares afectando el medio ambiente de muchas especies y humanos que vivan cerca. Además de reducir las fugas de los conductos que transportan hidrocarburos, reduciendo así mismo las explosiones que podrían dañar las infraestructuras cercanas.

1. ANTECEDENTES

1.1 Aluminio y sus aleaciones

1.1.1 Características de aluminio y sus aleaciones

El aluminio es un metal ligero ($d=2.71\text{g/cm}^3$) que posee buena resistencia a la corrosión en la atmosfera, hasta temperaturas relativamente altas y en muchos medios acuosos, combinada con buena conductividad térmica y eléctrica. Es muy activo en la serie electroquímica, pero se pasiva simplemente con la exposición al agua o al aire. La película pasiva está compuesta por oxido de aluminio, que en el caso de aluminio expuesto al aire se estima de un espesor aproximado entre 20 y 100Å (Otero H.E. 1997, p.309).

La combinación única de propiedades que presentan el aluminio y sus aleaciones, hacen que este material uno de los más versátiles, económicos y atractivos para una amplia gama de sus y aplicaciones; desde la fabricación de papel aluminio para embalajes y uso doméstico hasta aplicaciones de ingeniería más exigentes, como ser en fuselajes de aeronaves (Maffia, 2013).

Las aleaciones de aluminio utilizadas en aeronáutica se endurecen mediante el empleo de elementos aleantes capaces de formar precipitado del tipo G-P (Guiner y Preston) con el aluminio, lo que se denomina envejecimiento. El efecto de incrementar la resistencia mecánica va acompañado de una disminución en la resistencia a la corrosión debida a la formación de sitio anódicos, asociados a la presencia de estos precipitados, lo que las hace susceptible a un deterioro inminente del material (Isaza, 2015) El aluminio y sus aleaciones son resistente al ataque de una amplia gama de medios y algunos compuestos químicos (Craig & Anderson, 2002).

1.1.2 Clasificación de las aleaciones de aluminio

En la mayoría de los países se utilizan sistemas numéricos de cuatro dígitos para identificar a las aleaciones de aluminio. El primer dígito indica el grupo de aleaciones y los dos últimos identifican la aleación de aluminio o indican la pureza

del mismo. El segundo dígito indica modificaciones realizadas sobre la aleación original o límites de impurezas.

El sistema utilizado para las aleaciones para moldeo es apenas diferente: el dígito que designa el grupo de aleación es esencialmente el mismo. Los segundos dígitos sirven para identificar una composición en particular. Con el cero después del punto decimal se identifica el producto como una fundición

Las aleaciones de la serie 6xxx contiene silicio y magnesio en las proporciones requeridas para la formación de siliciuro de magnesio (Mg_2Si). Este compuesto las hace tratables térmicamente. Aunque no tan resistentes como la mayoría de las aleaciones de las series 2xxx y 7xxx, las aleaciones de la serie 6XXX tienen buena formabilidad, soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión. Las aleaciones de este grupo pueden ser conformadas en el temper T4 (tratamiento térmico de solución térmico de precipitación completo (T6) (Maffia, 2013).

1.1.3 Aplicaciones industriales y tecnológicas de las aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio ocupan el segundo lugar (con respecto a los aceros) en los materiales que se utilizan con fines estructurales (Maffia, 2013). Además de que, al tener un peso tan leve, junto con la alta resistencia en algunas aleaciones de aluminio (próxima o similar a la de algunos aceros estructurales), permite la construcción de estructuras ligeras y resistentes, particularmente ventajosa en vehículos espaciales, aviones, y en todo tipo de vehículos terrestres y náuticos (Maffia, 2013).

Otro de los principales usos industriales de las aleaciones metálicas de aluminio es:

Transporte; como material estructural en aviones, automóviles, tanques, superestructuras de buques y bicicletas.

Estructuras portantes de aluminio en edificios.

Embalaje de alimentos; papel de aluminio, latas, tetra packs (contienen aluminio), etc.

Carpintería metálica: puertas, ventanas, cierres, armarios, etc.

Bienes de uso doméstico: utensilios de cocina, herramientas, etc.

Transmisión eléctrica: A pesar que su conductividad es tan solo el 60% de la del cobre, su mayor ligereza disminuye el peso de los conductores y permite una mayor reparación de las torres de alta tensión, disminuyendo los costes de la infraestructura.

Recipientes criogénicos (hasta -200°C), ya que contrariamente al acero no presenta temperatura de transición dúctil a frágil. Por ello la tenacidad del material es mejor a bajas temperaturas

Cerca del 25% del aluminio hoy en día es producido para la industria de transporte, otro 25% es usado en manufacturado bebidas enlatas y de otros embalajes, cerca del 15% es usado en la construcción, 15% en aplicaciones eléctricas, y el otro 20% en otras aplicaciones (Askeland & Phule, 2004). En el Cuadro I se muestran algunas aleaciones utilizadas, su composición, la condición de cada una de ellas y las aplicaciones típicas que se realizan.

Cuadro I. Aplicaciones específicas de algunas de las más interesantes aleaciones de aluminio.

Número de la aleación de aluminio	Número de UNS	Composición (% en peso)				Condición	Aplicaciones típicas
		Cu	Mg	Mn	Otros		
1100	A91100	0.1				Recocido	Planchistería
3003	A93003	2		1.2		Recocido	Utensilios cocina
5052	A95052	0.1	2.5		0.25 Cr	Recocido	Partes de autocares y camiones
		2					
2014	A92014		0.5	0.8	0.8 Si	Tratamiento térmico	Estructuras generales
6061	A96061		1.0		0.6 Si, 0.2 Cr	Tratamiento térmico	Camiones, torres, muebles
7075	A97075	4.4	2.5		5.6 Zn, 0.23 Cr	Tratamiento térmico	Partes estructurales de aviones
		0.3					
295.0	A02950	1.6			1.1 Si	Tratamiento térmico	Cárter de motores, ruedas de avión
356.0	A03560	4.5	0.3		7.0 Si	Tratamiento térmico	Bloques de cilindros enfriados por agua

(Otero, 1997)

1.1.4 Proceso de Pasivación en Aluminio

Las condiciones en que se encuentre la substancia metálica influyen de un modo importante en su potencial de solución o su tendencia a corroerse. Si el medio corrosivo reacciona con el metal, para formar una cubierta protectora adherente que inhibe cualquier deterioración posterior, se dice que se ha producido una pasivación. Este fenómeno altera la posición del metal en la serie de fuerza electromotriz, cambiando la actividad química del metal. (Keyser, 1982). Esta es una alternativa que es preferentemente par medios secos que pueden eliminar el vapor de agua. En algunos casos, la los productos de corrosión proveen de forma natural la capa de pasivación (WAH, 2007).

Un buen ejemplo de pasivación lo ofrecen el aluminio y sus aleaciones.

Aunque tienen alto potenciales de electrodo, no se corroen en la atmosfera con tanta facilidad como el hierro y el acero ordinario, que son materiales mucho menos activos. Este comportamiento explica por la formación de una película densa y muy adhesiva de óxido de aluminio, que protege eficazmente al metal que se encuentra bajo ella, mientras que la película de óxido (herrumbre) que se forma sobre el hierro y el acero no se adhiere estrechamente al metal; por lo tanto, el acero no recibe una buena protección de sus óxidos como el aluminio de los suyos (Keyser, 1982).

1.2 Corrosión

Se entiende por corrosión la reacción de un metal o una aleación con el medio o ambientes reactivos teniendo como consecuencia su deterioro o destrucción. A causa de este fenómeno los metales pierden su estado elemental y retorna al estado combinado (formando los minerales, como los óxidos, sulfuros, carbonatos, hidróxidos, etc.) de origen. En la actualidad el término corrosión se aplica solamente al ataque electroquímico de los metales, aunque algunos

autores opinan que no es muy estricto y se puede considerar también a los no metales como cerámica, plásticos, goma, etcétera (Mariaca,1999).

La corrosión es una reacción química. En toda reacción química se generan productos de corrosión. Si los productos de la corrosión se quedan en la superficie metálica del metal que se está corroyendo y dificultan la evolución de esta reacción, se está produciendo un fenómeno de paliación (Mórela, 1990).

1.2.1 Tipos de corrosión

Existen diferentes tipos de corrosión 2 clasificaciones generales seria la corrosión química y la corrosión electroquímica.

1.2.1.1 Corrosión química

En la corrosión química, o disolución directa, un material se disuelve en medio líquido corrosivo. El material seguirá en disolución hasta que se consuma o el líquido se sature. Un ejemplo es la formación de una pátina de color verde en la superficie de aleaciones de base de cobre. Esto se debe a la formación de carbonato de cobre e hidróxidos de cobre y es la razón, por ejemplo, del aspecto verdoso en la estatua de la libertad.

1.2.1.2 Corrosión electroquímica

La corrosión electroquímica, que es la forma más común de ataque de metales, se presenta cuando los átomos del metal pierden electrones y se convierten en iones. A medida que el metal es gradualmente consumido por este proceso, por lo general se forma un subproducto del proceso de corrosión. La corrosión electroquímica ocurre con más frecuencia en medio acuoso, en el que hay iones presentes en agua, tierra o aire húmedo. En este proceso se crea un circuito eléctrico y el sistema recibe el nombre de celda electroquímica. La corrosión de un tubo de acero o de un tablero de acero de una automóvil, que crea agujeros en el acero y oxido como subproducto, son ejemplos de esta reacción (Askeland, 2017).

La corrosión puede clasificarse convenientemente de acuerdo con la apariencia del metal corroído. La identificación puede realizarse de muchas formas, pero

todas ellas se encuentran interrelacionadas de alguna manera (Smith y Hashemi, 2004), como ejemplo:

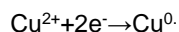
- Ataque corrosivo uniforme o generalizada
- Corrosión de dos metales o galvánica
- Corrosión por picaduras
- Corrosión en hendiduras
- Corrosión Intergranular
- Corrosión bajo tensión
- Corrosión por erosión
- Daño por cavitación
- Corrosión por desgaste
- Corrosión selectiva (Smith y Hashemi, 2014)

1.2.1.3 Corrosión uniforme o generalizada

La corrosión generalizada, también nombrada corrosión uniforme, ocurre sobre toda la superficie del material de forma homogénea, deteriorándolo completamente. Este tipo de corrosión es el que mayor pérdida de material provoca, pero es relativamente fácil de predecir y controlarla (Salazar, 2015).

1.2.1.4 Corrosión de dos metales o galvánica

Una pila se puede construir con dos metales diferentes incluso aunque cada uno este rodeado por igual concentración de sus iones en solución acuosa. En esta pila galvánica, la barra de hierro, rodeada por una disolución 1 molar de Fe^{2+} , es el ánodo y se corroe (recuérdese que una disolución 1 molar contiene 1 átomo-gramo de iones en un litro de disolución.) la barra de cobre, rodeada por una disolución 1 molar de Cu^{2+} , es el cátodo, y el Cu^0 recubre la barra. La reacción en el ánodo es equivalente a la ecuación 19.7, y la reacción en el cátodo es:



La fuerza motriz de la conjunta de la pila de la figura 1 es la tendencia relativa de cada metal a ionizarse. El flujo neto de electrones desde la barra de hierro a la barra de cobre es el resultado de la mayor tendencia del hierro a ionizarse. El

proceso electroquímico total lleva asociado un voltaje de 0.777V. Debido a la frecuente existencia de pila galvánicas, se ha hecho una recopilación sistemática de los voltajes asociados a las reacciones de cada semi pila (Shackeloford, 2007).

1.2.1.5 Corrosión por picadura

La corrosión de este tipo se presenta en forma de agujeros en la superficie de la pieza. Estos agujeros son generalmente de diámetro pequeño y de profundidad igual o mayor que el diámetro. Las picaduras pueden estar aisladas o muy numerosas. El número de picaduras formadas en un metal en condiciones similares es variable.

Las picaduras se forman en dos etapas denominadas periodos de incubación y crecimiento. La primera etapa tiene una duración de meses o años. La picadura en este periodo es tan pequeña que no pueden detectarse a simple vista. En la segunda etapa las picaduras crecen hasta hacerse visibles. La velocidad en este caso es mucho mayor que en la etapa previa (Pazos, 2006).

1.2.1.6 Corrosión por hendidura

La corrosión por hendiduras, la cual es una forma de corrosión electroquímica localizada que puede ocurrir en las hendiduras y bajo superficies recubiertas donde sea posible que existan soluciones estancadas.

1.2.1.7 Corrosión Intergranular

La corrosión Intergranular ocurre en los límites de grano debido a la precipitación de fases secundarias. Los límites de grano son siempre los sitios preferentes donde la precipitación y la segregación en la aleación ocurre (Aperador, *et al*, 2013).

1.2.1.8 Corrosión bajo tensión

La corrosión bajo tensiones se debe al efecto combinado de tensiones internas en el material y ataques localizados por agrietamiento.

Esta corrosión se debe a la formación de pilas locales como consecuencia de las deformaciones elásticas y plásticas producidas por tensiones, externas o

residuales (generalmente por conformado en frío tratamiento término), en el seno del material. Las deformaciones de la estructura granular provocan la anisotropía del material, haciendo que unas zonas tiendan a comportarse anódicamente respecto a otras (Gómez & Alcaraz, 2004).

1.2.1.9 Corrosión por erosión

La corrosión por erosión puede definirse como la aceleración en la velocidad del ataque corrosivo de un metal debido al movimiento relativo de un fluido corrosivo y de la superficie metálica. Cuando el movimiento relativo de un fluido corrosivo es rápido, los efectos del desgaste y la abrasión mecánicos pueden ser severos. La corrosión por erosión se caracteriza por la aparición en la superficie metálica de huecos, valles, picaduras, hoyos redondeados y otras configuraciones de daño de la superficie metálica que suelen ocurrir en dirección del flujo del fluido corrosivo.

1.2.1.10 Daño por cavitación

Este tipo de corrosión erosión resulta de la formación y el colapso de las burbujas de aire o de las cavidades llenas de vapor en un líquido cerca de una superficie metálica. El daño por cavitación ocurre en superficies metálicas donde existe un flujo de líquido de alta velocidad y cambios de presión como los que se encuentran en los impulsores de bombas y en las hélices de barco.

1.2.1.11 Corrosión por desgaste

Ocurre en interfaces entre materiales bajo cargas expuestos a vibración y deslizamiento. La corrosión por desgaste aparece como huecos o picaduras rodeados por productos de corrosión.

1.2.1.12 Corrosión selectiva

La corrosión selectiva corresponde a la eliminación preferencial de un elemento de una aleación sólida mediante un proceso de corrosión (Smith y Hashemi, 2014).

1.2.1.13 Corrosión por suelos

La corrosión de estructuras enterradas es importante, sobre todo en el caso de líneas de tuberías (pipeline), el coste del control de la corrosión es del orden del 1-2% del coste total.

Por otro lado, la corrosión en tierras es parecida a la corrosión atmosférica; las velocidades de corrosión que se observan, aunque más altas que en la atmosfera, varían mucho según la clase de suelo. Un metal puede comportarse satisfactoriamente en unas comarcas y no en otras, debido a diferencias de composición del suelo, del pH, contenidos de humedad, etc (Bilurbina, 2004).

1.2.2 Tipos de corrosión características en Aluminio Al

El aluminio tiende a picarse en agua que contiene Cl^- , en partículas en ranuras y en áreas de estancamiento, en las que se rompe la pasividad por la acción de pilas de aireación diferencial. Las trazas de Cu^{++} o de Fe^{3+} en el agua también son eficaces para romper la pasividad. Se forman pilas galvánicas entre el Al y el Cu o Fe depositados (por reacción de desplazamiento) que estimulan la disolución del aluminio en áreas locales.

El aluminio se corroe con mayor rapidez, tanto en ácidos como en medios alcalinos, que en el agua dependiendo, la velocidad de corrosión en ácidos, dependen de la naturaleza del anión.

En general el aluminio resiste bien la corrosión en los siguientes medios:

- a) NH_4OH , caliente o frio.
- b) Ácido acético, caliente o frio, y muchos otros ácidos orgánicos.
- c) Ácidos grasos. En la destilación de ácidos grasos se emplea equipo de Al
- d) Ácido nítrico >80% hasta alrededor de 50°C .
- e) Agua destilada
- f) Exposición atmosférica. Resistencia excelente a las atmosfera natural, urbana e industrial; tiene menos resistencia a las atmosferas marinas.
- g) Gases refrigerantes fluorados. Pero al bromuro o cloruro de metilo.

Por el contrario, la resistencia a la corrosión del aluminio es baja en:

- a) Ácidos fuertes, tales como HCl y HBr (diluidos o concentrados), H₂SO₄ (es satisfactorio para aplicaciones especiales a temperatura ambiente por debajo de 10%); HF, HClO₄, H₃PO₄ y ácidos fórmicos oxálicos y tricloroacético.
- b) Álcalis. La cal y el hormigón fresco son corrosivos para el aluminio, así como los álcalis fuertes, por ejemplo, NaOH y las aminas orgánicas muy alcalinas.
- c) Hg y sus sales.
- d) Agua de mar. Se forman picaduras en las ranuras, debajo de los depósitos, por ejemplo, aguas que hayan pasado antes por tuberías de Cu, latón o de hierro, o aguas marinas.
- e) Disolventes clorados.
- f) Alcoholes etílicos, propílico o butílicos anhídridos y a temperaturas elevadas. El agua en cantidad del orden de trazas actúa como inhibidor (Otero, 1997).

1.2.3 Corrosión influenciada microbiológicamente MIC

La corrosión influenciada microbiológicamente (MIC, por sus siglas en inglés) se refiere a la influencia de los microorganismos sobre la cinética del proceso de corrosión de metales causado por adherencia a la interface (usualmente denominada biopelícula). El prerrequisito para la MIC es la presencia de microorganismos: si la corrosión influenciada por su actividad, los otros requerimientos son un electrolito acuoso, una fuente de energía, una fuente de carbono, un dador de electrones y un aceptor de electrones.

Los microorganismos involucrados en la MIC de metales como hierro, cobre y aluminio y sus aleaciones son fisiológicamente diversos. Bacterias y hongos pueden producir grandes cantidades de ácido inorgánico y orgánico como subproductos metabólicos. Es bien conocido que los hongos producen ácidos orgánicos que son capaces de contribuir a la CIM (Bento *et al.*, 2005).

Muchos de los trabajos publicados en corrosión de aluminio y sus aleaciones han sido asociados con la contaminación de combustibles aeronáuticos causado por los hongos *Hormoconis resinae*, *Aspergillus spp*, *Penicillium spp*. Y *Fusarium spp* (Araya, 2008).

1.2.3.1 Biopelículas componentes de la corrosión

La biopelícula se inicia a partir de la formación de biopelícula microbianas que alcanzan con rapidez, debido a su rápido desarrollo, espesores del orden de los 250µm formados por la acumulación del orden de 1 millón de bacterias y otros organismos por centímetro cuadrado. Estas biopelículas microbianas se conocen como micropelícula. A partir de micropelícula se desarrollan organismos de mayores dimensiones perfectamente detectables a simple vista constituyendo lo que se conoce como micropelícula. El conjunto de micro y micropelícula constituye la biopelícula que modifica las condiciones corrosivas del medio a menudo favoreciéndola, propiciándolas a través de distintos procesos.

1.2.3.2 Principales microorganismos que generan MIC

En la Cuadro II se describen los microorganismos más habitualmente ligados a proceso de corrosión, así como las condiciones fisicoquímicas en cuanto a temperatura y pH necesarias para su crecimiento y desarrollo (Otero,1997).

Cuadro II. Principales microorganismos que genera corrosión

Tipo de microorganismos	Ejemplo	Intervalo de temperatura C°	Intervalo de pH
Algas			
Verdes	<i>Chlorella</i>	30-35	5.5-9
Verde-azuladas	<i>Anneystis</i>	35-40	6-9
Diatomeas	<i>Diatomea</i>	18-36	5.5-9
Hongos			
Filamentosos	<i>Penicillium</i>	0-38	2-8

Levaduras	<i>Saccharomyces</i>	0-38	2-8
Basidiomicetos	<i>Peniophom</i>	0-38	2-8
Bacterias			
Aeróbicas no esporuladas	<i>Pseudomona aeruginosa</i>	20-40	4-8
Aeróbicas esporuladas	<i>Bacillus subtilis</i>	20-40	5-8
Aeróbicas oxidantes del azufre	<i>Thiobacillues oxidans</i>	Thio- 20-40	0.5-6 7.4-9.5
Aerobias oxidantes del hierro	<i>Gallionella Desulfovibrio</i>	20-40	4-8
Aeróbicas reductores del azufre			

Microorganismos más habituales ligados a proceso de corrosión y condiciones fisicoquímicas para su supervivencia. (Otero, 1997).

1.3 Técnicas electroquímicas para el estudio de la corrosión

Los procesos electroquímicos se encuentran en muchas áreas, tales como las síntesis industriales, los estudios de corrosión, la experimentación fisiológica y la investigación de las baterías, además de las mediciones analíticas (Vassos & Ewing, 1998).

1.3.1 Potencial de corrosión y corriente de corrosión

Cuando un metal se corroe mediante un mecanismo homogéneo la corriente que pasa a través de la zona anódica, corriente de disolución anódica, debe ser igual y de signo contrario a la corriente catódica, es decir $I_{corr} = I_{an} = I_{cat}$

Puesto que ambas zonas están cortocircuitadas por el mismo metal, la diferencia de potencial será igual a cero, cumpliéndose:

$$0 = \Delta\phi_{cat} - \Delta\phi_{an} + IR$$

Si la distancia entre las zonas anódicas y catódicas es grande o el electrolito muy diluido, la caída óhmica puede ser muy grande. Admitiendo que R sea

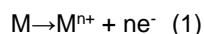
aproximadamente cero, es decir la zona anódica y catódica muy próxima o concentraciones muy elevadas, la expresión anterior se transforma en:

$$\Delta\phi_{cat}=\Delta\phi_{an}=\Delta\phi_{corr}$$

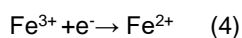
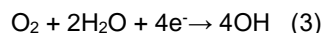
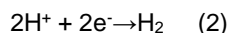
Denominándose a esta diferencia de potencial, potencial de corrosión (Ortega, 1990).

1.3.2 Potencial de circuito abierto OCP

En todo proceso corrosivo existen, necesariamente, dos tipos de reacciones electrónicas, unas anódicas y otras catódicas. Dichas reacciones se dan simultáneamente en áreas diferentes de la superficie del metal. Normalmente las reacciones no son reversibles, pues no corresponden a procesos en equilibrio e involucran especies reactivas diferentes. En las áreas anódicas suceden reacciones de disolución u oxidación metálica, generalmente del tipo:



En las áreas catódicas se pueden presentar diferentes reacciones de reducción dependiendo de la naturaleza y la concentración de las especies presentes en el medio, y pueden ser:



El potencial en las áreas anódicas estará definido por la relación metal/ion metálico (ecuación 1), mientras que el potencial en las áreas catódicas lo definirá el tipo de reacción o reacciones que predominen en el proceso catódico. Teniendo en cuenta el principio de que toda la superficie electródica es equipotencial, es decir, posee el mismo potencial eléctrico en toda la superficie, el metal que sufre corrosión tiende a asumir un único potencial de electrodo, haciendo que todas las áreas anódicas y catódicas se polaricen entre sí para alcanzar un solo valor de potencial, el cual se conoce como potencial de circuito abierto (OCP) o potencial de corrosión (E_{corr}). El análisis de las transientes de

OCP, es en la actualidad una técnica útil para la estimación de la velocidad de corrosión de un metal inmerso en un medio específico.

La corriente relacionada con las fluctuaciones de potencial eléctrico de un metal inmerso en un medio conductor, puede escribirse de manera simple de acuerdo con la ley de Ohm como:

$$I = \frac{E_c - E_a}{\Sigma R}$$

Donde E_c y E_a son los potenciales de las áreas catódicas y anódicas ΣR es la sumatoria de todas las resistencias encontradas durante el paso de la corriente en el sistema metal-medio. El potencial de las áreas anódicas depende esencialmente de la interacción del metal con sus iones en soluciones en la superficie del metal. Este potencial (E_a) está dado por la ecuación de Nernst en el momento en que se establezca un equilibrio:

$$E_e = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln [Mn^+]$$

Donde E_0 es el potencial de electrodo cuando todas las especies están en estado estándar, R es las constantes de los gases, T es la temperatura, n es el número de cargas involucradas y F es la constante de Faraday. Si en la superficie del metal se forma un producto insoluble involucrando los iones metálicos liberados durante la oxidación el potencial estará determinado por el producto de solubilidad del precipitado. Por otro lado, existe una energía de activación asociada a la transferencia de carga y a la remoción de los iones metálicos desde la superficie del electrodo que pasan a la solución. Cuanto mayor sean dichas energías de activación, mayor será la polarización de las áreas anódicas. Este último tiene un efecto directo en el potencial de electrodo (Calderón, *et al.*, 2006).

1.3.2 Polarización, potenciodinámica y pendientes de Tafel. PP

Existen otras técnicas de estado estacionario, en las que el valor de la señal de corriente continua se va variando de forma escalonada, estudiándose la respuesta eléctrica del sistema en distintos estados de excitación. Estos ensayos reciben el nombre de ensayos cinéticos o dinámicos. Así, dependiendo de que la

señal de perturbación sea de potencial o de corriente se habla, respectivamente, de ensayos potenciodinámica o galvadinámicos. Cuando la señal impuesta es una diferencia de potencial, la tasa de variación de la señal con el tiempo se denomina velocidad de polarización. La velocidad de polarización debe ser lo suficientemente baja como para que el sistema alcance el estado estacionario después de cada impulso. Así para sistemas con constantes de tiempo muy elevado será conveniente efectuar el barrido en potencial casi estáticamente. Por el contrario, si el valor de τ es pequeño se podrán efectuar ensayos a velocidades de polarización más altas.

Dentro de los ensayos potenciodinámicos, los más empleados son aquellos que se orientan a la determinación de la velocidad de procesos de corrosión uniforme (Vázquez, *et al.*, 2001).

1.3.4 Ley de Tafel

La técnica consiste en la polarización en un campo amplio de potenciales, obteniendo las curvas de polarización del (figura 1).

Julios Tafel descubrió, en 1905, que la variación de potencial es una función logarítmica de la densidad de corriente, respondiendo a la siguiente expresión:

$$\eta = a - b \log i$$

Donde η es la polarización aplicada, i es la intensidad de corriente y a y b son dos constantes. Representando las curvas de polarización en coordenadas logarítmicas y extrapolando su parte recta hasta E_{corr} podemos determinar la i_{corr} por este método.

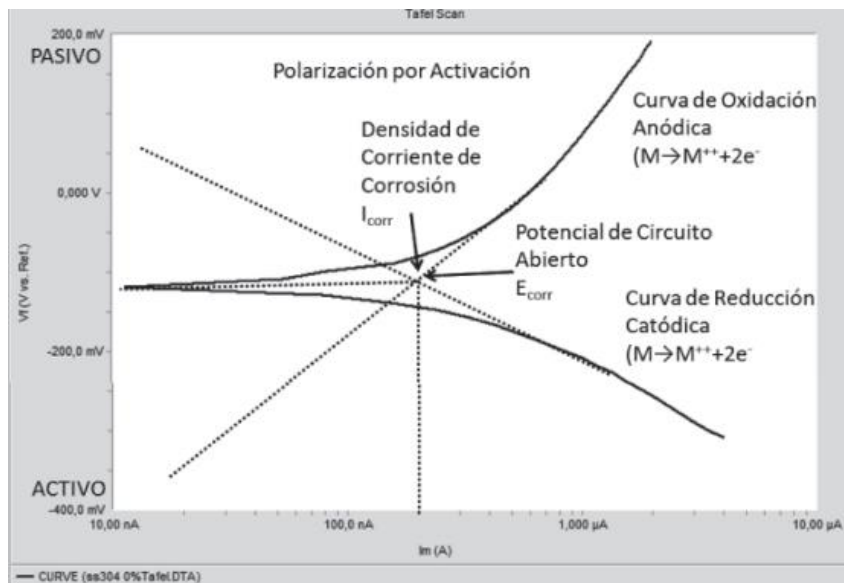


Figura 1. Representación de la ley de Tafel (Vera, 2010).

1.3.5 Espectroscopia de impedancia electroquímica

Se trata de una técnica cuantitativa de corriente alterna que comenzó a aplicarse en los años 70, permitiendo cubrir un rango de frecuencias muy amplio. Se basa en la aplicación de una perturbación sinusoidal de pequeña amplitud sobre el potencial electrodo de trabajo. Es una técnica no destructiva cuando se trabaja en condiciones de equilibrio, muy sensible a pequeños cambios en el sistema, permitiendo la caracterización de sus propiedades. Un has frecuencia aplicada se recoge de corriente de onda sinusoidal, diferente al aplicado. Al conocerse el potencial aplicado y la respuesta de corriente del sistema, se puede determinar la impedancia que presenta.

Si aplicación una onda de tipo sinusoidal como se representa la fig. 2 en un sistema electroquímico, el potencial responde a la siguiente expresión:

$$V = E_0 \text{sen}(\omega \times t)$$

Donde E_0 es la amplitud máxima, ω es la velocidad angular y t es el tiempo.

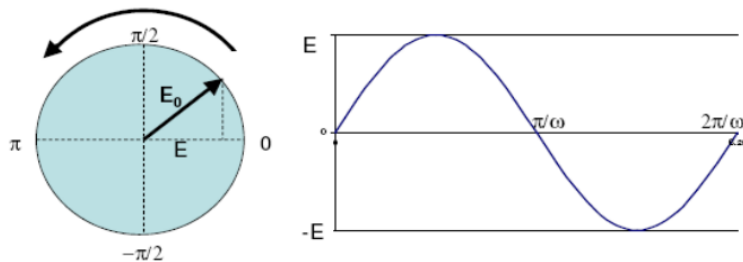


Figura 2. Onda sinusoidal.

Del mismo modo, la intensidad de corriente, representada en la *figura* que atraviesa el sistema se relaciona con el potencial a través de la siguiente expresión:

$$i: I \text{ sen } (\omega t + \Phi)$$

Donde Φ es el desfase.

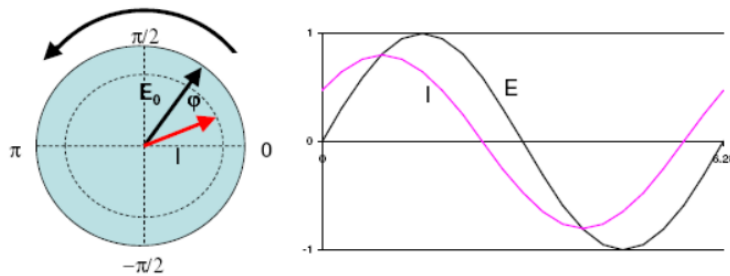


Gráfico nº 22 – Representación onda potencial e intensidad. Fuente: Apuntes asignatura "Análisis de procesos de corrosión". Máster en Tecnología de la Edificación.

Figura 3. Representación onda potencial e intensidad.

Al cumplirse la Ley de Ohm, tenemos:

$$I = E_0 / R \text{ sen } (\omega t)$$

La respuesta a un potencial, en un circuito simple con resistencia pura R, puede ser descrita por la ley de Ohm. En impedancia, corresponde a una situación

donde el ángulo de fase es igual a cero ($\Phi=0$). Desarrollando la expresión obtenemos que:

$$I = E_0 / R$$

Al variar la frecuencia de una señal sinusoidal, la corriente circula por la interface análogamente a un circuito eléctrico, el flujo de corriente pasa a través de los diferentes componentes obteniéndose una respuesta de impedancia (Z), que se define como la oposición al paso de la señal eléctrica. Siguiendo con la analogía con un circuito de corriente continua, donde la resistencia (R) es igual al cociente entre el potencial y la intensidad, obtenemos la siguiente expresión para corriente alterna:

$$Z = E / I$$

Donde el potencial (E) y la intensidad (I) estarán en función de la frecuencia. La impedancia (Z) depende de la frecuencia que sea aplicada. Un listado de este parámetro a diferentes frecuencias, constituye el espectro de impedancia.

Una vez aplicada la técnica, la representación gráfica de los resultados obtenidos nos aporta información sobre el comportamiento del sistema. La impedancia (Z) se puede representar en función de su componente real e imaginaria. Como podemos ver en la Figura 4.

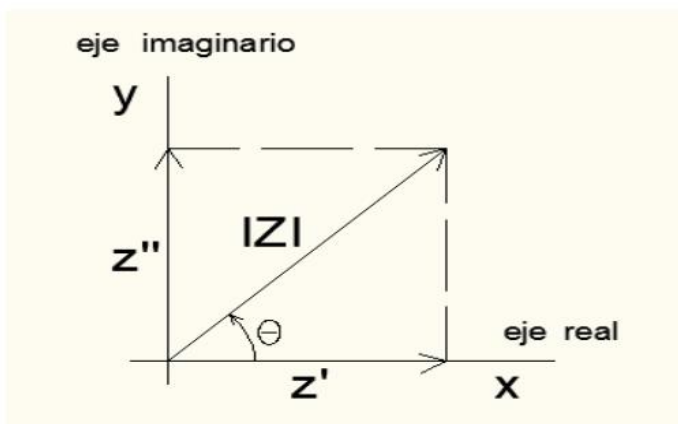


Figura 4. Descomposición vectorial de la impedancia.

Podemos descomponer los componentes del vector y el ángulo según las siguientes expresiones:

$$\Theta = \tan^{-1} (Z' / Z'')$$

$$|Z| = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{1/2}$$

En la figura 5 diagrama Nyquist, tenemos la representación de la componente real (Z') e imaginaria ($-Z''$), multiplicada por -1, de la impedancia (Z):

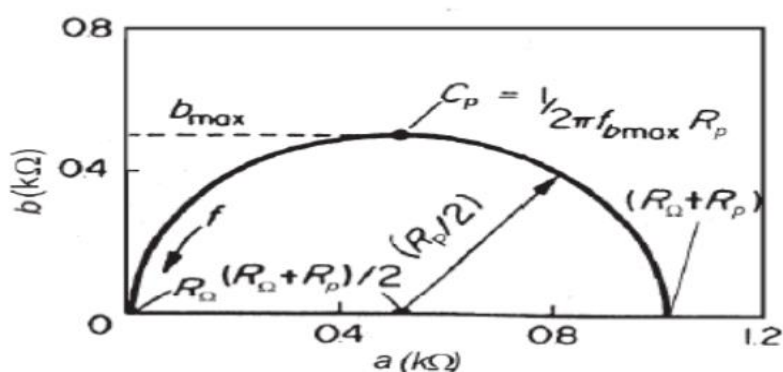


Figura 5. Diagrama Nyquist.

La curva aporta información sobre la parte cinética de la reacción, obteniéndose los valores de resistencia de la disolución y del electrodo durante el proceso de transferencia de carga. Siendo R_Ω la cinética óhmica de la disolución y R_p es la resistencia de los electrodos, es el sistema más utilizado (Monzón, 2012).

1.4 Técnicas para análisis superficial

1.4.1 Microscopía electrónica de barrido

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un instrumento que dirige un haz de electrones a un punto exactamente focalizado de la superficie de una muestra diana y recoge la señal electrónica emitida por la muestra. Básicamente, un cañón de electrones produce un haz de electrones en una columna al vacío que es dirigido y focalizado sobre un pequeño punto de la muestra las bobinas de

barrido permiten al haz barrer una pequeña área de la superficie de las muestras. Los electrones con un ángulo pequeño de dispersión interactúan con la superficie y generan una dispersión de electrones secundarios que producen una señal electrónica a su vez produce una imagen con una profundidad de campo de aproximadamente unas 300 veces superior al microscopio óptico (sobre $10\mu\text{m}$ a 10.000 diámetros de aumento) (Smith y Hashemi, 2004).

1.4.2 Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS)

Espectrometría de energía dispersiva o espectrometría de dispersión de energía de rayos X (energy dispersed X-ray spectrometry, EDX o EDS) técnica de análisis espectral basada en la dispersión de energía de rayos X emitidos por un elemento excitado por electrones acelerados. Se usa generalmente en combinación con el microscopio electrónico de barrido, que en este caso cumple la función de →fuente de electrones acelerados, mientras que el EDS desempeña la función de →detector de la composición de los puntos o zonas de la superficie de la muestra analizada (Giannini y Roani, 2008).

1.5 HIPOTESIS

La presencia de *E. coli* acelera el proceso de la corrosión sobre la aleación de aluminio 6061 en medios marinos.

1.6 OBJETIVO GENERAL

Evaluar electroquímicamente la influencia de *E. coli* expuesta en un medio marino en el proceso de corrosión de la aleación de aluminio 6061.

1.6.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Medir electroquímicamente el proceso de corrosión de aluminio 6061 sin la cepa de *E. coli* y con la cepa, en un medio marino artificial.

Valorar la influencia de *E. coli* expuesta en un medio marino artificial en el proceso de corrosión de la aleación de aluminio 6061, mediante análisis superficiales de microscopía electrónica de barrido.

Esbozar un mecanismo de formación de biopelícula de *E. coli* y su influencia en el proceso de corrosión de aluminio 6061.

2. MATERIALES Y METODOS

2.8.1 Preparación del medio de cultivo de *Escherichia coli*.

Se preparó un medio de Luria Bertani (LB) (DIBICO) en 2 cajas Petri (BD), se agregó 0.6 g del medio de cultivo, 30 mL de agua destilada junto con 0.45 g de medio agar nutritivo (DIBICO) en un matraz de Erlenmeyer (PYREX) de 250 mL. Se mezcló en agitación constante, para posteriormente pasarlo a la autoclave (QUADRANE, E-015R) para su esterilización, se adicione 15mL del caldo LB (DIBICO) a cada caja. Las cajas se esterilización con luz ultravioleta en la campana de flujo laminar (SAFEAIRE, 54L924) durante 20 minutos y se almacenaron a una temperatura de 4°C, en un refrigerador (IEM).

Se preparó también un medio de cultivo LB (DIBICO) en caldo con una concentración de 1g de agar (DIBICO) en 50 mL de agua en un matraz Erlenmeyer (PYREX) de 150 mL y se agito constantemente, para así llevarlo a la autoclave (QUADRANE, E-015R) durante 45 minutos y se almaceno a 4°C en un refrigerador (IEM).

2.8.2 Incorporación de *Escherichia coli* al medio

La cepa de *E. coli* se aisló con un asa bacteriana en un medio de cultivo solido LB (DIBICO) y se incubo a 37 °C durante 24 horas en una incubadora (GENERAL PUYPOSE INCUBATORY, SHEL LAB)

Posteriormente con el uso de un asa bacteriana previamente esterilizada se tomó parte del medio solido LB (DIBICO) y se añadió en los tubos falcón (CORNING) de LB (DIBICO) líquido antes preparado. Se dejaron incubar durante 12 horas a 37 °C a 150 rpm en la incubadora (GENERAL PURPOSE INCUBATOR, SHEL LAB).

2.8.3 Preparación de la celda electroquímica

La celda electroquímica (PYREX) que se utilizó consto de 3 electrodos: electrodo de trabajo que fue la aleación de aluminio 6061, el electrodo auxiliar que consistió en una malla de platino y el electrodo de referencia de calumen saturado. La celda electroquímica (PYREX) se esterilizo previamente en la autoclave

(QUADRANE, E-015R), los electrodos, tapones y ligas se lavaron con etanol al 80 % y acetona, y después se esterilizaron con luz ultravioleta en la campana de flujo laminar (SAEFAIRE, 54L924) durante 15 minutos para cada lado.

La celda electroquímica se transfirió a la campana de flujo laminar (SAEFAIRE, 54L924), se transfirió todo el material a utilizar donde se trabajó en un medio estéril, donde se montaron 2 celdas electroquímicas (PYREX) una fue la celda control la aleación expuesta en el medio marino artificial con *Escherichia coli* MC4100 y otra celda electroquímica sin la bacteria, se sellaron las entradas con los electrodos usando parafina para evitar contaminación.

El monitoreo se realizó con un potencióstato/galvanostato, (SCIENCE BIO-LOGIC, VSP300) mediante el software EC lab V11.01.

2.8.4 Polarización potenciodinámica (método de Tafel)

Para el cálculo de la corrosión se llevó a cabo por el método de extrapolación de Tafel, de la siguiente manera:

Se polarizó el metal en diferentes potenciales, tanto en dirección anódica como en dirección catódica (+/-250mV).

Se identificaron las zonas lineales en ambas curvas que abarcaron al menos 1 década de longitud.

Se extrapolaron las zonas lineales en ambas curvas al E_{corr} hasta la intersección de las dos rectas.

Se utilizaron las leyes de Faraday para convertir la densidad de corriente (i_{corr}) a velocidad de corrosión.

Para la determinación experimental de los parámetros cinéticos i_0 , b_a , y b_c se graficó la densidad de corriente en escala logarítmica, por la relación lineal existente entre el logaritmo contra el potencial de corriente.

2.8.5 Monitoreo electroquímico por potencial a circuito abierto (OCP)

En el análisis de potencial de circuito abierto se realizó un monitoreo en el medio electrolito de agua de mar artificial (medio marino Zobell) (HIMEDIA, M395100G) con la cepa y sin la cepa, para así lograr ver el comportamiento de la bacteria con

respecto a la corrosión. Esto se realizó durante 10 minutos utilizando el potencióstato/galvanostato, (SCIENCE BIO-LOGIC, VSP300). El análisis se realizó durante 7 días realizando diariamente las técnicas.

2.8.6 Análisis superficial de los electrodos por microscopia electrónica de barrido

2.8.6.1 Preparación de muestra biológica sobre el electrodo mediante deshidratación para observación en microscopio electrónico de barrido (SEM).

Bajo la campana de flujo laminar (SAFEAIRE, 54L924) se abrió la celda y se extrajo el electrodo con unas pinzas previamente estériles bañadas en alcohol, se colocó en una caja petri (BD), donde el electrodo se sometió a dos lavados de PBS con la ayuda de una micro pipeta de 1000 μ L (DIAMOND PRO- Hc399910) y se tomó 500 μ L de PBS se cubrió el electrodo, posterior a los dos lavados se cubrió con glutaraldehído 2.5% (SIGMA – ALDRICH), el electrodo se almaceno en un tubo falcón (CORNING) previamente esterilizado en autoclave (QUADRANE E-015R) y se almaceno durante 24 horas a 4°C en un refrigerador (IEM).

Transcurridas las 24 horas bajo la campana de flujo laminar (SAFEAIRE, 54L924) de lavo con PBS y se dejó 5 minutos sobre una caja petri (BD), se decantó y esto se repitió 3 veces. Posteriormente se agregó agua destilada dejando pasar 5 menor a mayor, se cubrió el electrodo de etanol y se dejó reposar 10 minutos para ser decantado y se agregó así la siguiente dilución hasta que se llegó al 100%, posterior a los lavados con etanol (SIGMA) se guardó el electrodo en un tubo falcón (CORNING) y se almaceno en un desecador para así ser llevado al microscopio electrónico de barrido.

Las impedancias obtenidas para la celda control se muestra en la figura 1 y 2 con los diagramas de Nyquist, indicándonos la reacción del medio con la interfaz del metal y lo que está ocurriendo en la ganancia y pérdida de electrones

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Impedancias obtenidas para la celda control y con *E. coli*

Las impedancias obtenidas para la celda control se representan en la Figura 6 y 7, en donde se ve el comportamiento del metal e interfase con respecto a la resistencia presentada conforme transcurrieron los siete. Los resultados se presentan en dos tablas para apreciar los primeros días que se observan mejor en la Figura 7. Conforme pasan los días el diámetro de la curva es más grande y más larga lo que se ve reflejado en ambos ejes del diagrama de impedancia. Lo anterior indica la resistencia a la transferencia de carga (impedancia), que es un valor inversamente proporcional a corrosión. Conforme transcurren los días la impedancia disminuye lo que indica un aumento de la corrosión en el metal.

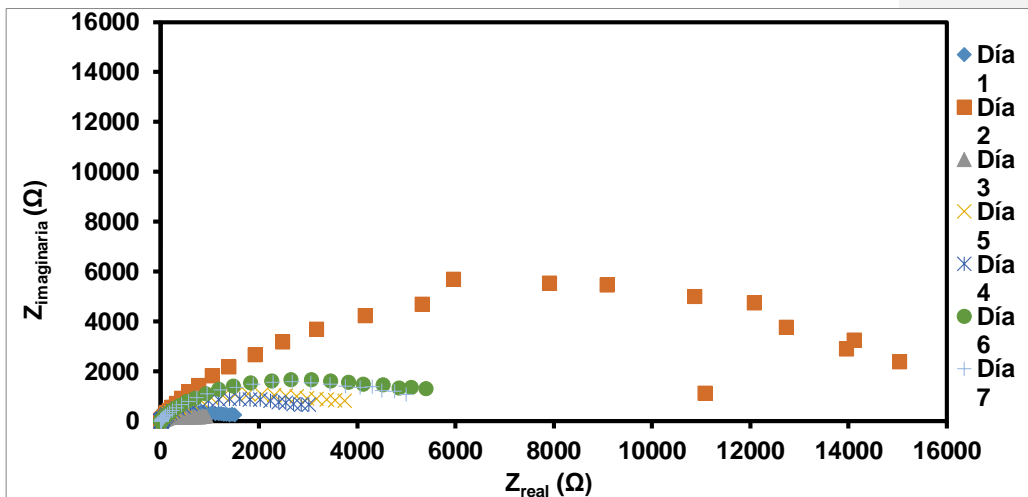


Figura 6. Diagrama de Nyquist de la celda control con el electrodo de aluminio 6061 en agua de mar artificial, durante los 7 días.

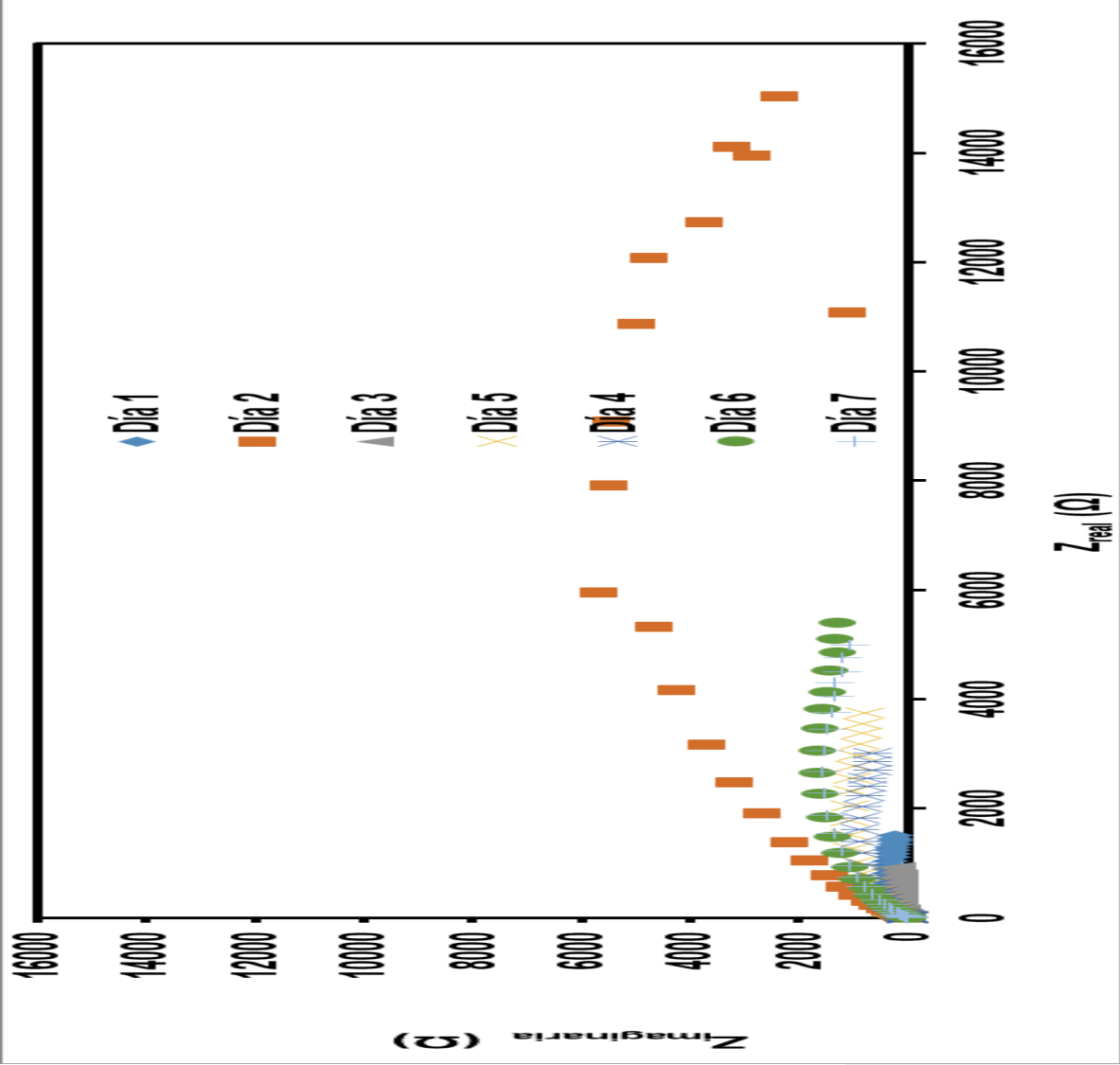


Figura 7. Diagrama de Nyquist de la celda control con el electrodo de aluminio 6061 en agua de mar artificial, durante los 7 días.

En la Figura 8 se observa el diagrama de Nyquist de las impedancias obtenidas en la celda con la bacteria. En la celda con *E. coli* se observa un incremento en el valor de impedancia o resistencia a la corrosión en los días 1 al 3. Sin embargo, en el día 4 y día 5, la impedancia se vuelve a cementar lo que significa que disminuye la velocidad de la corrosión de la aleación de aluminio. En el día 6 es donde se observa a priori, una mayor resistencia a la corrosión y un flujo incipiente formación al final, que debería ser un semicírculo. **Para el séptimo día comienza a generarse corrosión viéndose un aumento de la impedancia.** En la Figura 8 se ven mayores impedancias (corrosión) en comparación en la Figura 6 y 7.

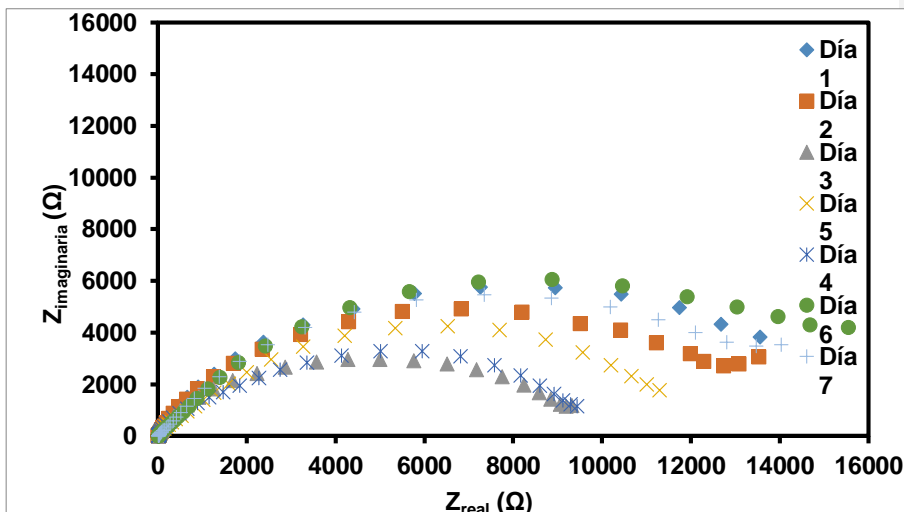


Figura 8. Diagrama de Nyquist generado por la aleación de aluminio 6061 en presencia de *Escherichia coli* en un medio marino artificial durante los 7 días.

3.2 Relación entre el R_{Tc} (Ω) con respecto a los días

En la Figura 9 se muestra la resistencia a la transferencia de carga con respecto a cada uno de los días en la celda control, el día 1 presenta una resistencia de

1088 Ω , para el día dos la resistencia disminuye, para los días 3, 4 5 y 6 se observa a un aumento de la resistencia a la transferencia de carga, lo que también se traduce en una pérdida de electrones que es proporcional a un aumento de corrosión. Sin embargo, en el día 7 se observa nuevamente una disminución de la resistencia a la corrosión, que posiblemente se deba a que hay una pérdida más baja de electrones ya que la superficie del metal es menor y se corroe en su totalidad en menor tiempo que uno de mayor tamaño. Finalmente se observa en los días 4, 5 y 6 un aumento de la resistencia de manera lineal formando una recta, donde se ve un aumento progresivo y lineal de la corrosión de la aleación.

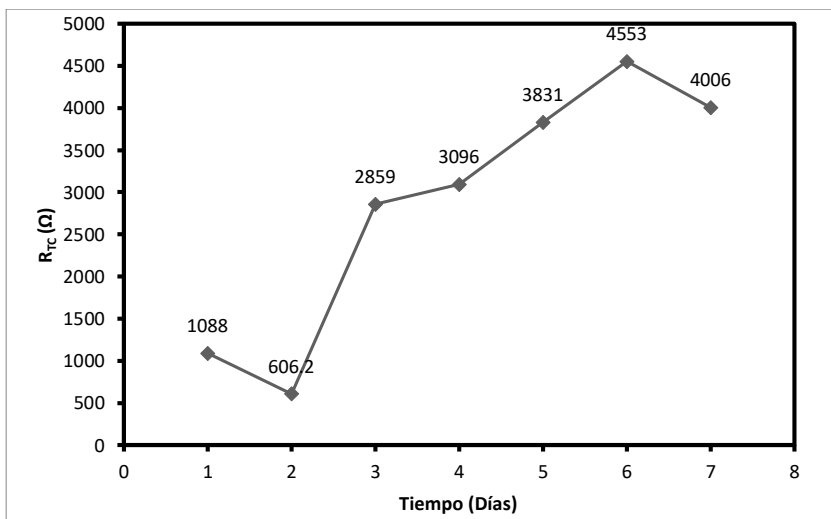


Figura 9. Resistencia a la transferencia de carga presentada en la aleación de aluminio 6061 con respecto a los días que se realizaron las mediciones en la celda control.

En la Figura 10 se presenta la resistencia a la transferencia de carga de la celda con la bacteria. En el día 1 se presenta una resistencia a la transferencia de carga de 16174 Ω , y para el día 2 y 3 esta resistencia disminuye lo que indica un aumento de la corrosión. Es probable que este fenómeno muy prevalente se deba

a la formación de la biopelícula, que está protegiendo al metal contra la corrosión del medio marino, que como se sabe un medio marino es altamente corrosivo para los metales generando picaduras por la presencia de aniones agresivos como son los cloruros, bromuros, tiosulfatos y sulfuros (García, *et al.*, 1995). En el día 4 la resistencia aumenta muy poco. Pero para el día 5 y 6 hay un aumento de la resistencia bastante notorio, lo que supone que la formación de una biopelícula de la cepa *E. coli*, actuó como una barrera protectora sobre el metal. Sin embargo, al transcurrir el día 7 comienza a presentarse una disminución nuevamente, de la resistencia a la corrosión.

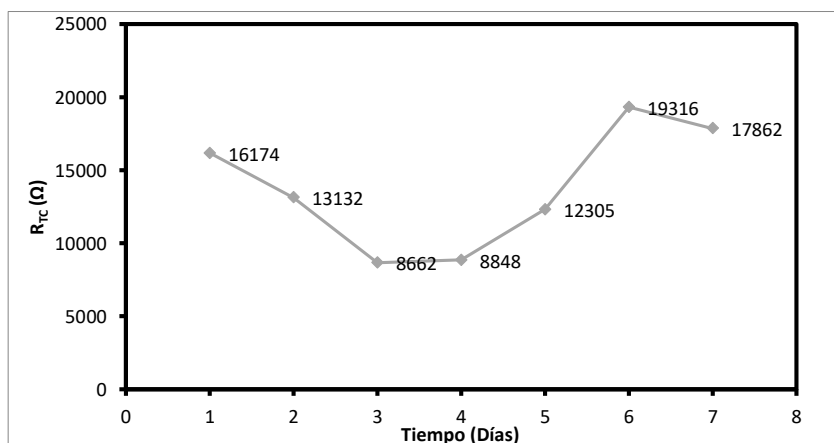


Figura 10. Resistencia a la transferencia de carga presentada en la aleación de aluminio 6061 con respecto a los días que se realizaron mediciones en la celda en presencia de *Escherichia coli*.

3.3 Potencial de circuito abierto

Los potenciales presentados por el electrodo de aluminio 6061 en la celda control se muestran en la Figura 11, donde se observa cómo este potencial va descendiendo. El potencial entre más positivo será más resistente a la corrosión, lo que indica que, al inicio la aleación es más resistente a la corrosión. En el segundo día se ve un ligero aumento del potencial lo que indica resistencia a la corrosión, lo que posiblemente se deba a la formación de una capa pasivante que

forma el aluminio al exponerse a medios corrosivos. Es conveniente mencionar que esta capa se rompe muy fácilmente con los componentes que generan la corrosión. Por ello ya en los siguientes días este potencial va disminuyendo lo que indica un aumento en la corrosión.

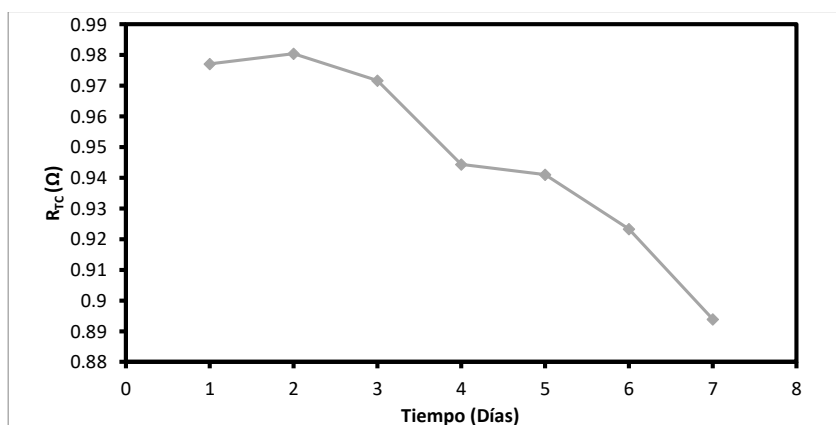


Figura 11. Potencial presentado por la aleación de aluminio 6061 durante los 7 días en la celda control.

En la figura 12 se observan los potenciales del electrodo de aluminio 6061 en el medio con la bacteria, en los primeros 3 días el potencial va aumentando, para el cuarto día se ve un aumento del potencial muy drástico, esto se debe a la biopelícula que se forma alrededor del metal el cual funciona como capa protectora contra la corrosión, pero esto solo es en los primeros 4 días. En los días 5, 6 y 7 se ve un descenso en el potencial del electrodo, lo que nos indica que se está generando corrosión en el metal.

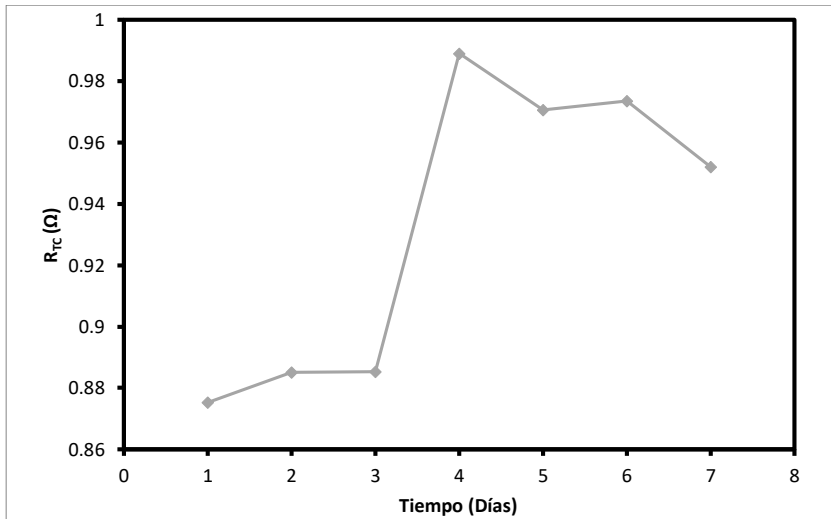


Figura 12. Potencial presentado por la aleación de aluminio 6061 durante los 7 días en la celda con *Escherichia coli*.

En la Figura 13 se ve la comparación de las impedancias presentadas en la celda con *E. coli* y las impedancias presentadas por la celda control, donde se observa una diferencia en las impedancias desde el primer día donde se ve un aumento de la resistencia mayor que en la celda control observándose una mayor corrosión en esta.

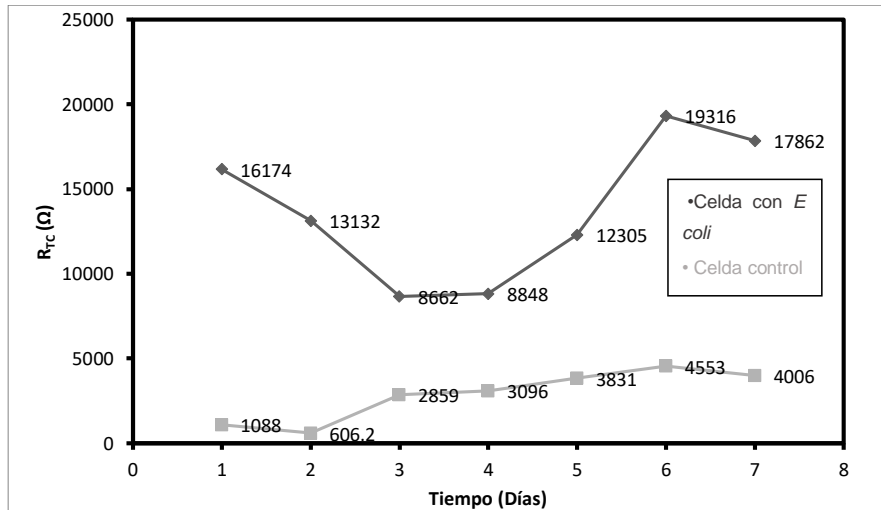


Figura 13. Comparación de las impedancias con respecto a los días de la celda con la bacteria de *E. coli* y la celda control.

En la Figura 14 se compara los potenciales que se obtuvieron del electrodo de aluminio 6061, donde se ve una diferencia de potenciales desde el primer día, se vio como en la celda con *E. coli* la variación del potencial en el tercer día aumenta drásticamente para posteriormente del cuarto día hay un descenso del potencial. En comparación con la celda control donde el descenso del potencial va descendiendo de una manera más consecutiva sin variaciones tan drásticas.

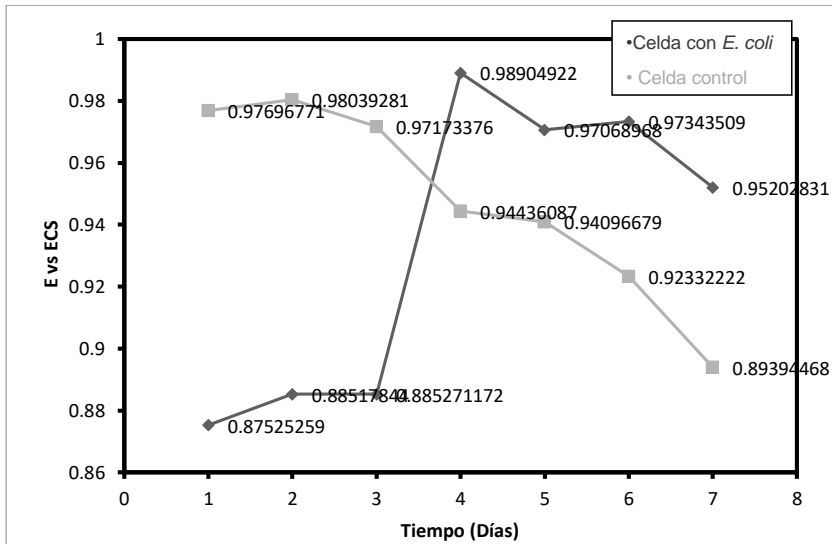


Figura 14. Comparación de los potenciales generados durante los siete días de medición de la celda con *E. coli* y la celda control.

En las Figuras 15, 16 y 7 se ve la comparación en el microscopio electrónicos de barrido (SEM) en la 15 se observa a x250, en la 16 a x1000 y en la 17 a x3500, donde en las 3 se observa un mayor deterioro en el metal en el electrodo control (A) y en el electrodo con la *E. coli* se ve un menor deterioro del metal. Ya que en el electrodo sin la bacteria se ve un mayor agrietamiento. Además, como se leyó anteriormente el medio marino es bastante corrosivo además de que genera una capa de salitre en el metal, que son los grumos que se observan en ambos electrodos, solo que en el que no tiene la bacteria hay mayor acumulación del salitre. Estas diferencias se ven en la Figura 16, 16 y 17, donde en la Figura 17 hay un acercamiento mayor al electrodo, por desgracia en ninguna de las 3 imágenes de la celda que contiene la bacteria no se lograron ver bacilos que nos indique el crecimiento bacteriano

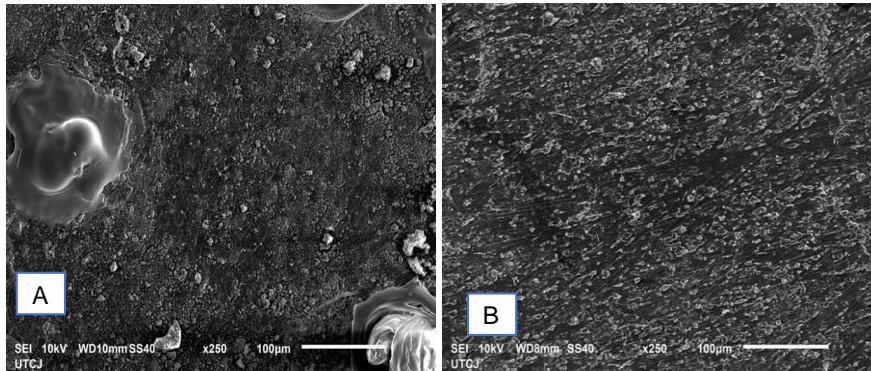


Figura 15. Comparación en el microscopio electrónico de barrido de: A) Electrodo de aluminio 6061 control y B) Electrodo de aluminio 6061 en presencia de *E. coli*, a x250.

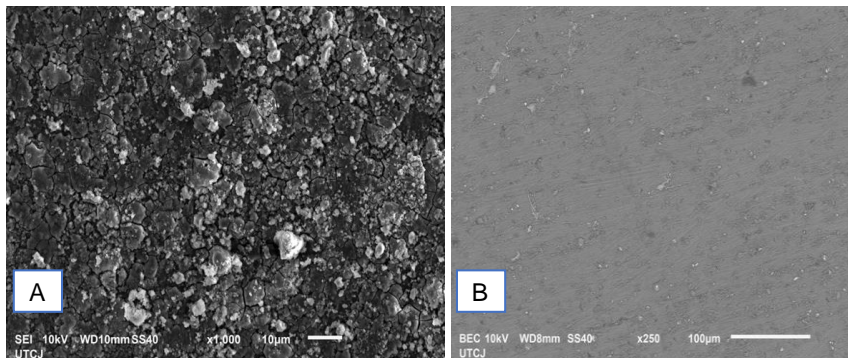


Figura 16. Comparación en el microscopio electrónico de barrido de: A) Electrodo de aluminio 6061 control y B) Electrodo de aluminio 6061 en presencia de *E. coli*, a x1000.

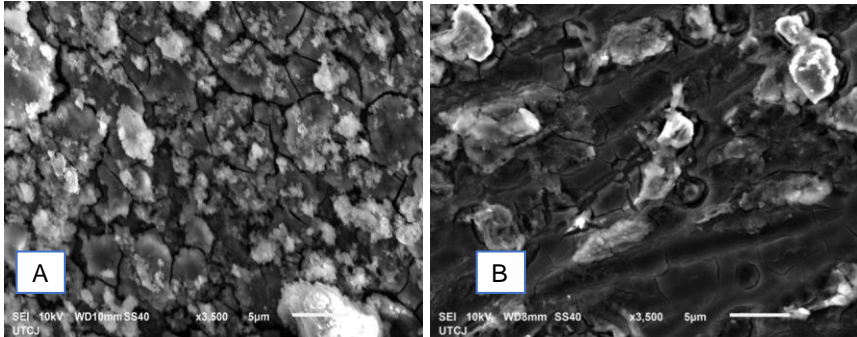


Figura 17. Comparación en el microscopio electrónico de barrido de: A) Electrodo de aluminio 6061 control y B) Electrodo de aluminio 6061 en presencia de *E. coli*, a x3500.

En a las impedancias obtenidas de las Figuras 6,7 y 8 se observa el comportamiento la interfaz del metal con el medio marino sin la bacteria y en la Figura 8 la interfaz del metal con respecto a la biopelícula generada por *E. coli* y el medio de mar marino. Como se puede ver hay una generación mayor de corrosión en la celda que contiene *E. coli*. Pero se ve con mayor claridad en la Figura 13 donde se están comparando las impedancias de la celda con la bacteria y sin la bacteria. Al presentarse una transferencia de carga menor como en el caso de la celda control en donde existe una corrosión menor en comparación de la celda en presencia de *E. coli* en donde se observa una disminución de la corrosión los primeros 3 días esto muy posiblemente se debió a la formación de biopelícula por parte de la bacteria, generando una capa protectora para el aluminio, pero la generación de productos metabólicos con actividad corrosiva (Custodio, *et al.* 2009), además de cambios en el pH que de igual forma afecta al metal.

Esta misma corrosión se observa en la Figura 14 en donde se observan los potenciales de las dos celdas, en donde al tener un potencial más alto es una mayor resistencia a la corrosión y si este es más bajo es porque hay mayor corrosión. En la celda control se ve como la corrosión va aumentando de forma

gradual en el caso de la celda con *E. coli* se ve un aumento de la resistencia a la corrosión y en el 4 día que es como se comento es por la formación de la biopelícula que protege el metal de la corrosión, pero para el quinto día la corrosión aumenta.

Estos procesos de formación de biopelículas tienen de gran importancia en la corrosión inducida por microorganismos como en su inhibición (Rosales, *et al.*, 2011).

En un estudio realizado en el 2017 se analizó el comportamiento de la corrosión en la aleación de aluminio 6063 en presencia de *E. coli* en un medio marino, en este estudio se varió la concentración de salinidad del agua y de igual forma se comparó la corrosión generada con bacteria y sin bacterio en donde se demostró que a mayor salinidad hay mayor corrosión y que la presencia de *E. coli* genera una mayor corrosión en el metal, este estudio se realizó durante 28 días (Pratikno y Sulistiyaning, 2017).

Posiblemente en un futuro el experimento se pueda realizar de nuevo, pero por un tiempo mayor ya sea un mes o más tiempo para lograr ver de una mejor manera el comportamiento de las biopelículas en la interfaz del metal, de igual forma puede variar el uso de otra bacteria y compararla con *E. coli* para ver como varían estos resultados.

Conocer el comportamiento de la biopelícula en la interfaz del metal se puede ver alguna forma en que los metabolitos de la bacteria no afecten al metal, ya sea eliminándolo con algún componente o que la bacteria los utilice nuevamente, además de buscar alternativas de alimentación de la bacteria ya que unas usan ciertos elementos de las aleaciones como el Mg que lo utilizan como cofactor para llevar a cabo su metabolismo, y así la bacteria al no usar este elemento no genere una mayor corrosión en el metal.

4. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en las pruebas de impedancia electroquímica demostraron que durante los primeros 7 días la bacteria, a través de una biopelícula, protege a la aleación de Aluminio 6061 contra la corrosión, en comparación con la aleación sin la cepa, ya que al séptimo día comienza a elucidarse una disminución en la resistencia a la transferencia de carga, lo que indicó que comienza a generarse corrosión.

Los potenciales obtenidos en la celda control indican que existe una disminución progresiva de la corrosión, en comparación con la celda con *E. coli* donde primeramente hay un aumento del potencial, indicativo de la formación de una película protectora contra la corrosión.

Al inicio de los experimentos, la formación de biopelícula sirve como protección de la aleación, pero conforme hay una acumulación de productos del metabolismo (ácidos inorgánicos, ácidos orgánicos) empezó un proceso de corrosión. En el análisis superficial mediante microscopia electrónica de barrido, se observa un mayor ataque de la corrosión en la aleación control que la que estuvo expuesta a la cepa bacteriana.

Bibliografía

- Aperador C.W., Rodríguez Z.G. & Franco A.F., (2013) Estimación de la corrosión Intergranular en la aleación de magnesio AZ31B soldada por fricción-agitación, *Revista de ingeniería. Universidad de los Andes*, Vol.39, p.39-44.
- Araya R. Bobadilla V.C. Rosales M.B. y Vera R. (2008) Corrosión de aleaciones aeronáuticas de aluminio y sus componentes relacionadas a la expresión proteica del hongo *Hormoconis resiniae*, *Información tecnológica*, vol. 19 n°2.
- Askeland R.D. & Phule P.P. (2004) *Essentials of Materials Science and Engineering*, Thomson, Canadá, ED. COPYRIGHT.
- Askeland R.D. y Wright J.W. (2017) *Ciencia e ingeniería de materiales*, México, México, ED. Centage Learning
- Bilurbina A.L. y Liesa M.F. (2004) *Corrosión y protección*, Catalunya, España, ED. UPC.
- Calderón, J.A. Mattos O.R. y Barcia O.E., (2006) Análisis de la evolución del potencial de circuito abierto del cobalto en medio levemente alcalino, *Revista Facultad de Ingeniería* (38) p.20-30
- Craig D.B & Anderson B.D. (2002) *Handbook of corrosion Data*, Denver Colorado, Estados Unidos, ED. ASM International.
- García, O. et al., (1995) *Efectos de los componentes del agua de mar durante el fenómeno de corrosión por picaduras de cobre*, *Revista Metal*, Vol. 31, No. 5, p. 307-313.
- Giannini, C. Roani, R., (2008) *Diccionario de restauración y diagnóstico*, San Sebastián, España, ED. Nerea
- Gómez L.H.F.C. & Alcaraz L.J.D., (2004) *Manual básico de corrosión para ingenieros*, Cartagena, España, ED. Universidad de Murcia.

Isaza C.J., Almeraya C.F., Estupiñan L.F. y Gaona T.C., (2015), Estudio del comportamiento del aluminio 6061-T6 cuando es sometida a corrosión asistida por esfuerzo, Universidad Autónoma de Nuevo León, México

Keyser A.K., (1982) *Ciencia de materiales para ingeniería*, México, México, ED. LIMUSA

Mafia E.G., (2013) *Aleaciones Estructura y propiedades de las aleaciones*, Recuperado: https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/M0624/descargar.php?secc=0&id=M0624&id_inc=2717.

Mariaca R.L., Genesca L.J., Uruchurtu C.J. y Salvador H.L., (1999) *Corrosividad atmosférica*, México, México, ED. Plaza Valdés

Mórela S.P., (1990) *Metales resistente a la corrosión*, Barcelona, España, ED. Boixareu Marcombo

Ortega M.J.A. (1990) *Corrosión industrial*, Barcelona, España, ED. Marcombo20.

Otero H.E., (1997) *Corrosión y degradación de materiales*, Madrid, España, ED. SINTESIS

Pancorbo F.F.J., (2010) *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*, Barcelona, España, ED. Marcombo p.330

Patrikno, H. y Sulistiyani, T.H. (2017) *Bio-corrosion on Aluminium 6063 by Escherichia coli in Marine Environment*, The Journal for Tchenology and Science, Vol. 28, No. 2, p 55-58.

Pazos P.N., (2006) *Tecnología de los metales y proceso de manufactura*, Caracas, Venezuela, ED. UCAE.

Salaza J.J.A., (2015) *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)*, Tecnología en marcha, Vol.28 (23), p.127-136.

Saravia G.S.G., (2991) *Corrosión microbiológica de metales y aleaciones en medio marino* (tesis doctoral) UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA, Argentina.

Sharkckelford F.J. (2007) *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*, Madrid, España, ED. PEARSON.

Smith W.F. y Hashemi J. (2014) *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, México, México, ED. McGraw-Hill

Smith W.F. y Hashemi J., (2004) *Ciencia e ingeniería de los materiales*, Madrid, España, ED. McGraw-Hill

Vasos H.B. y Ewing W.G. (1998) *Electroquímica analítica*, México, México, ED. LIMUSA.

Vázquez, V.A.J. Damborenea, J.J. y Damborenea, G.J.J., (2001) *Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos*, Madrid, España, ED. CSIC

Vera L.E., (2010) Uso de métodos electrónicos como herramientas para evaluar parámetros de interface en sistemas heterogéneos metal/medio acuoso, *REV. ACAD. COLOMB. CIENC.*, Volumen 34 (131), p. 241-251

Wah, C.Y. (2007) *Materials science and engineering*, New York, Estados Unidos, ED. Taylor & Francis Group.