

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Evaluación de la corrosión mediante ensayos electroquímicos en aceros
inoxidables empleados en la industria camaronera

INGE-2802

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Materiales

Presentado por:

Kevin Alexander Cantos Velasco

Patrick Ayrton Jaime Yagual

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mis padres, Pedro J. y Mery Y., quienes juntos a mis hermanos, a pesar de las dificultades, me brindaron su apoyo incondicional para culminar mi carrera. A mis amigos Lady, Abraham, Alejandra, Stephanie y Efraín, quienes, de diversas maneras, estuvieron a mi lado en cada término universitario, siendo un pilar importante para alcanzar este logro académico. También extendo mi gratitud a los docentes que, con su dedicación y compromiso, impartieron conocimientos sólidos que me permitieron crecer profesionalmente.

Este trabajo de titulación va dedicado a las personas que confiaron en mi desde el primer día. A mis padres, Cristian C. y Viviana V. que me dieron su apoyo constante en cada semestre de la carrera. A mi hermana, Ainara C., quien me ha demostrado su admiración hacia lo que hago y es un apoyo fundamental en mis ganas de superación, y a mi novia Naomi M., quien con su apoyo me ha dado fuerzas para ser el profesional en el que me he convertido.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al ingeniero Julián Peña Estrella y al máster Mauricio Acosta Fiallos, quienes nos brindaron su valiosa orientación a lo largo de este proyecto, permitiéndonos culminarlo de manera exitosa. Asimismo, agradecemos profundamente a cada docente técnico de laboratorio, cuyo conocimiento y apoyo fueron fundamentales para la implementación efectiva de la metodología. Finalmente, extendemos nuestra gratitud a cada profesor de carrera y compañero, quienes, con su colaboración y compromiso, contribuyeron al éxito de este proyecto y a nuestra formación profesional.

Declaración Expresa

Nosotros, Kevin Alexander Cantos Velasco y Patrick Ayrton Jaime Yagual, acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá a los autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor de los autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 18 de octubre del 2024.



Kevin Alexander Cantos
Velasco



Patrick Ayrton Jaime
Yagual

Evaluadores

Ing. Jorge Julián Peña Estrella

Profesor de Materia

Dr. Clotario Vladimir Tapia Bastidas

Tutor de proyecto

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable en ambientes representativos de la industria camaronera, respondiendo a la necesidad de caracterizar los procesos corrosivos para extender la vida útil de los equipos y contribuir a la sostenibilidad del sector. Se plantea que los aceros inoxidable AISI 304 y 316 presentan un rendimiento superior en estas condiciones de medios salinos.

El proyecto consistió en realizar ensayos electroquímicos como curvas de polarización potencioestática y espectroscopía de impedancia electroquímica en una solución salina al 3.5% w/w. La metodología se diseñó a partir de normas internacionales como la ASTM G59 Y G61, y se empleó un potencióstato/galvanostato de la marca Metrohm Autolab® para realizar los ensayos.

Los resultados mostraron que los aceros inoxidable AISI 316 presentan una mayor resistencia a la corrosión en ambientes salinos debido a la formación de capas pasivas más uniformes; sin embargo, los aceros inoxidable AISI 304 presentan un mejor desempeño en relación costo/beneficio.

Se concluye que la metodología desarrollada permite obtener parámetros electroquímicos importantes a la hora de caracterizar comportamientos corrosivos en ambientes representativos de la industria camaronera. Estos resultados permiten optimizar la selección de materiales y tomar decisiones informadas, que permiten reducir los costos operativos.

Palabras Clave: Electroquímica, pasivación, degradación, sostenibilidad, corrosión localizada.

Abstract

This study aims to assess the corrosion resistance of stainless steels in environments representative of the shrimp farming industry, addressing the need to characterize corrosion processes to enhance the service life of equipment and contribute to the sector's sustainability. It is hypothesized that AISI 304 and 316 stainless steels demonstrate superior performance under these saline conditions.

The project consisted of performing electrochemical tests such as potentiostatic polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy in a 3.5% w/w salt solution. The methodology was designed based on international standards such as ASTM G59 and G61, and a Metrohm Autolab® potentiostat/galvanostat was used to perform the tests.

The results showed that AISI 316 stainless steels have a higher resistance to corrosion in saline environments due to the formation of more uniform passive layers; however, AISI 304 stainless steels have a higher cost/benefit performance.

It is concluded that the developed methodology allows obtaining important electrochemical parameters when characterizing corrosive behaviors in representative environments of the shrimp industry. These results allow optimizing the selection of materials and making informed decisions, which allow reducing operating costs.

Keywords: Electrochemistry, passivation, degradation, sustainability, localized corrosion.

Índice general

Resumen	I
Índice general	III
Abreviaturas	V
Simbología	VI
Índice de figuras	VII
Índice de tablas.....	IX
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1 Descripción del Problema.....	3
1.2 Justificación del Problema.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Marco teórico: La corrosión en la industria camaronera y su evaluación mediante técnicas electroquímicas	6
1.4.1 Corrosión en la Industria Camaronera.....	6
1.4.2 Impacto de la Corrosión en la Calidad Sanitaria del Camarón	7
1.4.3 Ensayos Cinéticos Electroquímicos	10
1.4.4 Potenciostato/Galvanostato	16
Capítulo 2	19
2. Metodología	20
2.1 Diseño Experimental	21
2.1.1 Selección de muestras	21
2.1.2 Preparación de muestras.....	23
2.1.3 Diseño del sistema electroquímico.....	29

2.2	Procedimiento Experimental	33
2.2.1	Curva de Polarización Potenciostática	33
2.2.2	Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)	34
2.2.3	Repetibilidad y control de calidad.....	36
2.3	Análisis de datos.....	37
2.3.1	Curva de polarización.....	37
2.3.2	Espectros de impedancia	39
2.4	Validación experimental.....	41
Capítulo 3	.....	42
3.	Resultados y Análisis	43
3.1	Resultados experimentales.....	43
3.1.1	Potencial Natural (OCP).....	43
3.1.2	Espectroscopía de Impedancia Electroquímica.....	45
3.1.3	Polarización potenciostática	50
3.2	Validación de resultados.....	53
3.3	Análisis económico.....	56
3.3.1	Optimización en la selección de materiales	59
Capítulo 4	.....	61
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	62
4.1.	<i>Conclusiones</i>	62
4.2.	<i>Recomendaciones</i>	63
Apéndice A	.....	69
Apéndice B	.....	73
Apéndice C	.....	76
Apéndice D	.....	79
Apéndice E	.....	81

Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
EIS	Espectroscopía de Impedancia Electroquímica
CSE	Electrodo de Cobre Sulfato de Cobre
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HWL	High Water Level
LWL	Low Water Level
MPY	milésimas de pulgadas por año S
SC	Electrodo de Plata Cloruro de Plata
AMPP	Asociación para la Protección y el Rendimiento de los Materiales

Simbología

C	Carbono
Cu	Cobre
M	Metro
mg	Miligramo
mil	milésimas de pulgada
Mn	Manganeso
mV	Milivoltio
Ni	Níquel
P	Fósforo
pH	Potencial de Hidrógeno

Índice de figuras

FIGURA 1.1	2
FIGURA 1.2	13
FIGURA 1.3	14
FIGURA 1.4	15
FIGURA 1.5	17
FIGURA 1.6	18
FIGURA 2.1	21
FIGURA 2.2	24
FIGURA 2.3	25
FIGURA 2.4	26
FIGURA 2.5	28
FIGURA 2.6	29
FIGURA 2.7	32
FIGURA 2.8	38
FIGURA 3.1	44
FIGURA 3.2	45
FIGURA 3.3	46
FIGURA 3.4	47
FIGURA 3.5	48
FIGURA 3.6	49
FIGURA 3.7	51
FIGURA 3.8	52
FIGURA 3.9	59

FIGURA 3.1060

Índice de tablas

Tabla 1.1 Capacidad de los microorganismos para desarrollarse en superficies de acero inoxidable	8
Tabla 1.2 Técnicas de análisis electroquímico.....	10
Tabla 2.1 Composición química de los aceros AISI 304 y AISI 316	22
Tabla 2.2 Composición química experimental de los aceros AISI 304 y AISI 316.....	23
Tabla 3.1 Resumen de resultados relevantes del EIS para ambos tipos de acero	50
Tabla 3.2 Resultados obtenidos de las curvas potencioestáticas para cada tipo de acero.....	53
Tabla 3.3 Resultados por cada muestra evaluada.....	54
Tabla 3.4 Obtención de parámetros estadísticos en los resultados del acero AISI 304	54
Tabla 3.5 Obtención de parámetros estadísticos en los resultados del acero AISI 316	55
Tabla 3.6 Costos asociados a la evaluación electroquímica en medios salinos utilizando un potenciostato/galvanostato	56
Tabla 3.7 Estimación de los ahorros potenciales en una empresa camaronera que genera 500 millones USD anuales	57
Tabla 3.8 Flujo neto, acumulado y recuperación de la inversión.....	57
Tabla 3.9 Resumen de resultados del análisis económico	58

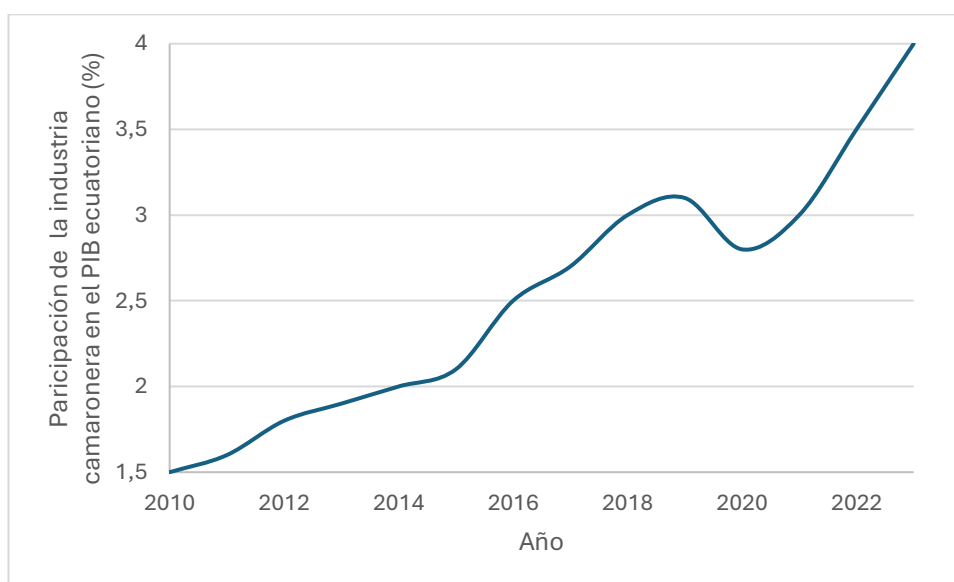
Capítulo 1

1. Introducción

La economía de Ecuador depende en gran medida de la industria camaronera, una de las principales generadoras de empleo y divisas para el país. Desde 2012, cuando se posicionó como la tercera industria exportadora, hasta 2015 —año en que superó al banano como principal producto no petrolero—, el sector no ha dejado de crecer. De hecho, Ecuador es hoy el segundo exportador mundial de camarón [1]. Aunque su aporte directo al PIB nacional ronda el 4% [2], su relevancia se multiplica al contrastarlo con el peso de las exportaciones en la economía ecuatoriana: estas representan el 30.8% del PIB [3], y de ese porcentaje, el camarón explica cerca del 13% (*4 de cada 30.8 puntos*). Esta relación, quizás poco evidente a primera vista, subraya el rol clave de la industria, cuyo crecimiento sostenido se ilustra en la figura 1.1.

Figura 1.1

Participación de la exportación de camarón en el PIB del Ecuador.



Nota. Tomado de Análisis del sector camaronero y su participación en el crecimiento económico del Ecuador por V. Reyes, 2019 [2].

Este crecimiento demuestra que Ecuador depende de la industria camaronera para mantener estable su economía [2]. Sin embargo, debido a la agresividad de su entorno, la industria ha tenido problemas constantes con la corrosión en sus equipos. Como son resistentes y compatibles con los alimentos, los aceros inoxidable austeníticos como el AISI 304 y 316 son muy utilizados. No obstante, la exposición prolongada al agua de mar, rica en cloruros, puede provocar corrosión por picaduras, lo que puede afectar el rendimiento, la seguridad operativa y la calidad de los camarones[4]. Esto puede dar lugar a mayores costes y pérdidas. Por ello, entre los objetivos de este estudio está la evaluación de la resistencia a la corrosión de estos aceros mediante ensayos electroquímicos. Como resultado se generará una guía en base a estándares internacionales que permita al usuario mejorar la selección de los materiales y con ello minimizar los gastos de mantenimiento y fomentar la sostenibilidad en la industria.

1.1 Descripción del Problema

En el sector camaronero, la elección de aceros inoxidable se fundamenta en su capacidad para resistir procesos corrosivos. Sin embargo, en las plantas procesadoras de Ecuador, la exposición prolongada a ambientes salinos y agentes químicos —propios de las piscinas de producción— induce una degradación acelerada de estos materiales. Este fenómeno impacta directamente en la durabilidad de la infraestructura, lo que se traduce en costos operativos elevados, tal como lo indican análisis recientes [2].

Un aspecto adicional de preocupación es el rol de las superficies corroídas como focos de proliferación microbiana. La presencia de microorganismos patógenos en estas áreas no solo compromete la inocuidad del producto, sino que expone a la industria a incumplimientos regulatorios, especialmente frente a estándares internacionales de calidad [3].

Cabe destacar que, si bien existen numerosos estudios sobre el comportamiento de los aceros AISI 304 y AISI 316 en condiciones extremas [3], el contexto ecuatoriano carece de

investigaciones específicas. En particular, no se han documentado estrategias de mantenimiento adaptadas a las plantas camaroneras nacionales, donde la alta concentración de cloruros en el ambiente exige intervenciones técnicas diferenciadas.

1.2 Justificación del Problema

El sector camaronero asume un papel vital en la economía de varias naciones, por su participación en las exportaciones y en la generación de empleo. La eficacia dentro del sector depende en gran medida del rendimiento de los equipos y de la calidad sanitaria del producto final. Sea como fuere, las fuertes circunstancias ambientales dentro de la industria aceleran la corrosión de los materiales claves, por ejemplo, los aceros inoxidable de la serie 300, que están presentes en un gran número de los equipos y herramientas en la industria de alimentos.

La corrosión de estos aceros no solo influye en la producción y la seguridad operativa, aumentando los costos de mantenimiento, sino que también influye en la calidad de los camarones, aumentando las pérdidas a causa de productos rechazados. En términos económicos, el estudio de Calixto Gómez establece que los costos asociados a la corrosión en países industrializados representan entre el 3 y el 4 % del producto interno bruto total del país [5], lo que en el mercado ecuatoriano representaría pérdidas de millones de dólares.

Ante los desafíos identificados, la implementación de controles rigurosos basados en evidencia técnica se vuelve indispensable. En este trabajo, la evaluación de la cinética de corrosión mediante pruebas electroquímicas en los aceros AISI 304 y AISI 316 propone una metodología para optimizar la selección de materiales, establecer comparativas objetivas con alternativas disponibles en el mercado y diseñar programas de mantenimiento preventivo adaptados a las exigencias de la industria.

Estos tres ejes, derivados de los resultados experimentales, buscan reducir costos asociados al deterioro prematuro de equipos y promover prácticas sostenibles en el sector.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable AISI 304 y AISI 316 utilizados en la industria camaronera mediante ensayos cinéticos electroquímicos con un potencióstato/galvanostato, comparando sus tasas de corrosión y mecanismos de deterioro para obtener una guía que permita optimizar la selección de materiales, mejorar la durabilidad de los equipos, reducir los costos operativos y contribuir a la sostenibilidad del sector.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Identificar las propiedades y características de resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable AISI 304 y AISI 316 en condiciones de alta salinidad, típicas en la industria camaronera, destacando sus diferencias y ventajas específicas en comparación con otros materiales.
2. Realizar ensayos cinéticos electroquímicos, tales como curvas de polarización potencióstática y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) sobre los aceros inoxidable AISI 304 Y AISI 316 para determinar su comportamiento frente a la corrosión en condiciones representativas de la industria camaronera.
3. Comparar los resultados obtenidos en los ensayos electroquímicos para determinar las tasas de corrosión, identificar los mecanismos de deterioro y analizar las ventajas y desventajas de los aceros inoxidable AISI 304 y AISI 316 en comparación con otros metales resistentes a la corrosión, como el aluminio y las aleaciones níquel-cobre.
4. Proponer recomendaciones sobre la selección de materiales óptimos para la industria camaronera, basándose en los resultados experimentales obtenidos, enfocándose en mejorar la durabilidad de los equipos, reducir los costos de mantenimiento y minimizar el impacto en la calidad del camarón.

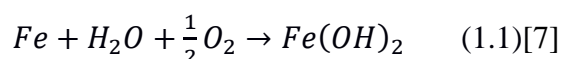
1.4 Marco teórico: La corrosión en la industria camaronera y su evaluación mediante técnicas electroquímicas

1.4.1 Corrosión en la Industria Camaronera

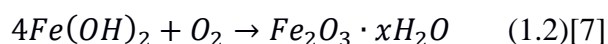
El sector camaronero se enfrenta a dificultades críticas relacionadas con la corrosión debido al incesante contacto de los equipos y componentes metálicos a condiciones agresivas. Estas condiciones se dan por altas concentraciones de sales, humedad y cambios de temperatura que favorecen diferentes mecanismos corrosivos, particularmente en materiales como los aceros inoxidable, que son ampliamente utilizados en esta industria debido a sus propiedades anticorrosivas y simplicidad de limpieza [6].

Los diferentes mecanismos de corrosión que se dan en los ambientes marinos de las piscinas de cultivo de camarones se describen a continuación:

Corrosión uniforme. Se produce cuando la superficie metálica se degrada de forma homogénea debido a reacciones químicas generales:



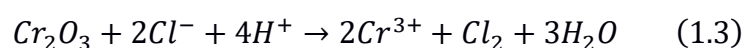
Después, puede ocurrir la oxidación del hidróxido de hierro formando óxidos más estables, como:



Los aceros de bajo carbono, en su mayoría, son los que no son usualmente empleados en la industria camaronera debido a su alta vulnerabilidad a la corrosión en ambientes marinos y en condiciones de saturación de dióxido de carbono (CO₂)[8]. A pesar de que este tipo de acero puede formar una capa protectora de carbonato de hierro (FeCO₃), es deficiente en entornos de alta salinidad, donde la corrosión uniforme puede comprometer la integridad estructural de las instalaciones o calidad del producto [8]. Así, la necesidad de materiales con mayor durabilidad y menor requerimiento de mantenimiento ha llevado a la industria camaronera a rechazar el acero

de bajo carbono en favor de aleaciones más confiables y resistentes, como los son los AISI 304 y 316.

Corrosión localizada. Como su nombre lo indica, ocurre cuando el metal es degradado en áreas puntuales. En aceros inoxidable expuestos a cloruros es muy común que se presente corrosión por picaduras, ya que los cloruros atacan la capa pasiva del cromo de la siguiente manera:



La corrosión por hendidura también se presenta, la cual ocurre cuando surcos de algún componente metálico presentan acumulación de material corrosivo [7].

Corrosión galvánica. Ocurre cuando dos metales de diferentes propiedades electroquímicas están en contacto dentro de un electrolito [7]. En los equipos de la industria camaronera, los aceros inoxidable podrían actuar como cátodo en presencia de materiales menos nobles como bronces o aceros al carbono, lo que aumentaría la tasa de corrosión de estos últimos [6].

Los aceros austeníticos AISI 304 y 316, habituales en el sector camaronero, son capaces de resistir ambientes corrosivos, pero las altas concentraciones de sales comprometen su capa pasiva, provocando reacciones anódicas localizadas [7]. Este desprendimiento continuo de partículas metálicas afecta tanto al rendimiento operativo como a la calidad del producto final. El impacto de la corrosión en la sanidad del camarón se revisa en el siguiente apartado.

1.4.2 Impacto de la Corrosión en la Calidad Sanitaria del Camarón

La corrosión en equipos camaroneros no solo daña infraestructuras, sino que contamina el agua, afectando la calidad sanitaria del camarón. En este sentido, investigaciones como la de Shokri y Fard revelan que los procesos corrosivos de estructuras sumergidas liberan óxidos

metálicos, gases corrosivos y subproductos biocidas, fenómenos documentados originalmente en plantas desalinizadoras [9]. La tabla 1.1 resume estos hallazgos.

Tabla 1.1

Fuentes de contaminación del agua a causa de la corrosión

Fuente de contaminación	Hallazgo en plantas desalinizadoras
Óxidos metálicos	Liberación de partículas de Fe, Ni, Cu en aguas tratadas.
Bio incrustaciones y corrosión	Microorganismos aceleran liberación de partículas.
Gases corrosivos (H_2S , CO_2)	Alteran pH y liberan metales al agua.

Nota. Tomado de Corrosion in seawater desalination industry: A critical analysis of impacts and mitigation strategies por Shokri y Fard, 2022 [9].

Sin embargo, en el año 2013, López García et al. [10], confirmaron que los productos de corrosión con poca adherencia se desprenden de los materiales sumergidos y contaminan el agua de mar, afectando las especies vivas y los cultivos en estanques de acuicultura.

Adicionalmente, Dula et al. [11], analizaron como los microorganismos formadores de biopelículas se adhieren a las superficies corroídas de acero inoxidable gracias al aumento de su rugosidad. Un ejemplo de esto es la *Listeria monocytogenes*, que causa contaminaciones gastrointestinales. La liberación de partículas metálicas, como el hierro y el níquel, también favorece el desarrollo de estos microorganismos. La tabla 1.2 muestra el mecanismo de acción de varios microorganismos formadores de biopelículas.

Tabla 1.2

Capacidad de los microorganismos para desarrollarse en superficies de acero inoxidable.

Microorganismo	Propiedad para formar biopelículas	Efectos en el sistema digestivo	Adherencia al acero inoxidable

<i>Listeria monocytogenes</i>	Proteínas asociadas a la superficie, ADN extracelular	Gastroenteritis, infección de la vesícula biliar.	Superficies rugosas de acero inoxidable que estén húmedas o secas.
<i>Bacillus Cereus</i>	Endosporas, motilidad flagelar, proteínas.	Toxinas entéricas diarreicas y toxinas eméticas.	Interfases aire-líquido y bajo condiciones sumergidas.
<i>Salmonella spp.</i>	Lipopolisacáridos, motilidad flagelar.	Endocitosis	Puede desarrollarse bajo cualquier condición, dependiendo del acabado del acero.
<i>Escherichia coli</i>	Flagelos y fimbrias	Toxinas enterohemorrágicas	Hidrofobicidad del material de la superficie

Nota. Tomado de Bacterial biofilm formation on stainless steel in the food processing environment and its health implications por Dula et al., 2021 [11].

Esto último demuestra que la corrosión es un tema de cuidado en una industria con rigurosos controles sanitarios. Los productos rechazados pueden generar pérdidas significativas, y el reemplazo de equipos aumenta costos operativos. El siguiente apartado desarrolla los conceptos de los ensayos electroquímicos y cómo estos pueden generar un plan preventivo adecuado para la industria camaronera.

1.4.3 Ensayos Cinéticos Electroquímicos

Para analizar los mecanismos de corrosión, los ensayos electroquímicos cinéticos son esenciales [12]. Proporcionan información cuantitativa sobre la velocidad de las reacciones electroquímicas midiendo la corriente en función del potencial. Estos ensayos analizan las reacciones de oxido-reducción, el comportamiento de las interfaces y la transferencia de carga, todos ellos aspectos cruciales para evaluar la resistencia a la corrosión de los materiales [7]. En la tabla 1.3 se muestra un resumen de los distintos ensayos y su alcance.

Tabla 1.3

Técnicas de análisis electroquímico.

Técnicas de análisis electroquímico	Aplicaciones
Voltametría cíclica	Permite determinar potenciales de oxidación y reducción.
Voltametría de barrido lineal	Permite comprender los mecanismos y las tasas de corrosión a través de curvas de polarización.
Análisis voltamétrico	Determinación de concentración de analitos en la solución
Métodos cronométricos	Sirven para analizar datos a lo largo del tiempo, permiten realizar predicciones, pero son procesos que necesitan recibir información constante.
Análisis de desprendimiento potenciométrico	Utilizada para la determinación de presencia de metales en el medio o solución

Espectroscopía de impedancia	Estudio de procesos de transferencia de carga y procesos difusivos.
------------------------------	---

Nota. Información tomada de estudios elaborados por Ahmad [13] y Montella [14]

La Voltametría de barrido lineal, que permite la obtención de curvas de polarización, y la espectroscopía de impedancia electroquímica son los ensayos más respaldados científicamente para evaluar la corrosión [7] [14]. El potencial natural también es crucial en estos estudios. Estos conceptos se profundizan a continuación:

Potencial natural. Este describe el potencial electroquímico de un metal en su estado natural, sin corriente externa, describiendo el equilibrio entre las reacciones de oxidación y reducción cuando el metal está en contacto con su entorno, como una solución acuosa, sin estar anodizado ni pasivado [7].

Curvas de polarización. El análisis de curvas de polarización es una de las técnicas electroquímicas más utilizadas para evaluar la resistencia a la corrosión de los materiales. A partir de su estudio, es posible determinar parámetros fundamentales como el potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}), los cuales permiten comprender el comportamiento de los materiales en medios agresivos [7]. Estos valores pueden emplearse en la ecuación 1.4, denominada ecuación de Tafel, que describe la relación entre la densidad de corriente (I) y el potencial aplicado (E).

$$I = I_{corr} \cdot \exp\left(\frac{E - E_{corr}}{b}\right) \quad (1.4)$$

Donde E es el Potencial aplicado y b es la pendiente de Tafel, que caracteriza la velocidad de reacción en las regiones anódica y catódica[7]. Además, la velocidad de corrosión puede calcularse mediante la ecuación 1.5, denominada ecuación de Faraday[6].

$$v_{corr} = \frac{I_{corr} \cdot M}{n \cdot F \cdot \rho} \quad (1.5)$$

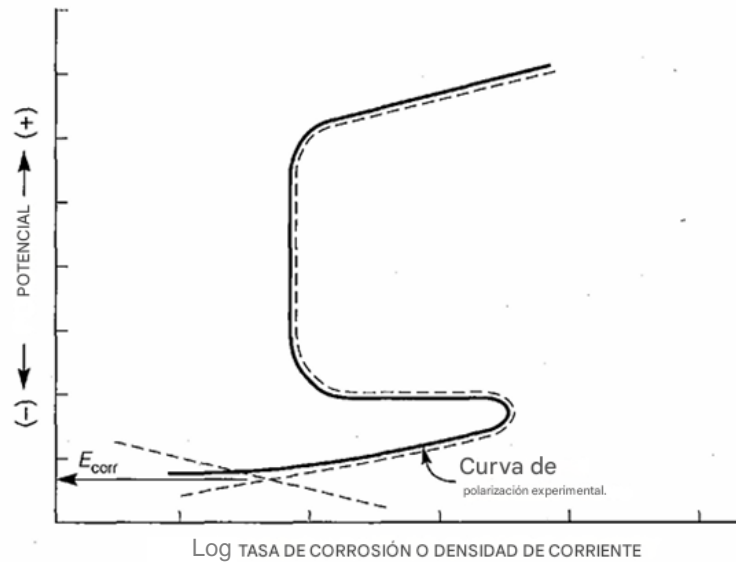
Donde M es la masa atómica del metal, n el número de electrones transferidos en la reacción de corrosión, F la constante de Faraday y ρ la densidad del material.

Las curvas de polarización pueden clasificarse en potencioestáticas, potenciodinámicas y galvanostáticas, cada una con aplicaciones específicas en la caracterización de materiales:

- 1. Curvas potencioestáticas.** En este método se mantiene un potencial constante mientras se mide la corriente a lo largo del tiempo. Esto permite evaluar la estabilidad de la capa pasiva en materiales como los aceros inoxidable y determinar su resistencia en presencia de agentes corrosivos, como los iones cloruro [7]. Además, es útil para identificar las transiciones entre las regiones de activación, pasivación y transpasivación, proporcionando información detallada sobre la susceptibilidad del material a la corrosión localizada [7]. En esta curva, se utiliza la región de activación para obtener valores de I_{corr} y E_{corr} utilizados para determinar la velocidad de corrosión mediante la ecuación 1.5. La figura 1.2 muestra un ejemplo de una curva de polarización potencioestática teórica obtenida del libro de Jones.

Figura 1.2

Curva de polarización potencioestática donde se muestra la obtención del potencial de corrosión (E_{corr}) y la zona de corriente constante o pasivación

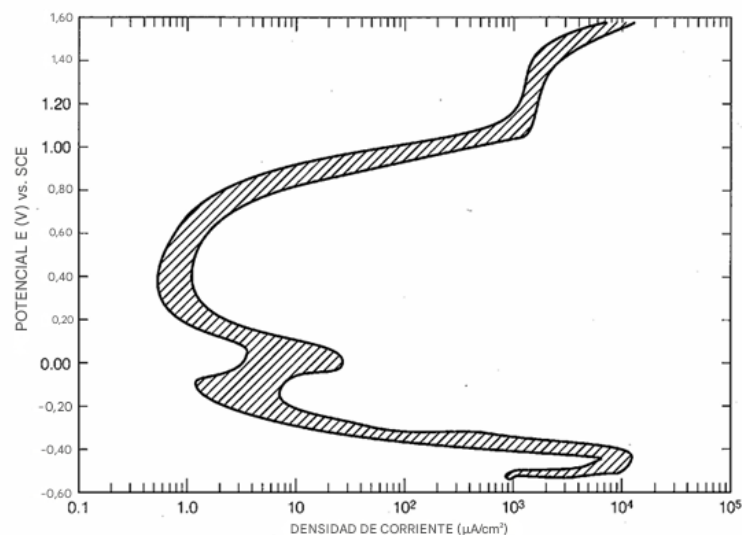


Nota. Tomado de Principles and prevention of corrosion por D. A. Jones, 1996 [7].

2. Polarización Potenciodinámica. Es un barrido rápido de potencial que permite evaluar las transiciones entre estados activos y pasivos. Permite analizar la formación de picaduras [7]. Del mismo modo, este ensayo electroquímico es útil para estudiar la cinética de repasivación, ya que muestra cómo se recupera la película protectora tras ser alterada. En este ensayo ocurre una variación del potencial con respecto al tiempo, tal como su nombre lo indica, lo que permite obtener parámetros como el potencial de picadura (E_{pit}), el potencial de pasivación (E_{pass}) y la densidad de corriente crítica de pasivación (I_{pass}) [7]. La figura 1.3 muestra un ejemplo de una curva potenciodinámica obtenida del libro de Jones[7].

Figura 1.3

Curva de Polarización Potenciodinámica que muestra el barrido de potencial del acero inoxidable AISI 430 con respecto a un electrodo saturado de calomel (SCE)



Nota. Tomado de Principles and prevention of corrosion por D. A. Jones, 1996 [7].

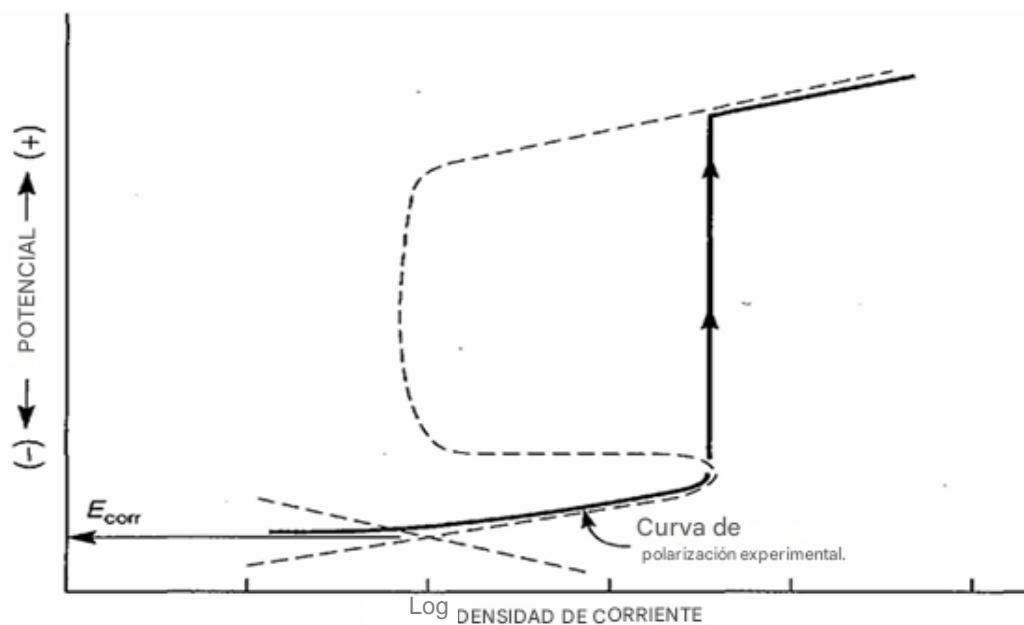
- 3. Polarización Galvanostática.** En este caso, se utiliza una corriente constante para medir la evolución de potencial del sistema [7]. Esta técnica se utiliza para evaluar la capacidad del material de mantenerse en estado pasivo bajo una carga electroquímica específica y su resistencia frente a sobrecargas anódicas [7]. La ecuación 1.6 representa la polarización lineal que describe la relación entre el sobrepotencial y la resistencia a la polarización (R_p) (Jones, 1996).

$$R_p = \frac{d\eta}{di} = \frac{RT}{i_o F} \quad (1.6)$$

Esto es importante, porque mientras mayor sea la resistencia a la polarización, existirá una mayor protección del material contra la corrosión [7]. La figura 1.4 muestra una curva experimental de polarización galvanostática obtenida del libro de Jones.

Figura 1.4

Polarización de una aleación activo-pasiva con corriente galvanostática controlada.



Nota. Tomado de Principles and prevention of corrosion por D. A. Jones, 1996 [7].

Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS). Utiliza una señal de corriente alterna en torno a un potencial de referencia para examinar las propiedades electroquímicas de los materiales [7]. La resistencia y la capacitancia del sistema están relacionadas con la respuesta de impedancia y la función de frecuencia [14]. Los resultados se muestran en gráficos de Nyquist o Bode. Estos gráficos permiten investigar el comportamiento capacitivo y resistivo de la interfaz [14]. Debido a la resistencia de la capa pasiva y la impedancia asociada con las reacciones corrosivas, las mediciones a baja frecuencia son particularmente sensibles a los procesos de corrosión [14].

Los parámetros clave obtenidos en un análisis de EIS son:

- **Resistencia de solución (R_s):** La resistencia eléctrica del medio.

- **Resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}):** Representa la resistencia al flujo de electrones en la interfaz, está relacionada con la velocidad de corrosión.
- **Capacitancia de doble capa (C_{dl}):** Muestra la capacidad de la interfaz para almacenar carga.
- **Índice de difusión (n):** Vinculado con las características de la película pasiva y el comportamiento de la celda.

Los parámetros EIS permiten modelar con mayor precisión la cinética de la corrosión y realizar un diagnóstico detallado de la eficacia y estabilidad de las capas protectoras en los materiales metálicos [7].

El equipo utilizado para desarrollar estos ensayos es el potencióstato/galvanostato, cuyo concepto será desarrollado en el siguiente apartado.

1.4.4 Potencióstato/Galvanostato

Los potencióstatos/galvanostatos, permiten el control preciso de los ensayos cinéticos mediante la conservación de un potencial o corriente constante mientras se observa la respuesta electroquímica del sistema [15]. El software del sistema permite obtener resultados de técnicas avanzadas en tiempo real a través de un sistema de tres electrodos conectados a la placa principal [15]. Estos electrodos son:

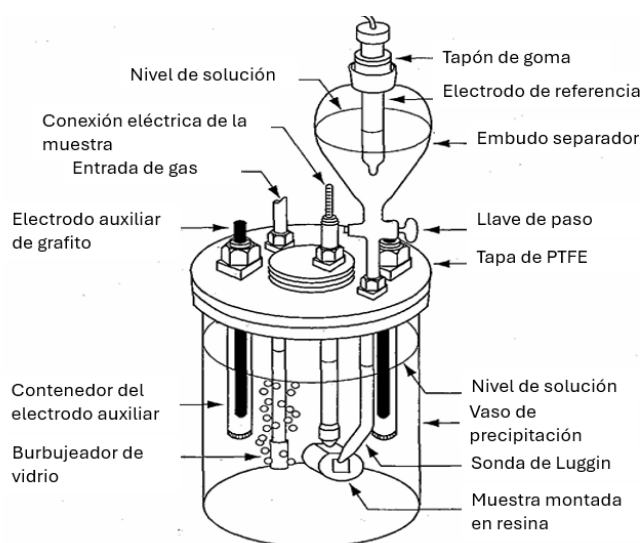
- **Electrodo de trabajo:** Es el material que se evalúa y donde ocurren las reacciones electroquímicas [15].
- **Electrodo de referencia:** En base a este electrodo, se miden las respuestas de potencial o corriente [15].
- **Contraelectrodo:** Mejora el flujo de electrones y ayuda a cerrar el circuito [15].

La figura 1.5 muestra un esquema del montaje de los electrodos en la celda electroquímica para la evaluación de las muestras metálicas.

A través de la configuración del sistema (potenciostato + celda electroquímica) y las reacciones electroquímicas inducidas, se generan gráficos que permiten estudiar los fenómenos de corrosión de forma detallada.

Figura 1.5

Esquema de una celda electroquímica en la cual se observan sus elementos principales detallados.



Nota. Tomado de Principles and prevention of corrosion por D. A. Jones, 1996 [7].

La ESPOL cuenta actualmente con un potenciostato/galvanostato de la marca “Metrohm Autolab” (figura 1.6), el cual cuenta con los materiales descritos en la figura 1.5, por lo que no existe la necesidad de prefabricar los componentes. Con este equipo se realiza la metodología bajo las normas ASTM G3, G69-20, G106-89 y G5. Los procesos se detallan en el siguiente capítulo.

Figura 1.6

Potenciostato/Galvanostato Metrohm Autolab. Modelo a utilizar en la parte practica



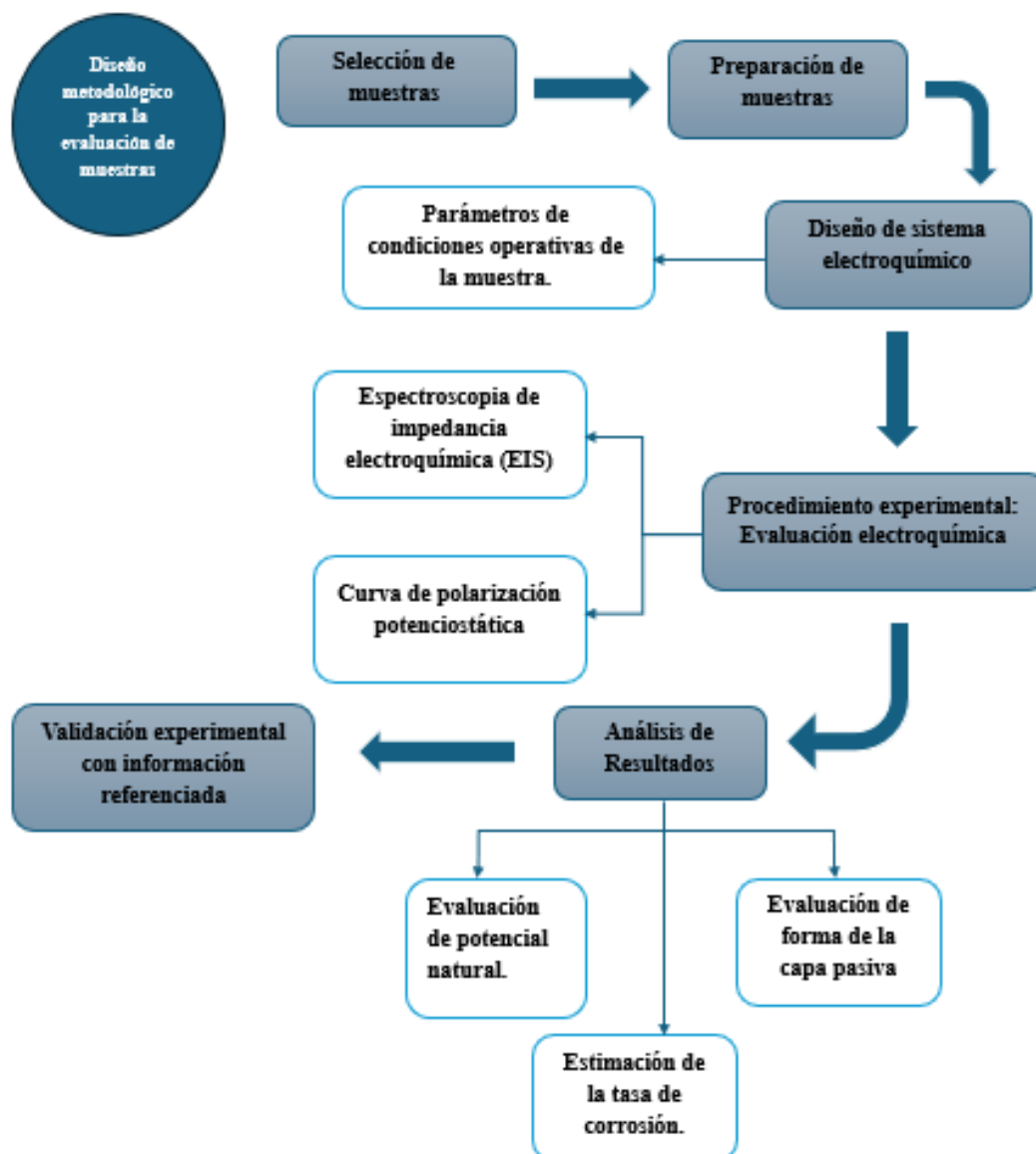
Capítulo 2

2. METODOLOGÍA

La metodología adoptada se basó en un enfoque cuantitativo y cualitativo de la información obtenida, con el objetivo de crear directrices eficaces para la selección ideal de materiales en aplicaciones expuestas a condiciones de alta salinidad. Además, se pensó en la importancia de los resultados y en la preparación de metodologías de prevención, limitando el riesgo de defectos estructurales en elementos críticos del sector camaronero, disminuyendo así costos directos e indirectos asociados a la corrosión. Con Respecto al enfoque que tiene el proyecto, el diseño experimental será ilustrado como en la figura 2.1

Figura 2.1

Diagrama de flujo de la evaluación de muestras



2.1 Diseño Experimental

2.1.1 Selección de muestras

Se seleccionaron los aceros inoxidables austeníticos AISI 304 y AISI 316 por su amplio uso en aplicaciones industriales sometidas a condiciones altamente corrosivas. La elección de

estos materiales dependió de sus propiedades y de su capacidad para satisfacer las necesidades de rendimiento en las condiciones previamente mencionadas.

Puntos clave por considerar previo a evaluaciones

1. Composición química:

Teniendo en cuenta los aceros inoxidable a evaluar, debido a que son los más empleados en la industria camaronera, se presenta una tabla de composición química estándar para certificar que pertenecen a dicho grupo:

Tabla 2.1

Composición química de los aceros AISI 304 y AISI 316.

Elemento	AISI 304 (% en peso)	AISI 316 (% en peso)
Cromo (Cr)	18.0-20.0	16.0-18.0
Níquel (Ni)	8.0 -10.5	10.0 – 14.0
Molibdeno (Mo)	-	2.0 – 3.0
Carbono (C)	Máx. 0.08	Máx. 0.08
Manganeso (Mn)	Máx. 2.0	Máx. 2.0
Silicio (Si)	Máx. 1.0	Máx. 1.0

Nota. Datos obtenidos de la norma ASTM A240 [16].

En la tabla 2.2, se muestra el análisis químico de los aceros evaluados. Comparando estos valores con los de la tabla 2.1, se puede confirmar la validez de estos aceros para la experimentación.

Tabla 2.2

Composición química experimental de los aceros AISI 304 y AISI 316.

Elemento	AISI 304 (% en peso)	AISI 316 (% en peso)
Cromo (Cr)	17.6	16.5
Níquel (Ni)	8.4	9.89
Molibdeno (Mo)	-	1.97
Carbono (C)	0.046	0.0718
Manganeso (Mn)	0.89	1.8
Silicio (Si)	0.41	0.58

Nota. Datos obtenidos del Laboratorio de Evaluación de Materiales (LEMAT) – ESPOL

Como está establecido en la tabla 2.2, El contenido de molibdeno en el acero inoxidable AISI 316 evaluado en este estudio se encuentra por debajo del rango normado, lo que sugiere una posible precipitación de carburos de molibdeno o cromo debido a tratamientos térmicos previos[17]. Dado que el molibdeno es un elemento clave en la mejora de la resistencia a la corrosión en medios agresivos, su reducción puede comprometer la estabilidad de la capa pasiva y aumentar la susceptibilidad a la corrosión localizada, especialmente en presencia de iones cloruro[18].

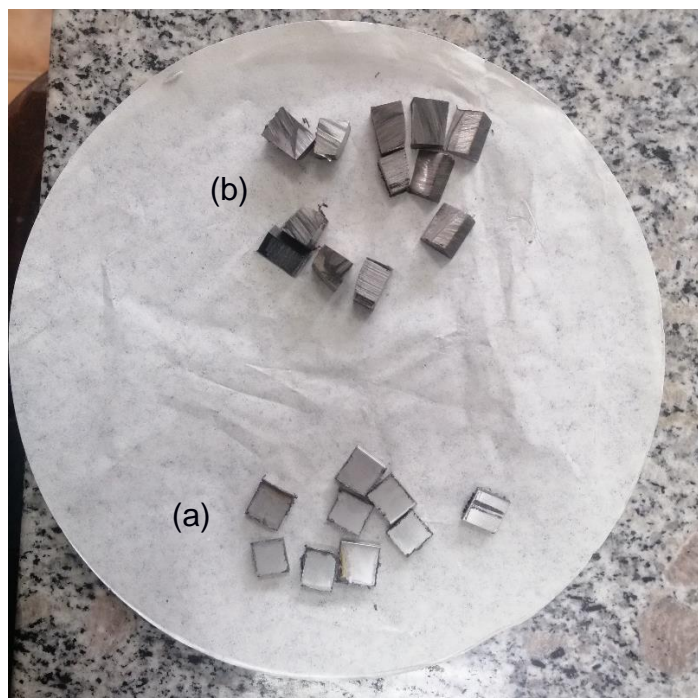
2.1.2 Preparación de muestras

La preparación de las muestras se realizó de acuerdo con las normas establecidas por el estándar ASTM G1, que detalla los métodos normalizados para la limpieza de las superficies

metálicas antes de las pruebas de corrosión. El objetivo de esta metodología es garantizar que las superficies expuestas de las probetas no estén contaminadas por impurezas que puedan alterar las lecturas de la investigación electroquímica. Las muestras fueron cortadas en probetas de 1 cm² de región de superficie expuesta, como se puede observar en la figura 2.2, garantizando una región homogénea para las estimaciones ya establecidas en ASTM G1-03 [19].

Figura 2.2

Muestras de aceros inoxidables (a) AISI 304 y (b) AISI 316 cortadas a 1 cm² de área según la norma ASTM G1.



Los pasos específicos seguidos durante la preparación de las muestras se describen a continuación:

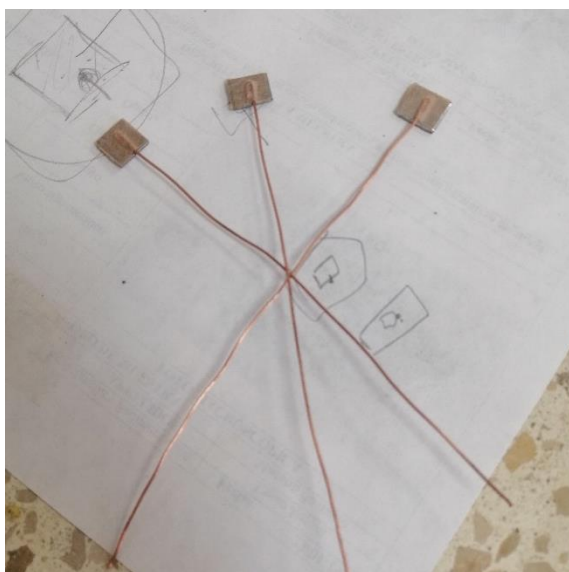
1. **Desengrase y preparación de la base del electrodo:**

La remoción de impurezas superficiales, como aceites y lubricantes, se completó desengrasando con alcohol isopropílico 99.95%. Este compuesto es un disolvente

utilizado habitualmente en la limpieza de superficies metálicas por su capacidad para desintegrar eficazmente los contaminantes sin dejar acumulaciones. Una vez limpias, las muestras se dejan en contacto directo con un alambre de cobre de manera que se permita conductividad eléctrica entre ambos metales. Esta unión se muestra en la figura 2.3.

Figura 2.3

Preparación de la base del electrodo de trabajo de los distintos tipos de aceros.



2. Encapsulamiento:

En esta etapa se prioriza aislar las áreas no expuestas con materiales poliméricos resistentes al electrolito de la celda electroquímica a usar durante la experimentación, para evitar corrientes parásitas. Es decir, evitar que exista ruido en las lecturas de los ensayos electroquímicos debido a la existencia de interferencias que no son de interés dentro del sistema. Se seleccionaron 12 muestras, distribuidas en dos grupos: 6 de acero inoxidable AISI 304 y 6 de AISI 316. Previo al encapsulamiento, se verificó la conductividad eléctrica de cada muestra, utilizando un multímetro para garantizar un

contacto adecuado durante los ensayos. Para que posteriormente se proceda con las siguientes etapas.

3. Preparación del Molde:

Se utilizaron moldes de silicona, mostrados en la figura 2.4, recubiertos internamente con vaselina, lo que evita la adhesión de la resina al molde y facilita la extracción posterior de las muestras encapsuladas.

4. Preparación y vertido de la resina:

En la figura 2.3, se muestra cómo se realizó una mezcla de resina de poliéster en una cantidad suficiente para encapsular las 12 muestras en un grosor de probeta entre 0.7 a 1 cm. Cada muestra se posicionó en su respectivo molde de silicona y se vertió la resina, asegurando que cubriera completamente el volumen de interés para los ensayos.

Figura 2.4

Encapsulamiento de las muestras de aceros inoxidable AISI 304 y AISI 316, preparación del molde y vertido de la resina de polietileno.



5. **Tiempo de Curado:**

Las muestras encapsuladas se dejaron en reposo durante 2 horas a temperatura ambiente, tiempo necesario para que la resina alcanzara una consistencia sólida.

6. **Inspección Visual:**

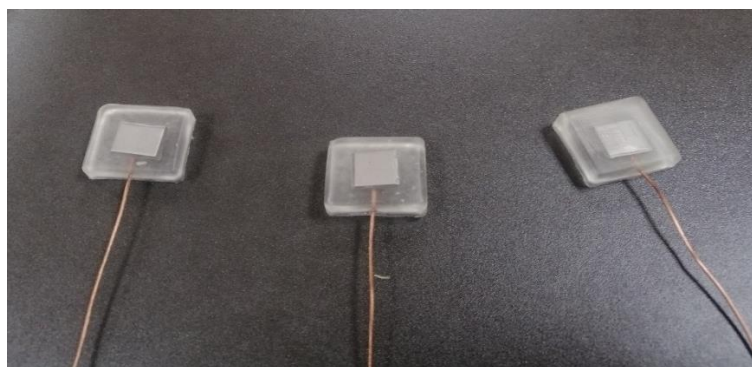
Después del curado, cada muestra fue inspeccionada bajo un microscopio óptico para verificar la ausencia de burbujas, defectos o irregularidades en la encapsulación que pudieran afectar los resultados de los ensayos.

7. **Pulido Mecánico:**

Luego de la limpieza mecánica inicial y el encapsulamiento, se realizó un pulido mecánico utilizando lijas de carburo de silicio con rugosidades sucesivamente menores: 180, 320, 600 y 1000. Esta estrategia se orientó a trabajar a nivel superficial la naturaleza de las muestras, eliminando defectos apreciables y configurando una superficie homogénea y lisa para los ensayos electroquímicos. La utilización de granulometrías crecientes permite una lenta disminución de la rugosidad superficial, lo que favorece la obtención de resultados más exactos en los ensayos de corrosión.

Figura 2.5

Pulido mecánico de las probetas a evaluar en los ensayos electroquímicos, con finalidad de evitar perturbaciones en la evaluación de la superficie expuesta.

**8. Pulido final con Alúmina:**

El pulido fino con alúmina neutra se realiza para garantizar una superficie homogénea y libre de defectos en las muestras, eliminando irregularidades, micro fisuras y contaminantes que podrían alterar los resultados electroquímicos. Este proceso asegura una distribución uniforme de las reacciones en la superficie, minimiza las interferencias microestructurales y elimina capas de óxidos o residuos de abrasivos previos. Además, evita la introducción de contaminantes y garantiza la reproducibilidad de los ensayos, permitiendo evaluar de manera precisa las propiedades intrínsecas del material. Por último, se aisló toda la superficie del cobre que estará expuesto dentro del medio electroquímico, para así evitar que exista ruido dentro de las mediciones en los ensayos electroquímicos. Todo esto descrito podemos observarlo en la figura 2.6.

Figura 2.6

Pulido final con alumina y aislamiento del alambre de cobre, para evitar que el cobre emita señales o lecturas erróneas para el estudio.

**9. Limpieza final con alcohol industrial:**

El ciclo de preparación descrito anteriormente garantiza que las probetas estén libres de contaminantes, defectos y modificaciones superficiales, asegurando la reproducibilidad y exactitud de los resultados obtenidos en las pruebas electroquímicas resultantes.

2.1.3 Diseño del sistema electroquímico

El diseño experimental tenía por objeto realizar mediciones electroquímicas exactas que permitieran evaluar la conducta de las muestras de acero inoxidable en condiciones severas pero controladas. El procedimiento incorporó una celda electroquímica equipada con tres electrodos, que desempeñan funciones inequívocas en el análisis de la reacción electroquímica del material. A continuación, se describen punto por punto las partes fundamentales de dicha celda:

- **Electrodo de Trabajo (WE):**

- Los electrodos de trabajo (WE) se componen de muestras de acero inoxidable del tipo AISI 304 y AISI 316, preparados de acuerdo con el diseño experimental descrito en el segmento anterior. Estas probetas se convierten en el área de interés para las pruebas de polarización y espectroscopia de impedancia, ya que son las superficies metálicas que están expuestas a los estados destructivos del entorno salino. Para esta situación, se utilizó una superficie expuesta de 1 cm² en cada electrodo, lo que tiene en cuenta la medición exacta de la corriente de corrosión y la evaluación de la resistencia de la capa pasiva.

- **Electrodo de Referencia (RE):**

- El electrodo de referencia (RE) utilizado fue un terminal de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl), es ampliamente utilizado en estudios electroquímicos debido a su estabilidad y capacidad para mantener un potencial constante en medios acuosos de alta salinidad. Su desempeño superior en estos entornos se debe a su equilibrio con el par redox AgCl(s)/Ag(s), el cual presenta una baja dependencia de las variaciones en la concentración de cloruros y minimiza los efectos de contaminación y desplazamiento del potencial que pueden afectar a otros electrodos de referencia[20]. Esto garantiza que las mediciones de polarización y espectroscopia de impedancia electroquímica sean precisas y reproducibles. Además, su compatibilidad con soluciones de NaCl lo hace ideal para la evaluación de materiales expuestos a ambientes marinos y salinos. [7][20].

- **Contraelectrodo (CE):**

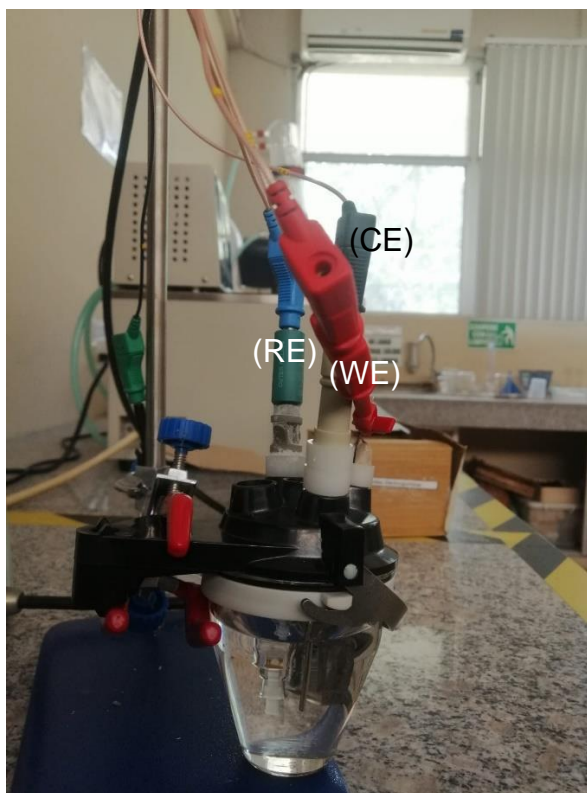
- El contra electrodo (CE) utilizado fue un electrodo de platino, un material de baja reactividad con alta conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión, que funciona como el terminal de flujo contra el que se mide la corriente durante los ensayos electroquímicos. El platino garantiza una distribución uniforme de la corriente en el sistema electrolítico, limitando el ruido en los resultados de las pruebas [15].

- **Celda Electroquímica y Solución Electroquímica:**

- El arreglo electroquímico se montó en un vaso de precipitación de 100 ml, como se puede observar en la figura 2.6, destinado a contener la disposición del electrolito y permitir la libre progresión de la corriente entre los electrodos. La solución de NaCl al 3,5% (peso/peso) se preparó con el objetivo de imitar el ambiente corrosivo habitual del clima marino. La concentración de cloruro sódico al 3,5% es ilustrativa de la salinidad típica del agua de mar, lo que proporciona un contundente para evaluar la conducta corrosiva de los aceros inoxidables.

Figura 2.7

Celda electroquímica experimental y se detallan sus componentes (CE) Contraelectrodo, (RE) Electrodo de referencia, (WE) electrodo de trabajo



▪ **Potenciostato/Galvanostato:**

- El equipo de alta precisión implementado es el Metrohm Autolab PGSTAT204 se utiliza para controlar el potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia, así como para registrar las reacciones electroquímicas. El aparato permite realizar pruebas de curvas de polarización potenciostática, que proporcionan datos sobre la densidad de la corriente de corrosión y los mecanismos corrosivos, y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), que ofrece información sobre la estabilidad de la capa pasiva y la resistencia a la transferencia de carga del material en estudio [15]. Estas pruebas son fundamentales para caracterizar

la resistencia del material en condiciones agresivas y para obtener información exacta sobre la integridad de la superficie metálica en condiciones de corrosión acelerada [15].

El esquema electroquímico previsto permite una evaluación detallada de la conducta de los aceros inoxidable AISI 304 y AISI 316 en medios salinos, proporcionando información cuantitativa que facilita realizar la comparación entre los dos materiales en cuanto a su rendimiento en condiciones agresivas y su correcto uso para aplicaciones modernas expuestas a condiciones marinas.

2.2 Procedimiento Experimental

El procedimiento experimental fue diseñado para evaluar de manera rigurosa los parámetros electroquímicos que describen la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable AISI 304 y AISI 316. Se utilizaron dos técnicas fundamentales: la curva de polarización potencioestática y la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), con el objetivo de obtener datos detallados sobre la cinética de corrosión y las propiedades de la capa pasiva [14]. A continuación, se describe el procedimiento para cada una de las pruebas:

2.2.1 Curva de Polarización Potencioestática

El ensayo de polarización potencioestática se realizó siguiendo la directriz ASTM G59, para establecer las condiciones de barrido en la muestra, como densidad de la corriente de corrosión (I_{corr}) y el potencial de corrosión (E_{corr}), que son fundamentales para evaluar la resistencia a la corrosión del material en circunstancias inequívocas[21]. El ensayo se realizó tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- **Aplicación de un Barrido de Potencial:**

Se aplicó un rango de potencial controlado entre - 250 mV y +250 mV relativo al potencial de corrosión (E_{corr}), con una velocidad de amplitud de 1 mV/s. Este rango de potencial permite investigar tanto la zona catódica como la anódica, cubriendo el comportamiento de polarización y trabajando con la identificación de señales de corriente relacionados con la corrosión activa y pasiva.

- **Registro de la Densidad de Corriente:**

Durante el barrido de potencial, la densidad de corriente se registró como un componente del potencial aplicado, permitiendo obtener una curva de polarización. Esta curva es fundamental para calcular la tasa de corrosión del material; ya que proporciona datos detallados sobre el desarrollo de la corriente de corrosión en función del cambio en el potencial [21].

- **Cálculo de Parámetros Electroquímicos:**

A partir de la información obtenida de las curvas de polarización, se realizó el ajuste de curvas en la región de Tafel para obtener los parámetros electroquímicos claves, como la densidad de la corriente de corrosión (I_{corr}), el potencial de corrosión (E_{corr}) y los coeficientes de Tafel (β_a y β_c) que representan la energía de las respuestas anódica y catódica. Estos parámetros son cruciales para determinar la tasa de los procesos de corrosión y la estabilidad del material en el medio corrosivo [21].

2.2.2 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)

La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) se realizó para estudiar la resistencia a la transferencia de carga y la capacitancia de la capa pasiva, proporcionando datos básicos sobre la fiabilidad de la capa de protección que se forma en los aceros inoxidable y los mecanismos de corrosión a varias frecuencias [22]. La prueba se realizó según la norma ASTM G106, siguiendo los medios descritos a continuación:

- **Aplicación de una Perturbación Sinusoidal:**

Se aplicó una corriente sinusoidal de 10 mV (CA) de amplitud sobre el potencial de corrosión (E_{corr}), lo que permite analizar la respuesta en la reacción electroquímica del material bajo circunstancias de señales mínimas o frecuencias bajas. Esta perturbación de bajo voltaje garantiza que las mediciones se realicen dentro del ámbito lineal de la estructura, evitando la modificación de la capa pasiva [22].

- **Registro de la Respuesta en Frecuencia:**

Los datos de la muestra se registraron en un rango de frecuencias de 0,01 Hz a 100 kHz, cubriendo tanto las bajas frecuencias, que están relacionadas con la difusión y la transferencia de carga, como las altas frecuencias, que proporcionan datos sobre la capacitancia de la capa pasiva y la resistividad correspondiente al electrolito [22].

- **Análisis de los datos mediante Espectroscopia de Impedancia:**

La información adquirida fue analizada mediante la generación de los gráficos de Nyquist y Bode para cada una de las probetas estudiadas. El software NOVA, del potenciostato/galvanostato Metrohm Autolab, permitió la obtención de estos gráficos, a partir de los cuales se determinaron parámetros clave como la resistencia de la capa pasiva (R_p), la capacitancia de la doble capa (C_{dl}) y la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}). Estos valores son fundamentales para evaluar la fiabilidad y la eficacia de la protección pasiva en los aceros inoxidables. [22].

Uno de los modelos más empleados es el **circuito de Randles**, compuesto por la resistencia del electrolito (RE) en serie con un circuito paralelo conformado por la resistencia a la transferencia de carga (R) y la capacitancia de la doble capa (C). Su impedancia describe un semicírculo en el diagrama de Nyquist, característico de sistemas controlados por transferencia de carga[23].

Cuando el proceso electroquímico está limitado por difusión, la impedancia presenta una dependencia con $(j\omega)^{-\frac{1}{2}}$, típica de la impedancia de **Warburg (W)**, la cual modela el transporte de especies reactivas hacia la interfaz. Existen variantes como W, O y T, que difieren en la geometría y las condiciones de difusión de reactantes y productos[23].

Para representar desviaciones del comportamiento ideal, se introduce el circuito **RE(RQ)**, donde el elemento de fase constante (Q) sustituye a la capacitancia ideal, permitiendo ajustar la respuesta del sistema. Cuando el exponente del elemento Q es $n=1$, el circuito se reduce al modelo clásico de Randles. Estos circuitos proporcionan herramientas fundamentales para el análisis de interfaces electroquímicas en estudios de corrosión y materiales[23].

2.2.3 Repetibilidad y control de calidad

Para garantizar la repetibilidad y fiabilidad de los resultados obtenidos, cada prueba se realizó por triplicado, lo que permitió evaluar la fluctuación de la información y confirmar la coherencia de los resultados.

Además, se utilizaron reactivos de grado analítico, como el cloruro sódico (NaCl) junto con agua, para la preparación de la solución con el fin de limitar la presencia de contaminantes que pudieran influir en la naturaleza de las respuestas electroquímicas. Este detalle es

fundamental para evitar impurezas que podrían alterar las propiedades de la solución y, por consiguiente, los resultados del ensayo.

Esta metodología garantiza la fiabilidad, exactitud y coherencia de la información obtenida, permitiendo una evaluación sólida de la resistencia a la corrosión de los materiales objeto de estudio.

2.3 Análisis de datos

2.3.1 Curva de polarización

Los límites electroquímicos se obtuvieron extrapolando las pendientes anódica y catódica de las curvas de polarización adquiridas en el ensayo de polarización potencioestática, tal como se observa en la figura 2.8. Esta estrategia permite obtener una evaluación exacta de la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) y del potencial de corrosión (E_{corr}), mediante el uso de las pendientes en la zona catódica y anódica las cuales a través de cálculos que emplea las ecuaciones 1.4 y 1.5 se van obteniendo los puntos y valores para la construcción de la gráfica, que son fundamentales para la evaluación de la conducta corrosiva del material.

A través de estos datos obtenidos, los cuales son descritos en la figura 2.8a, se puede hacer los cálculos con la ecuación 2.1, que es una derivación de la ecuación 1.5:

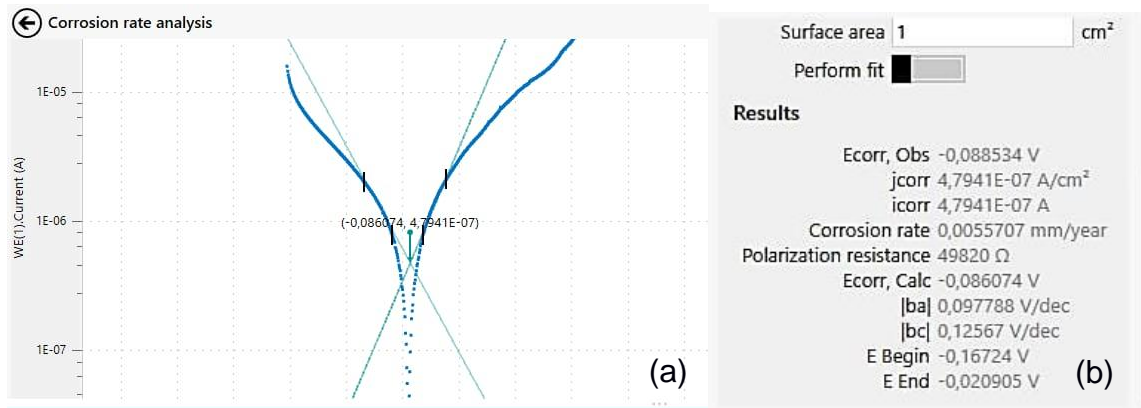
$$v_{corr} = \frac{K_c * i_{corr} * EW}{\rho} \quad (2.1)$$

Esta ecuación está compuesta por i_{corr} , K es una constante de conversión a mm/año, EW que es el peso específico calculado como en la ecuación 2.2 y ρ que es la densidad del material

$$EW = \frac{\text{Masa molar del metal}}{n} \quad (2.2)$$

Figura 2.8

Obtención de valores de densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) y del potencial de corrosión (E_{corr})



El i_{corr} se obtiene mediante la ecuación 2.3 Stern Geary la cual describe:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2.3)$$

En donde R_p es calculado por el programa, B es la constante de Stern Geary y se obtiene a través de la siguiente ecuación 2.4:

$$B = \frac{\beta_a * \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \quad (2.4)$$

Lo valores de β_a y β_c son valores obtenidos de la zonas catódica y anódica, específicamente en sus pendientes, como se observa en la figura 2.8b, entonces en base a la ecuación 2.1 y valores externos para realizar el cálculo con esta ecuación, $\rho_{AISI\ 316} = 8 \frac{g}{m^3}$ y $EW = 27.58g$. Procedemos a calcular:

$$v_{corr} = \frac{3270 * 4.7941 * 10^{-7} * 27.58}{8}$$

$$v_{corr} = 0.054 \frac{mm}{año}$$

Teniendo como resultado el valor de la velocidad de corrosión a través del uso del software y teoría fundamental de los principios de corrosión.

2.3.2 Espectros de impedancia

Los espectros obtenidos se examinaron ajustando la información experimental a un circuito comparable de Randles, que es un modelo electroquímico utilizado habitualmente para abordar la reacción de las estructuras de sustrato catódico en disposiciones electrolíticas. A través de este ajuste, se obtuvieron dos parámetros clave: la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) y el elemento de fase constante (CPE).

R_{ct} se relaciona con la facilidad con que los electrones se mueven entre el electrodo de trabajo y el medio, siendo un valor fundamental que indica la capacidad de protección del sustrato contra el medio corrosivo[15]. Por otra parte, CPE proporciona datos sobre la capacidad de la superficie expuesta para almacenar carga en la interfaz electrodo-solución, que está relacionada con las propiedades de la capa pasiva que cubre la capa exterior del material [14].

Estas cualidades, obtenidas por espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), son vitales para estudiar implícitamente la estabilidad de la capa pasiva, que actúa como un obstáculo defensivo contra la corrosión. Un R_{ct} alto y un C_{dl} bajo son característicos de una capa pasiva estable y segura frente al consumo, mientras que un R_{ct} bajo y un C_{dl} alto proponen una capa pasiva comprometida y una mayor vulnerabilidad a la corrosión [22].

Para este estudio, los datos experimentales fueron procesados y ajustados utilizando el software NOVA, que emplea el método de mínimos cuadrados no lineales (Levenberg-Marquardt) para optimizar los parámetros de los modelos de circuitos equivalentes.

La impedancia total del sistema se expresa como una función compleja expresada en la siguiente ecuación 2.5:

$$z^* = z' + jz'' \quad (2.5)$$

donde Z' es la parte real (resistencia) y Z'' es la parte imaginaria (componente reactiva del sistema).

- **Circuito de Randles y Transferencia de Carga**

En sistemas controlados por transferencia de carga, el comportamiento electroquímico se modela mediante el **circuito de Randles**, cuya impedancia se define como la ecuación 2.6:

$$z^* = R_s + \frac{R_{ct}}{1 + j\omega R_{ct} C_{dl}} \quad (2.6)$$

Donde R_s es la resistencia del electrolito, R_{ct} es la resistencia a la transferencia de carga, C_{dl} es la capacitancia de la doble capa es la frecuencia angular de la señal aplicada.

- **Elemento de Fase Constante (CPE) y Deformación Capacitiva**

Debido a heterogeneidades en la superficie y efectos de rugosidad, el comportamiento capacitivo real del sistema suele desviarse del ideal. Para modelar este efecto, C_{dl} se reemplaza por un Elemento de Fase Constante (CPE, Q)[24], cuya impedancia está dada por la ecuación 2.7:

$$Z_Q = \frac{1}{Y(j\omega)^n} \quad (2.7)$$

Donde Y es la admitancia del sistema, n ($0 < n \leq 1$) es un exponente que describe la desviación del comportamiento capacitivo ideal.

Cuando $n=1$, el CPE se comporta como un condensador ideal, recuperando el modelo clásico de Randles [24]. La impedancia total del circuito equivalente en este caso se expresa como se describe en la ecuación 2.8:

$$z^* = R_s + \frac{1}{Y(j\omega)^n + 1/R_{ct}} \quad (2.8)$$

- **Impedancia de Warburg y Limitaciones Difusionales**

Si el proceso está limitado por la difusión de cargas en la interfaz electroquímica, se incorpora la impedancia de Warburg (W)[24], caracterizada por la relación observada en la ecuación 2.9:

$$z_w = \sigma(j\omega)^{-1/2} \quad (2.9)$$

donde σ es el coeficiente de Warburg, que representa la resistencia a la difusión dentro del sistema.

2.4 Validación experimental

Se realizó un análisis comparativo con investigaciones anteriores para confirmar la coherencia de los resultados obtenidos. Asimismo, se evaluó la significancia estadística de las discrepancias entre cada una de las mediciones obteniendo los porcentajes de coeficientes de variación.

La estrategia aplicada permite una evaluación completa de la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables AISI 304 y AISI 316 en condiciones de agua salada simuladas. Los resultados obtenidos servirán de base para la planificación de propuestas especializadas en el sector camaronero.

Capítulo 3

3. Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos electroquímicos realizados para el acero AISI 304 y 316. Estos resultados representan el promedio de los valores obtenidos por cada probeta evaluada. Asimismo, se muestran los resultados de las metalografías luego de realizar estos ensayos. Datos estadísticos como el promedio de parámetros electroquímicos relevantes y sus respectivas desviaciones estándar se presentan brevemente. Los gráficos utilizados para el cálculo de los promedios se encuentran en la sección de anexos. Asimismo, se desarrolla un análisis económico que determina la viabilidad económica del proyecto. Este análisis permite evidenciar cómo la evaluación electroquímica de los materiales puede favorecer al mantenimiento predictivo, disminuyendo costos y aumentando la sostenibilidad del sector.

3.1 Resultados experimentales

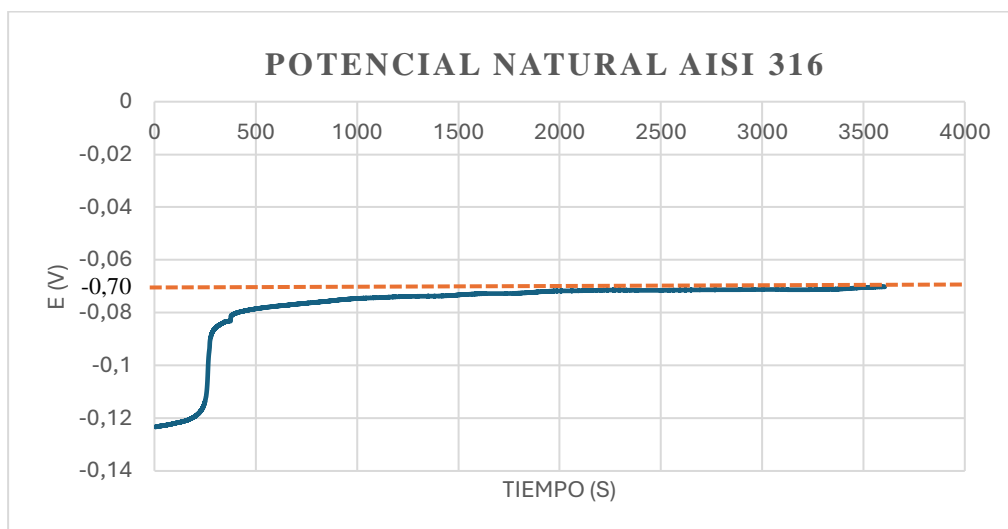
3.1.1 Potencial Natural (OCP)

Los resultados para el potencial natural de los aceros AISI 304 y AISI 316 se describen a continuación. Este análisis permitió entender el comportamiento electroquímico inicial de ambos materiales en condiciones de alta salinidad.

En la figura 3.1 se observa cómo el potencial del acero AISI 316 se va estabilizando con el tiempo. La curva con pendiente positiva indica que el material se está tratando de proteger del medio. Este comportamiento demuestra la pasivación del material que seguirá incrementando el potencial hasta estabilizarse. El estudio de Santana Hernández [25], muestra como los aceros inoxidables 304 y 316 siguen aumentando la estabilidad de su capa pasiva incluso luego de 3 semanas de estar en contacto con el medio. Luego de que el análisis haya corrido durante 1 hora, el potencial que alcanzó el AISI 316 fue de -0.07016 V.

Figura 3.1

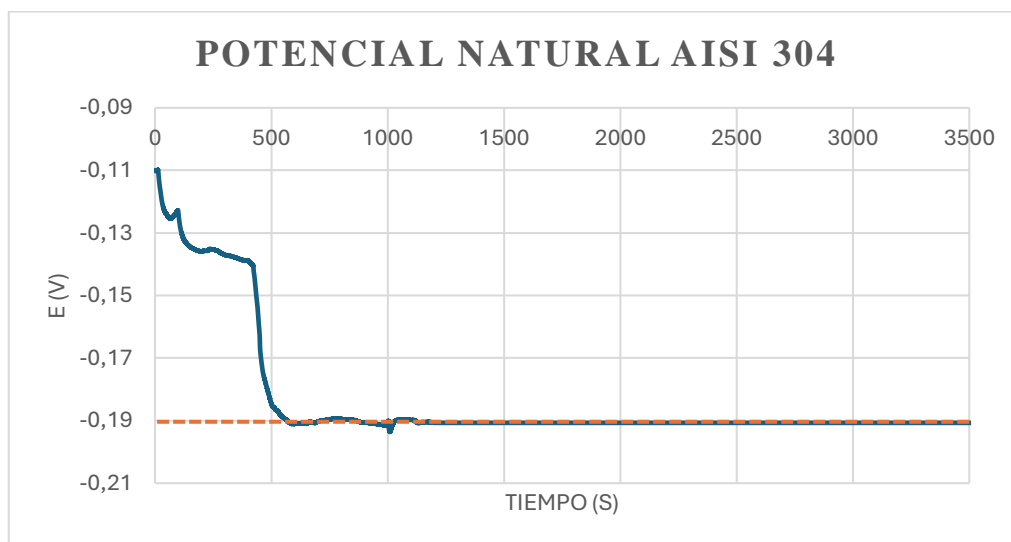
Potencial Natural del Acero AISI 316 evaluado durante 3600s (1 hora).



Por otro lado, en la figura 3.2 se encuentra el gráfico de la curva de potencial natural del AISI 304 luego de 1 hora en el medio salino. Si bien es cierto, este potencial natural parece decrecer, indicando susceptibilidad a la corrosión, el límite de tiempo juega un papel clave en este comportamiento. El estudio de Santana Hernández [25] muestra que la capa pasiva del acero AISI 304 tiende a estabilizarse luego de periodos de tiempo más largos en comparación al AISI 316. El potencial natural luego de una hora de evaluar el acero AISI 304 fue de -0.19073 V lo cual indica que existe una oxidación inicial, la cual podría deberse a la cinética lenta de la formación de la capa de óxido de cromo.

Figura 3.2

Potencial Natural del Acero AISI 304 evaluado durante 3600s (1 hora).



3.1.2 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica

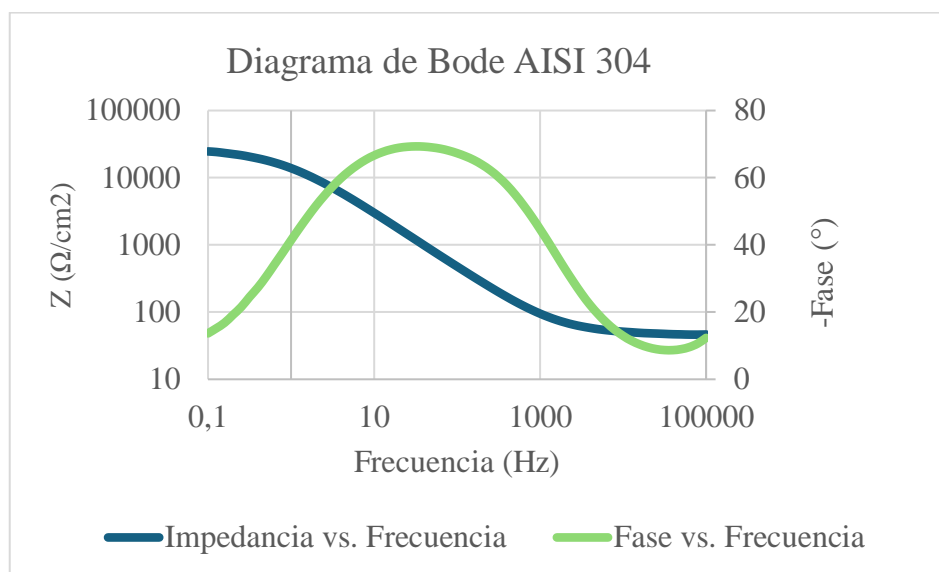
Luego de que el sustrato alcanzara el equilibrio electroquímico se obtuvieron los gráficos de espectroscopía de impedancia electroquímica. Los diagramas obtenidos luego de este ensayo son: Diagramas de Nysquit y Bode para el AISI 304 y AISI 316. Estos últimos se componen de 2 curvas: La curva de impedancia y la curva de fase en función de la frecuencia.

La figura 3.3 corresponde al diagrama de Bode del acero AISI 304. En este diagrama se pueden distinguir 3 zonas. La primera zona corresponde a las frecuencias bajas. En esta zona es donde ocurren los análisis de transferencia de carga. La figura muestra una impedancia alta en esta zona; por lo que se puede notar una resistencia a la transferencia de carga considerable. Esto podría deberse a la capa pasiva impidiendo la difusión del electrolito al sustrato. Así mismo están las fases medias y altas correspondientes al comportamiento capacitivo del sistema y la resistencia de la solución respectivamente [26]. A partir de la curva azul, se obtiene el coeficiente n , que se encuentra más adelante en el circuito de Randles. Un n mayor a 0.8 indica

que el material se comporta como un capacitor [26]. Esto se verifica observando la curva verde asociado al ángulo de fase que se obtiene a frecuencias medias. Este ángulo de fase en el máximo de la curva es aproximadamente -70° , valor que indica un n mayor a 0.8 y por lo tanto un comportamiento capacitivo, donde no ocurre difusión, indicando una capa pasiva que evita la transferencia de carga [27].

Figura 3.3

Diagrama de Bode del acero inoxidable AISI 304.

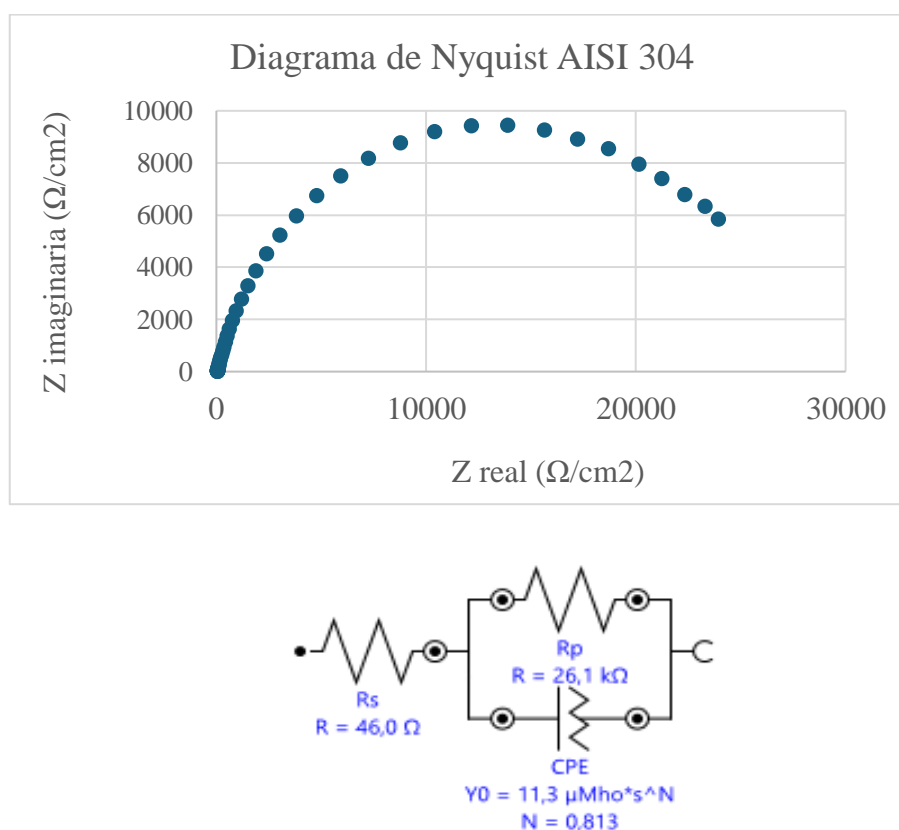


Asimismo, en el diagrama de Nyquist para el acero inoxidable AISI 304 mostrado en la figura 3.4 se muestra un comportamiento característico de un material pasivado en un medio corrosivo [27]. La intersección inicial en el eje Z' refleja la resistencia del electrolito R_{sol} , mientras que el arco semicircular indica la resistencia a la transferencia de carga R_{ct} , que está asociada con la estabilidad de la capa pasiva formada sobre la superficie del material [27]. En esta figura también se encuentra el circuito equivalente de Randles asociado a este espectro. Entre los datos a tomar en cuenta observamos que la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) descrita en el software NOVA como R_p tiene un valor de 26100 ohmios. Esto demuestra una

gran resistencia del sustrato a interactuar con el medio[27]. Del mismo modo, se observa una n de 0.813. Como se mencionó anteriormente esto indica un comportamiento capacitivo del material, sin llegar a ser un capacitor perfecto. Esto demuestra buenas propiedades de la capa pasiva, al no permitir que la velocidad de la reacción esté controlada por la difusión de masa del electrolito hacia el sustrato [26].

Figura 3.4

Diagrama de Nyquist del acero inoxidable AISI 304 y su circuito equivalente de Randles.

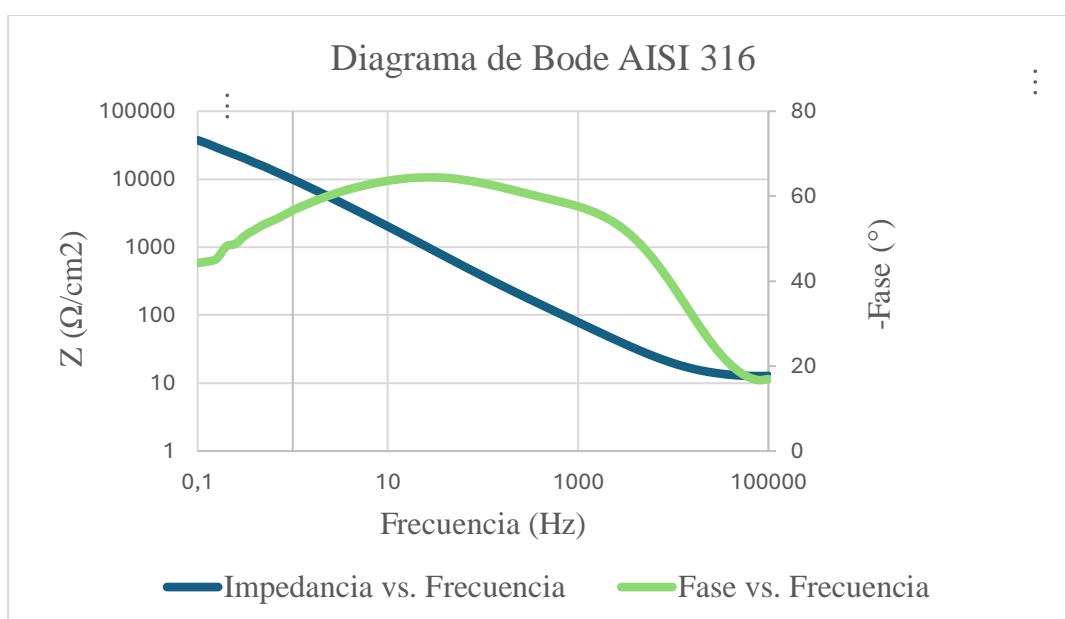


Asimismo, en la figura 3.5 se muestra el diagrama de Bode del AISI 316, el cual, a frecuencias bajas, muestra una impedancia cercana a los 60000 ohmios. Esto indica que el material presenta una resistencia a la transferencia de carga mayor que la del acero AISI 304[14]. Al analizar la curva azul se puede apreciar una sola pendiente, lo que indica que solo está

ocurriendo un proceso en la superficie del acero [28]. El proceso que está ocurriendo puede ser inferido con la curva de fase donde se observa que alcanza un máximo de -65° aproximadamente. Este valor indica un comportamiento menos capacitivo que el anterior, lo que significa presencia de difusión en el mecanismo electroquímico [27].

Figura 3.5

Diagrama de Bode del acero inoxidable AISI 316.

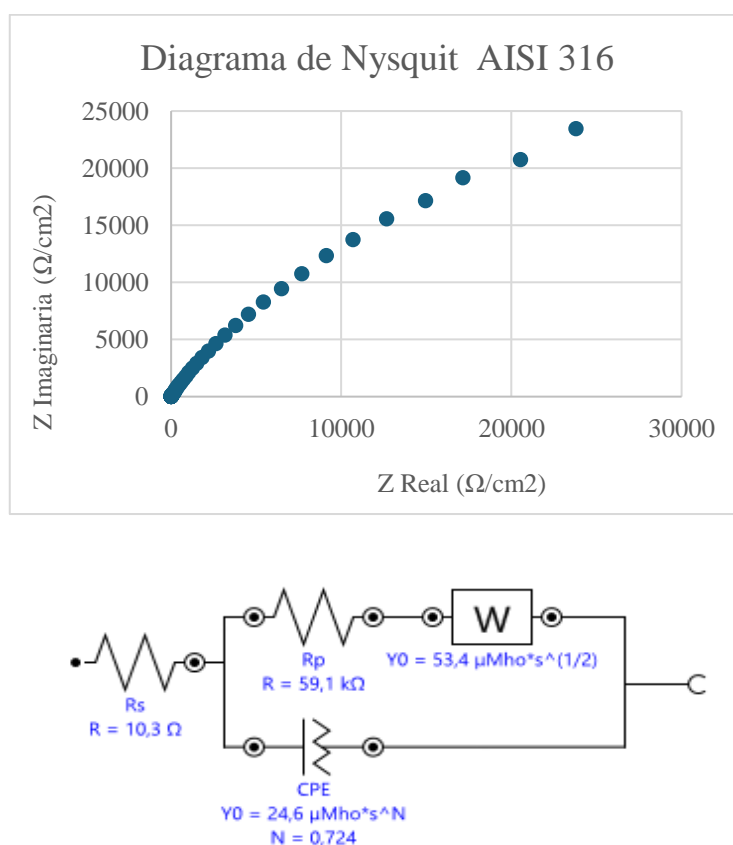


Esto se puede confirmar en el diagrama de Nyquist y el circuito de Randles asociado al acero AISI 316 presentado en la figura 3.6. Primera cosa para tener en cuenta es una curva más pronunciada que en el gráfico del acero 304, lo que indica una resistencia a la transferencia de carga mayor y por ende una mayor resistencia a la corrosión [27]. En el circuito de Randles se observó la aparición de una impedancia de Warburg muy pequeña, que indica una pequeña difusión, lo cual se mencionó anteriormente. Esta difusión se da cuando el proceso de transporte de masa limita las reacciones electroquímicas [27].

Al observar una mayor resistencia a la corrosión en los aceros AISI 304 y 316, se puede inferir que la difusión en el mecanismo de corrosión implica la transferencia de productos pasivados desde la interfaz entre la zona expuesta de la muestra y el medio, hacia el entorno salino, en lugar de indicar un deterioro de la capa pasiva. En el caso del acero AISI 316, estos productos de pasivación son óxidos mixtos de cromo molibdeno $Cr_xMo_yO_z$ [29].

Figura 3.6

Diagrama de Nyquist del acero inoxidable AISI 316 y su circuito equivalente de Randles.



En la tabla 3.1 se muestra una compilación de los resultados de EIS. En el trabajo elaborado por Torres Acosta et al. [30], se indica que, para aceros inoxidables pasivados, el CPE debería estar en un rango entre $1 - 4 \mu F/cm^2$, sin embargo, en el mismo estudio, los aceros inoxidables activos estaban en un rango entre 20 y $65 \mu F/cm^2$. Con este acercamiento, podemos

inferir que para los valores obtenidos de 8.91 y 17 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ para acero 304 y 316 respectivamente, demuestran que el acero no está completamente pasivado, pero si está presentando cierta protección en el medio [30]. Para entender esto de mejor manera se mostrarán los resultados de polarización potencioestática en el siguiente apartado.

Tabla 3.1

Resumen de resultados relevantes del EIS para ambos tipos de acero.

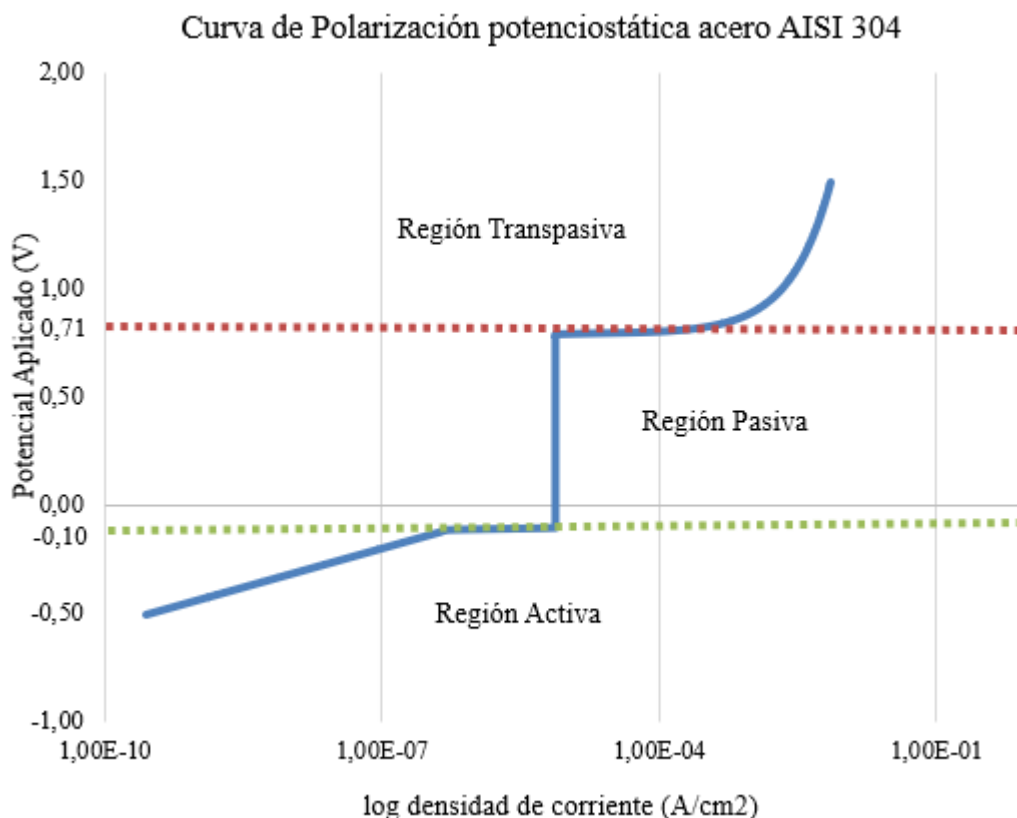
Parámetro Electroquímico	AISI 304	AISI 316
Resistencia a la solución (Rs)	46.0 Ω/cm^2	10.29 Ω/cm^2
Resistencia a la transferencia de carga (Rct)	26100 Ω/cm^2	59100 Ω/cm^2
Elemento de fase de equilibrio (CPE)	8.91 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$	17 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$
Desviación de capacitividad ideal (n)	0.813	0.724

3.1.3 Polarización potencioestática

Los resultados de polarización potencioestática se muestran en la figura 3.7 para el acero AISI 304 y en la figura 3.8 para el acero AISI 316. El análisis de la figura 3.7 muestra 3 regiones marcadas que determinan el comportamiento electroquímico del material a diferentes potenciales. Como se observa en el gráfico, la región por debajo de la línea verde punteada muestra una pendiente positiva, que muestra la dilución del metal hacia el medio antes de la formación de una capa pasiva. Esto indica que el acero 304 es más susceptible a interactuar con el medio, por lo que su capa pasiva es menos efectiva en soluciones salinas al 3.5% [31]. Sin embargo, al alcanzar potenciales de -0.1 V, comienza la región pasiva, donde el material se protege del medio [31]. Cuando el acero AISI 304 alcanza un voltaje de aproximado de 0.8V empieza otra región denominada región transpasiva [31]. En esta región ocurre la ruptura de la capa pasiva y, por ende, empieza la corrosión localizada [31].

Figura 3.7

Curva de polarización potencioestática del acero AISI 304 en solución salina al 3.5%.

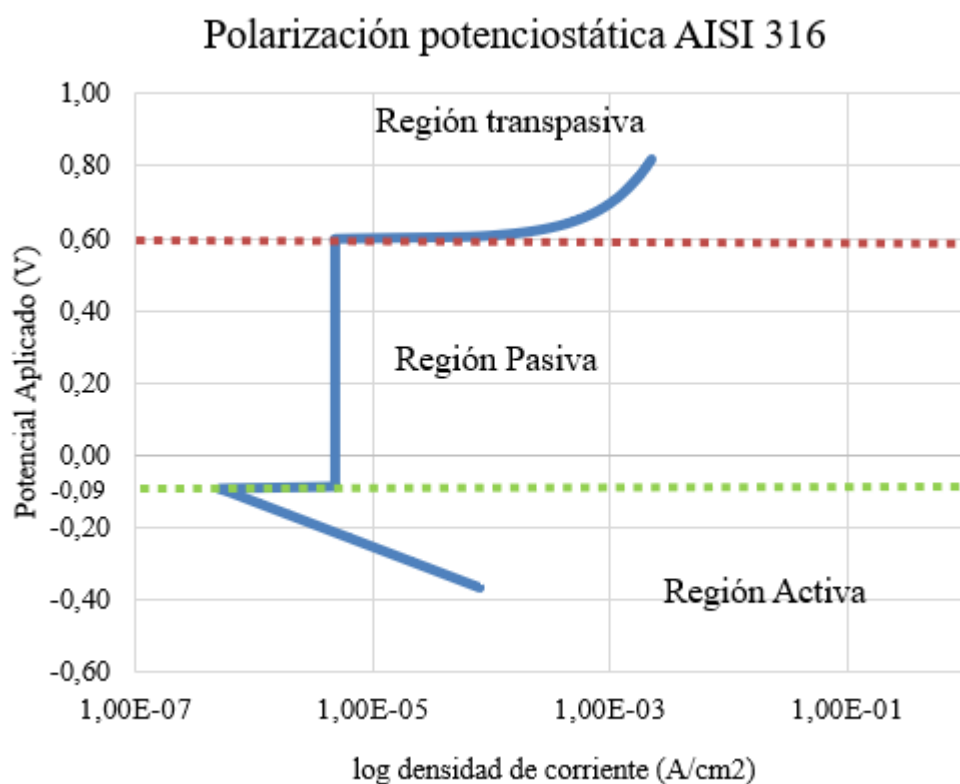


Por otro lado, en la curva de polarización potencioestática del acero AISI 316 observamos un comportamiento inusual en su región de activación. Este comportamiento de retroceso se debe a un fenómeno llamado pasivación inicial [31]. Esto ocurre cuando la formación de la capa pasiva está ocurriendo parcialmente antes de iniciar el ensayo, reduciendo progresivamente la densidad de corriente y por ende las reacciones de oxidación [7]. Esto hace que la densidad de corriente de corrosión i_{corr} sea menor y por ende, la velocidad de corrosión sea menor [7]. Por otro lado el inicio de la región transpasiva es bajo tanto en este acero como en el acero AISI 304, donde se puede observar que la región transpasiva inicia a 0.6 y 0.8V respectivamente. Esto es inusual, puesto que estudios indican una región de transpasivación para estos aceros por encima de 0.71V [32]. Este comportamiento indica una capa pasiva comprometida de las probetas de

acero AISI 316 incluso antes de realizar los ensayos. Un comportamiento transpasivo bajo señala dificultades para mantener la capa pasiva en el material [33]. En un acero 316 esto puede pasar por la presencia de carburos de cromo o molibdeno en los bordes de grano [33]. El contenido efectivo de molibdeno un poco inferior al normado en la tabla 2.2 indicaría formación de carburos por algún tratamiento térmico previo.

Figura 3.8

Curva de polarización potenciostática del acero AISI 316 en solución salina al 3.5%.



A pesar de esto, los resultados de la tabla 3.2 muestran resultados bastante cercanos a la bibliografía, donde la velocidad de corrosión de estos aceros varía entre 0.004 a 3.46 mm/año [34]. Esto debido a que la velocidad de corrosión se relaciona directamente con la región activa y no con la región transpasiva [7]. La pequeña diferencia entre ambas velocidades de corrosión también está respaldada por literatura científica, donde la velocidad de corrosión de ambos aceros se encuentra dentro del mismo orden de magnitud [34].

Además, los resultados obtenidos en los ensayos con los aceros inoxidable AISI 304 y 316 muestran una baja velocidad de corrosión, confirmando su idoneidad para ambientes salinos como los de la industria camaronera. En contraste, el acero al carbono ha demostrado en estudios previos una corrosión acelerada en estas condiciones. Se ha reportado que, sin el uso de inhibidores, la velocidad de corrosión del acero al carbono puede alcanzar 0.4901 mm/año [35], un valor considerablemente superior al registrado en nuestros ensayos con aceros inoxidables. Esta diferencia resalta la ventaja del AISI 304 y 316 en términos de durabilidad y resistencia a la corrosión, ya que el acero de bajo carbono no solo compromete la integridad estructural de las infraestructuras en contacto con agua salina [35], sino que también puede generar problemas ambientales debido a la liberación de productos de corrosión en el medio de cultivo.

Tabla 3.2

Resultados obtenidos de las curvas potencioestáticas para cada tipo de acero.

Parámetro electroquímico	AISI 304	AISI 316
Velocidad de corrosión	8.54×10^{-3} mm/año	5.57×10^{-3} mm/año
Resistencia a la polarización	$35444 \Omega/cm^2$	$49820 \Omega/cm^2$
I_{corr}	7.35×10^{-7}	4.79×10^{-7}

3.2 Validación de resultados

Como se mencionó anteriormente, cada una de las mediciones mostradas anteriormente son el promedio de 3 muestras individuales. En la tabla 3.3 se muestran los resultados por cada muestra, obtenidos de cada una de las gráficas presentadas en los anexos.

Tabla 3.3

Resultados por cada muestra evaluada.

Parámetro Electroquímico	AISI 304 - Muestra 1	AISI 304 - Muestra 2	AISI 304 - Muestra 3	AISI 316 - Muestra 1	AISI 316 - Muestra 2	AISI 316 - Muestra 3
Velocidad de corrosión (mm/año)	8.50E-03	8.60E-03	8.53E-03	5.57E-03	5.58E-03	5.56E-03
Resistencia a la polarización ($\Omega * cm^2$)	3.544E+04	3.545E+04	3.545E+04	4.982E+04	4.982E+04	4.982E+04
$I_{corr} (\frac{A}{cm^2})$	7.34E-07	7.35E-07	7.36E-07	4.78E-07	4.79E-07	4.80E-07
Resistencia a la solución, R_s ($\Omega * cm^2$)	4.58E+01	4.62 E+01	4.60 E+01	1.025E+01	1.03E+01	1.032E+01
Resistencia a la transferencia, R_{ct} ($\Omega * cm^2$)	2.600E+04	2.620E+04	2.610E+04	5.905E+04	5.915E+04	5.910E+04
CPE ($\mu F \cdot cm^{-2} \cdot s^{n-1}$)	8.89	8.93	8.91	16.9	17.1	17
N	0.812	0.814	0.813	0.723	0.725	0.724

La tabla 3.4 muestra los parámetros estadísticos calculados a partir de estos datos, donde se puede observar que la media corresponde a los valores previamente estudiados en las tablas 3.1 y 3.2. En esta tabla, se presenta el coeficiente de variación de las mediciones del acero AISI 304. Este valor indica el porcentaje de variación de las mediciones con respecto a la media. Todos los valores se encuentran por debajo del 1%, demostrando similitud en cada una de las mediciones. Esto se evalúa de acuerdo con la norma ASTM E691 que establece que mediciones aceptables corresponden a un CV inferior al 0.5% [36].

Tabla 3.4

Obtención de parámetros estadísticos en los resultados del acero AISI 304.

Parámetro Electroquímico	AISI 304 - Media (μ)	AISI 304 - σ	AISI 304 - σ^2	AISI 304 - CV (%)
---------------------------------	--	---------------------------------------	---	--------------------------

Velocidad de corrosión (mm/año)	0.0085427	0.0000416	1.73E-09	0.49%
Resistencia a la polarización (Ω)	35444	0.816	0.666	0.0023%
I_{corr} (A/cm ²)	7.35E-07	8.16E-09	6.66E-17	0.0011%
Resistencia a la solución (Rs) (Ω)	46	0.2	0.04	0.43%
Resistencia a la transferencia (Rct) (Ω)	26100	81.65	6666.66	0.31%
CPE (μ F/cm ²)	8.91	0.016	0.00026	0.18%
N	0.813	0.00082	6.66E-07	0.10%

Asimismo, la tabla 3.5 presenta el coeficiente de variación de las mediciones del acero AISI 316. Estos valores tampoco superan el 1% demostrando la validez de los resultados [36].

Tabla 3.5

Obtención de parámetros estadísticos para acero AISI 316.

Parámetro Electroquímico	AISI 316 - Media (μ)	AISI 316 - σ	AISI 316 - σ^2	AISI 316 - CV (%)
Velocidad de corrosión (mm/año)	0.0055707	0.0000072	5.18E-11	0.13%
Resistencia a la polarización (Ω)	49820	0.816	0.666	0.0016%
Icorr (A/cm ²)	4.79E-07	8.16E-09	6.66E-17	0.0017%
Resistencia a la solución (Rs) (Ω)	10.29	0.035	0.0012	0.34%
Resistencia a la transferencia (Rct) (Ω)	59100	40.82	1666.66	0.07%

CPE ($\mu\text{F}/\text{cm}^2$)	17	0.082	0.0067	0.48%
N	0.724	0.00082	6.66E-07	0.11%

3.3 Análisis económico

En la tabla 3.6 se presentan los costos asociados al utilizar un potencióstato en la evaluación de materiales dentro de la industria camaronera. Esto es una aproximación para un tiempo de 5 años, pero la inversión podría ser mayor según el tipo de potencióstato, los materiales a evaluar, la cantidad de energía que utilice el equipo y el personal operativo.

Tabla 3.6

Costos asociados a la evaluación electroquímica en medios salinos utilizando un potencióstato/galvanostato con proyección a 5 años.

Inversión inicial para los primeros 5 años		
Mano de obra al año	12.000,00	60.000,00
Potencióstato	20.000,00	20.000,00
Electrodos de referencia	127,71	638,55
Contraelectrodo de platino	197,97	989,85
Cloruro de potasio	20,00	100,00
Licencia del software	2.000,00	2.000,00
Vasos de precipitación	50,00	250,00
Resina Epóxica	65,00	325,00
Total	34.460,68	84.303,40
	1 año	5 años

Ahora bien, según la asociación para la protección y rendimiento de materiales AMPP, las pérdidas causadas por corrosión dentro de industrias expuestas a salinidad equivalen al 5% del ingreso bruto anual del país [37]. Según datos de la Corporación Financiera Nacional [38] en 2023 la industria camaronera reportó ingresos por 7.25 mil millones de dólares, de los cuales,

solo en Durán, se reportaron ingresos de 721 millones de dólares [39]. Para realizar el presente análisis económico, se tomará en cuenta una empresa camaronera mediana que requiere utilizar las pruebas electroquímicas para reducir sus costos por corrosión. Utilizando datos de la Superintendencia de compañías, bienes y valores, esta empresa mediana genera aproximadamente 217.1 millones de dólares anuales[40] . En estos mismos datos se observó que los costos por mantenimientos y reparaciones llegan a ser de 4.3 millones de dólares, de los cuales, el 10% corresponde a pérdidas por corrosión. El AMPP destaca que la implementación de evaluaciones sobre los materiales implementados en industrias corrosivas puede reducir los costos asociados a la corrosión en un 10 – 35% [41]. De este modo, la tabla 3.7 muestra los datos calculados de las pérdidas por corrosión y los ahorros potenciales.

Tabla 3.7

Estimación de los ahorros potenciales en una empresa camaronera que genera 217.1 millones de dólares anuales.

Ingresos Netos	217.108.476,00
Mantenimientos y reparaciones	4.375.485,00
Perdidas por corrosión	437.548,50
Ahorros Potenciales	43.754,85

Como se observa en la tabla 3.7, los ahorros potenciales anuales serían de 43.754,85 dólares, lo que indica una recuperación rápida de la inversión inicial. De hecho, el periodo de retorno de la inversión sería de tan solo 2 años como se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8

Flujo neto, acumulado y recuperación de la inversión.

	Inversión	Flujo de caja (Ingreso)	Flujo neto	
Año 1	-84.303,40	43.754,85	-40.548,55	
Año 2	-40.548,55	43.754,85	3.206,30	Recuperado

En vista de que la inversión inicial cubrirá los primeros 5 años del proyecto, el análisis económico requiere el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) proyectado a 5 años. Este valor indica el beneficio real que se obtiene luego de un periodo, tomando en cuenta factores económicos como la inflación. El VAN del proyecto es de 81,561.91 dólares y su cálculo detallado se encuentra en el apéndice D. Los resultados resumidos del análisis económico se presentan en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9

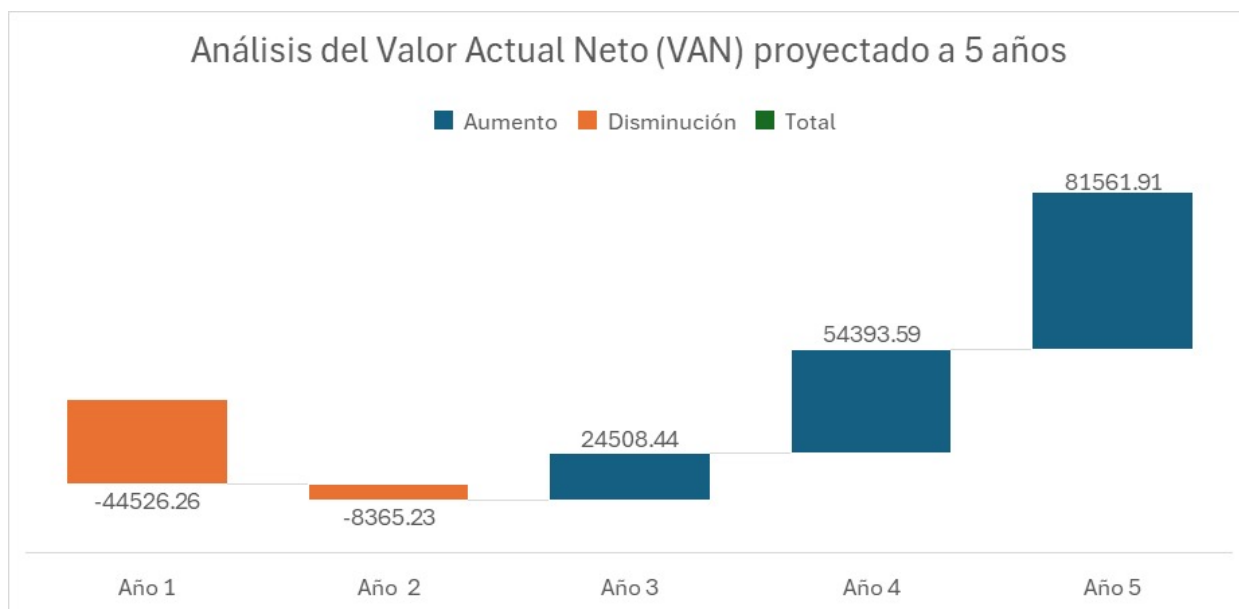
Resumen de resultados del análisis económico.

Ingresos Anuales (USD)	Valor Actual Neto (VAN)	Periodo de retorno de inversión (PRI)
217.108.475	81.561,91	2 años

La tabla 3.9 confirma la viabilidad económica del proyecto, mostrándolo como una solución altamente rentable para afrontar los problemas de corrosión en el sector de la acuicultura. La figura 3.9 esquematiza la transición del valor actual neto en el tiempo, partiendo desde la inversión inicial. En esta figura se puede ver, que tomando en cuenta la inversión inicial y factores económicos como la inflación, el flujo de caja positiva se alcanzaría en el año 3.

Figura 3.9

Análisis del valor actual neto (VAN) proyectado a 5 años en una empresa camaronera mediana del sector de Durán.



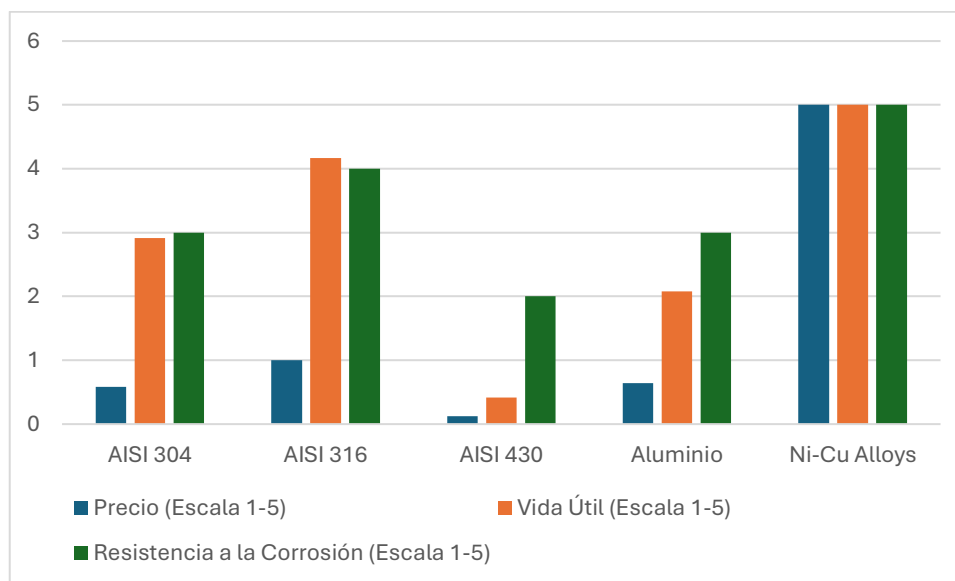
3.3.1 Optimización en la selección de materiales

La selección adecuada de materiales en el diseño mecánico se puede describir como un proceso en el que se establecen restricciones que los materiales deben cumplir y objetivos que se deben maximizar o minimizar [42]. En el ámbito del sector camaronero, la principal restricción para los materiales es que deben ser resistentes a la corrosión [7]. Para evaluar esta propiedad de manera objetiva, se implementó una metodología basada en la ponderación de materiales, la cual permite clasificar los materiales según su desempeño en entornos corrosivos[43].

Esta clasificación se realizó utilizando datos obtenidos de fuentes especializadas, como MakeItFrom. Por ello, la evaluación individual de cada material mediante la metodología implementada es vital para obtener datos reales de los materiales candidatos. Con base a estos valores, se pueden obtener gráficos como el desarrollado en la figura 3.10, facilitando la selección de materiales más adecuados para la aplicación en entornos altamente corrosivos[43].

Figura 3.10

Comparativa de distintos materiales resistentes a la corrosión.



Nota. Datos tomados de MakeItFrom

La figura 3.10 muestra tres parámetros: resistencia a la corrosión, vida útil y precio en escalas del 1 al 5. Los ensayos electroquímicos permiten obtener resultados reales para obtener tablas donde se puedan comparar propiedades estáticas con propiedades variables y así mejorar la selección de materiales. En las empresas, siempre se requiere minimizar costos. En base a lo dicho previamente, y a los datos de la figura 3.10, el AISI 304 muestra el mejor rendimiento costo-beneficio en comparación a los demás materiales. Por otro lado, si la industria camaronera quisiera disminuir peso, y aun así mantener la restricción de resistencia a la corrosión, debería caracterizar los materiales de la tabla mediante pruebas electroquímicas, y luego comparar las densidades de cada material evaluado[43]. Según los datos teóricos de la figura 3.10, el aluminio se perfilaría como una posible opción ante esta configuración.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

Este capítulo expone las conclusiones del estudio y las recomendaciones propuestas, fundamentadas en las áreas de mejora identificadas.

4.1. Conclusiones

- Se concluye que la metodología implementada es una herramienta eficaz para evaluar el comportamiento corrosivo de diferentes materiales metálicos en ambientes salinos característicos de la industria camaronera en Ecuador. Su aplicación nos guía a una producción más sostenible y eficiente, al tiempo que permite optimizar los costos de mantenimiento asociados a la producción.
- Los resultados experimentales evidenciaron un rendimiento superior del acero inoxidable AISI 316 en términos de durabilidad frente a ambientes salinos, en comparación con el acero inoxidable AISI 304. Este comportamiento se destacó al aplicar la metodología desarrollada, demostrando que el AISI 316 es óptimo para las exigencias del sector camaronero debido a su mayor resistencia a la corrosión.
- El estudio permitió obtener curvas electroquímicas de los aceros inoxidables más utilizados en la industria camaronera, así como un análisis complementado con los parámetros evaluados como la espectroscopia de impedancia electroquímica y la polarización potencio dinámica. Estas, al compararse, demostraron su relevancia en la caracterización de los procesos de corrosión, ofreciendo información pertinente para comprender fenómenos electroquímicos complejos y evaluar el desempeño de los materiales frente a condiciones de servicio específicas.
- Las significativas pérdidas económicas que puede sufrir la industria camaronera debido a la corrosión en aceros inoxidables pueden reducirse a través de la aplicación de estudios electroquímicos, como los analizados en este proyecto, los cuales permiten identificar y

evaluar de manera precisa el comportamiento de estos materiales frente a condiciones específicas de servicio.

- El acero inoxidable AISI 304 demostró en bases teóricas tener una relación costo-beneficio mayor al acero AISI 316, no obstante, el acero AISI 316 presenta mejor resistencia a la corrosión que el acero AISI 304.

4.2. Recomendaciones

- Antes de realizar ensayos electroquímicos en aceros inoxidables, se recomienda realizar ensayos de microscopía electrónica de barrido (SEM) para confirmar la presencia de carburos en los bordes de grano, lo que puede afectar los resultados de los ensayos.
- Se recomienda utilizar dos o más probetas de testigo para las evaluaciones del ensayo óptico. Esto permitirá contar con un respaldo en caso de una mala práctica durante el ataque químico que pueda generar rayones o quemaduras en la pieza, comprometiendo la calidad del sustrato para su análisis en el microscopio. De este modo, se garantiza la preservación de información crucial, especialmente si se desea estudiar la corrosión intergranular por presencia de carburos, en caso de realizarse metalografías.
- Para futuras investigaciones, se recomienda incluir un ensayo de ruido electroquímico (EN), el cual permite monitorear en el sitio las estructuras sumergidas, obteniendo, a través de fluctuaciones espontáneas de corriente, datos en tiempo real del inicio de los mecanismos de corrosión localizada.
- Del mismo modo, se recomienda realizar ensayos de polarización cíclica, para analizar potenciales de repasivación y de esta manera tener una visión más clara de la factibilidad del material luego de alcanzar etapas de transpasivación.

- Durante el desbastado inicial de la superficie, se recomienda emplear un refrigerante para evitar el sobrecalentamiento del sistema metal-resina. Esto previene filtraciones de resina causadas por el calor en los bordes de contacto con el metal, las cuales podrían comprometer el aislamiento de la cara superficial y afectar las lecturas del ensayo.

Bibliografía

- [1] C. A. Rimbaldo Luzon, E. C. Prado Carpio, C. A. Valarezo Macías, and H. R. Carvajal Romero, “Análisis de la Producción y Exportación del Sector Camaronero en Ecuador,” *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, no. 1, pp. 6682–6695, Mar. 2024, doi: 10.37811/cl_rcm.v8i1.10028.
- [2] V. Reyes, “Análisis del sector camaronero y su participación en el crecimiento económico del Ecuador, periodo 2013-2017.,” U.G., Guayaquil, 2019.
- [3] The World Bank, “Exports of goods and services (% of GDP) – Ecuador.” Accessed: Feb. 01, 2025. [Online]. Available: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NE.EXP.GNFS.ZS?end=2023&locations=EC&start=1960>
- [4] K. Jauregui-Coto, L. Veleva, G. I. Bolio-López, and D. A. López-Sauri, “Ciencia y Tecnología,” 2013.
- [5] D. M. Calixto Gómez, “APLICACIÓN DE UN ANÁLISIS DE BRECHAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE CORROSIÓN EN UNA PLANTA DE HIDROCARBUROS,” UPTC, Tunja, 2021.
- [6] J. A. Salazar-Jiménez, “Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica),” *Tecnología en Marcha*, vol. 28, no. 3, pp. 127–36, Apr. 2015.
- [7] D. A. Jones, *Principles and prevention of corrosion*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1996.
- [8] I. Zekos, K. McMeekin, and M. M. Stack, “On the Effect of Pre-formed Scales in Mitigating Corrosion of Steels in CO₂ Environments,” *J Bio Tribocorros*, vol. 6, no. 2, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1007/s40735-020-00347-w.
- [9] A. Shokri and M. Sanavi Fard, “Corrosion in seawater desalination industry: A critical analysis of impacts and mitigation strategies,” Nov. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135640.
- [10] J. A. López García, L. Veleva, G. I. Bolio-López, and D. A. López-Sauri, “Primeras etapas de corrosión de metales en agua de mar Cobre,” *Ciencia y Tecnología*, pp. 35–43, Oct. 2013.

- [11] S. Dula, T. A. Ajayeoba, and O. A. Ijabadeniyi, “Bacterial biofilm formation on stainless steel in the food processing environment and its health implications,” Jun. 01, 2021, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s12223-021-00864-2.
- [12] J. González-Masís and L. Garita-Arce, “Corrosion rate evaluation of the carbon steel trough electrochemical techniques,” *Tecnología en Marcha*, vol. 27, no. 1, pp. 13–22, Aug. 2013.
- [13] I. Ahmad, A. Abu Seman, and A. A. Mohamad, “Investigation of anodic dissolution behaviour of intermetallic compound in Sn-3Ag-0.5Cu solder alloy by cyclic voltammetry,” *Soldering and Surface Mount Technology*, vol. 31, no. 4, pp. 211–220, Aug. 2019, doi: 10.1108/SSMT-10-2018-0035.
- [14] C. Montella, “Voigt circuit representation model for electrochemical impedances under finite-length diffusion conditions,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 879, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jelechem.2020.114785.
- [15] S. Ahmad and M. Egilmez, “Battery testing methods in fuel cell research,” *arXiv preprint arXiv:2209.14541*, 2022.
- [16] ASTM International, “ASTM A240/A240M-23a: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications,” West Conshohocken, PA, USA, 2023.
- [17] “XVI-TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS INOXIDABLES.” doi: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/16-_TT_aceros_inoxidables_v2.pdf.
- [18] “INTRODUCCIÓN EN ACEROS INOXIDABLES,” <https://inoxidable.com/demo/informacion.html>.
- [19] ASTM International, “ASTM G1-03(2022): Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens,” West Conshohocken, PA, USA, 2022.
- [20] F. Scholz and T. Kakiuchi, *Salt Bridges and Diaphragms*. 2013. doi: 10.1007/978-3-642-36188-3_4.
- [21] ASTM International, “ASTM G59-23: Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements,” West Conshohocken, PA, USA, 2023.
- [22] ASTM International, “ASTM G106-89(2023): Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements,” West Conshohocken, PA, USA, 2023.

- [23] U. P. Morales, N. Profesor, J. Jairo, and O. Flórez, "IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA INTERPRETACIÓN DE DIAGRAMAS TÍPICOS CON CIRCUITOS EQUIVALENTES," *Dyna (Medellin)*, vol. 77, no. 164, pp. 69–75, 2009.
- [24] U. P. Morales, Á. M. Camargo, and J. J. O. Flórez, "Impedancia electroquímica-interpretación de diagramas típicos con circuitos equivalentes," *DYNA (Colombia)*, vol. 77, no. 164, pp. 69–75, 2010.
- [25] F. Javier Santana Hernández, "Estudio comparativo de la corrosión microbiológica de acero inoxidable en agua de mar," 2011.
- [26] C. López Meléndez, "OBTENCIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DE ACERO INOXIDABLE 304 Y SU CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA," Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV), Chihuahua, 2012.
- [27] U. P. Morales, N. Profesor, J. Jairo, and O. Flórez, "IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA INTERPRETACIÓN DE DIAGRAMAS TÍPICOS CON CIRCUITOS EQUIVALENTES," *Dyna (Medellin)*, vol. 77, no. 164, pp. 69–75, Sep. 2009.
- [28] W. Sánchez, M. Palomar, and J. Uruchurtu, "EVALUACION DEL GRADO DE SENSITIZADO DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304 MEDIANTE LA TECNICA DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA," 2012. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/380320551>
- [29] J. Luis Polo, C. Luz Torres, E. Cano, and J. María Bastidas, "Estudio de impedancia de la corrosión del acero inoxidable AISI 316L en las regiones pasiva y de picadura^ An impedance study on corrosión of AISI 316L stainless steel in the passive and pitting regions," 1999. [Online]. Available: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>
- [30] A. A. Torres Acosta, J. T. Pérez Quiroz, J. A. Rentarías Ramírez, and M. M. Madrid, "ESTUDIO DE LA CORROSIÓN EN BARRAS DE ACERO INOXIDABLE EN CONCRETO CONTAMINADO POR CLORUROS CUANDO SE LE APLICAN ESFUERZOS RESIDUALES," 2006.
- [31] M. Prazak, "Evaluation of Corrosion-Resistant Steels Using Potentiostatic Polarization Curves," *National Association of Corrosion Engineers*, vol. 19, no. 3, pp. 75–80, Mar. 1963.
- [32] S. Supelano García, "EVALUACIÓN DE CAPA PASIVA EN ACEROS INOXIDABLES MEDIANTE CURVAS DE POLARIZACIÓN Y ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA," Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, 2018.

- [33] C. José Rodríguez, Y. Figueroa, and J. Prin, “EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL COMPORTAMIENTO DEL ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO 316L FRENTE A LA CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA EFFECT OF TEMPERATURE ON THE BEHAVIOR OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL 316 L EXPOSED TO ELECTROCHEMICAL CORROSION,” vol. 25, pp. 302–308, 2013.
- [34] A. S. Román, C. M. Méndez, and A. E. Ares, “Evaluación de la velocidad de corrosión de aceros inoxidable en biodiesel de soja utilizando diferentes técnicas,” *RECyT*, vol. 20, no. 29, pp. 27–34, 2018.
- [35] A. Y. Kina and J. A. C. Ponciano, “Inhibition of carbon steel CO₂ corrosion in high salinity solutions,” *Int J Electrochem Sci*, vol. 8, no. 12, pp. 12600–12612, 2013, doi: 10.1016/s1452-3981(23)13292-5.
- [36] ASTM International, “ASTM E691-21: Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method,” West Conshohocken, PA, USA, 2021.
- [37] “What is Corrosion,” <https://www.ampp.org/technical-research/what-is-corrosion>.
- [38] Corporación Financiera Nacional, “Ficha Sectorial del Camarón.” Accessed: Jan. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/2024/07/Ficha-Sectorial-Camar%C2%A2n.pdf>
- [39] J. K. Flores Jiménez, “Análisis del impacto financiero del sector camaronero de Durán durante la pandemia COVID-19,” Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2019. Accessed: Jan. 26, 2025. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17010>
- [40] S. de A. de P. y Servicios, “Ficha Sectorial,” 2024, [Online]. Available: <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/2024/07/Ficha-Sectorial-Camarçn.pdf>
- [41] NACE International, “International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technology (IMPACT) Study.,” 2016. Accessed: Jan. 26, 2025. [Online]. Available: <https://impact.nace.org/documents/Executive-Summary.pdf>
- [42] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2016.
- [43] “Material Properties Database,” <https://www.makeitfrom.com/>.

APÉNDICES

APÉNDICE A. Resultados de evaluación de potencial natural a las muestras de aceros AISI 304 y AISI 316, evaluados en un periodo de 1 hora.

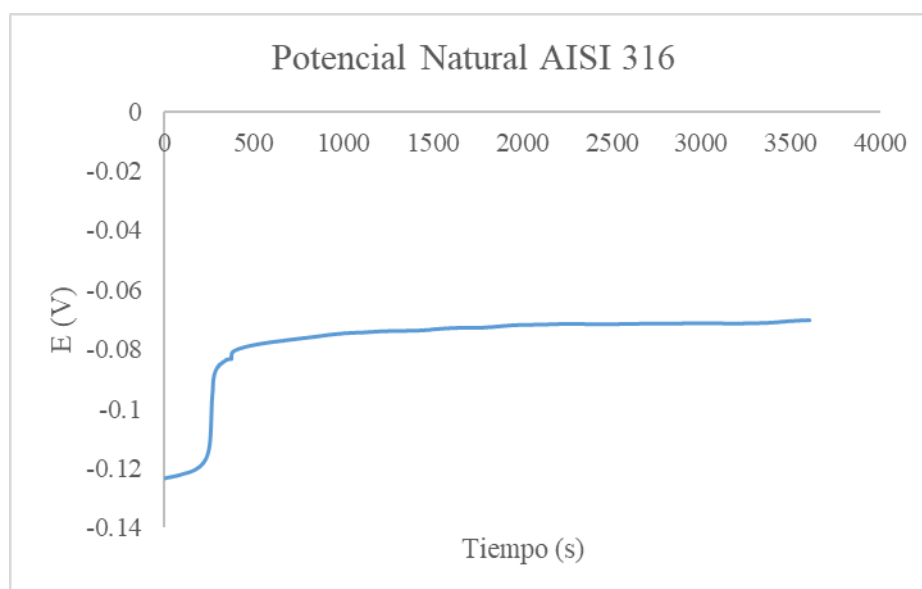


Figura A.1 Potencial Natural 316 – muestra 1

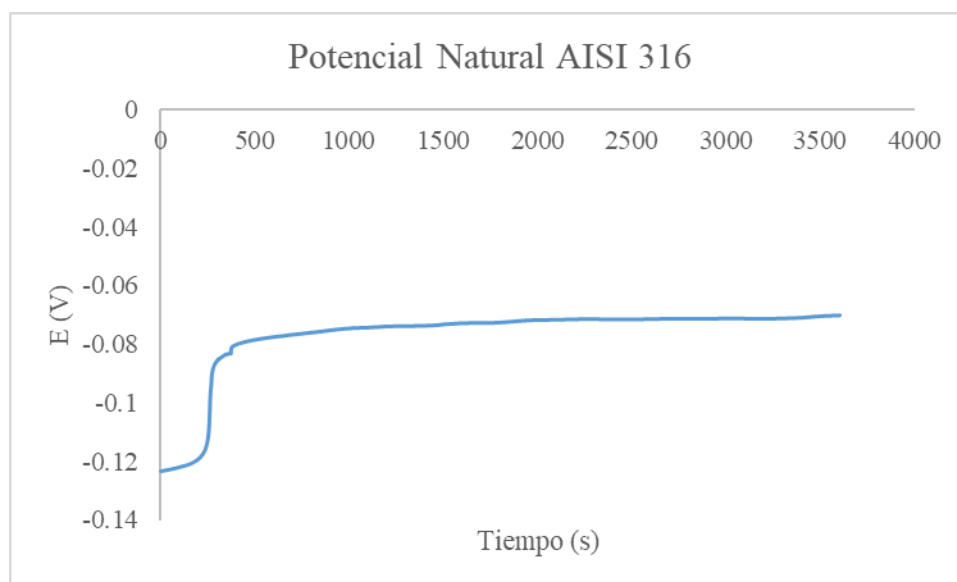


Figura A.2 Potencial Natural 316 – muestra 2

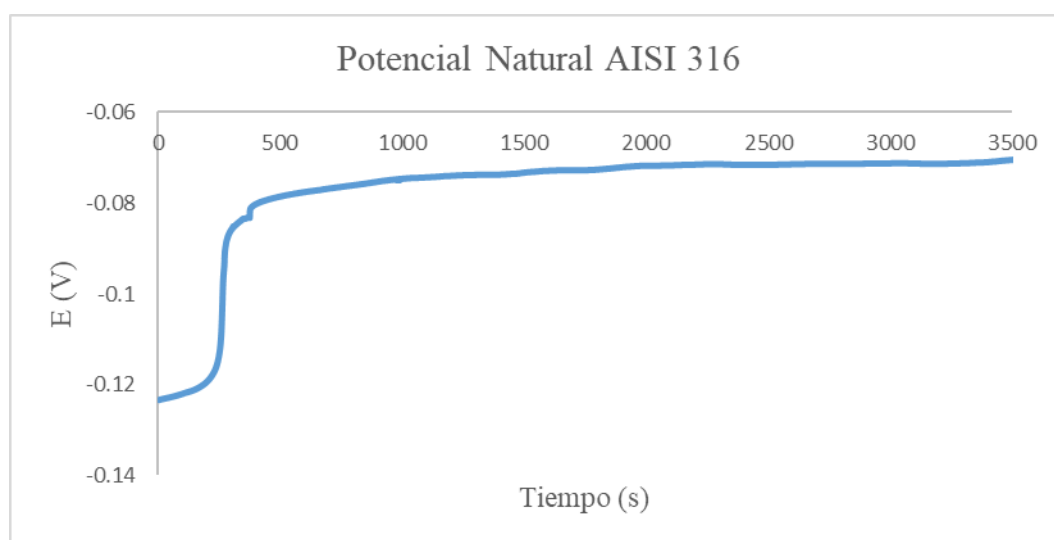


Figura A.3 Potencial natural 316 – muestra 3

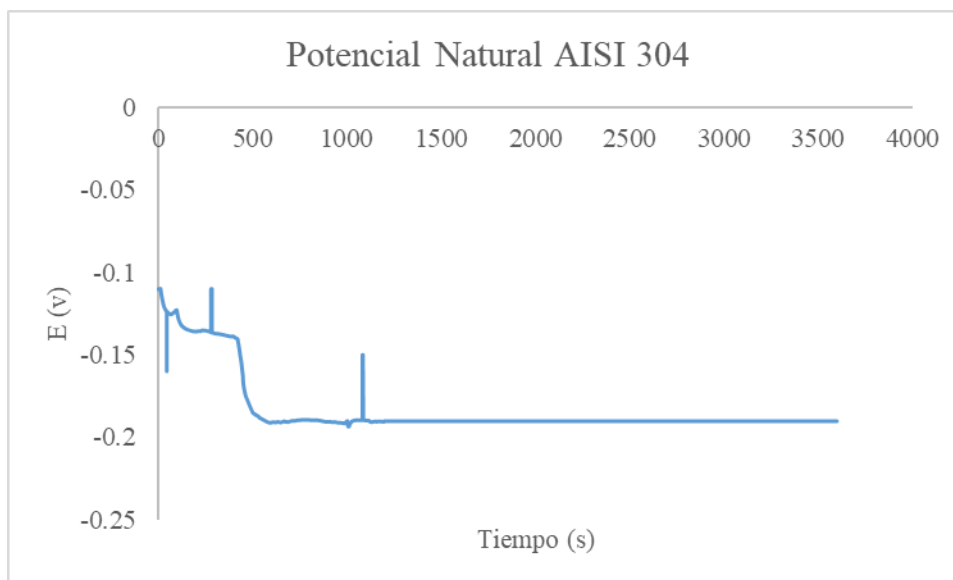


Figura A.4 Potencial Natural 304 – muestra 1

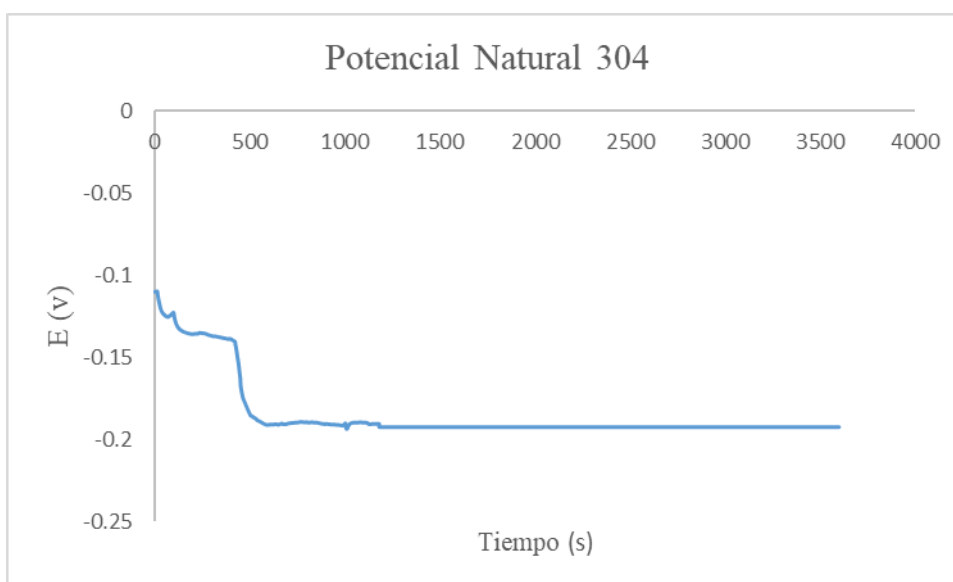


Figura A.5 Potencial Natural 304 – muestra 2

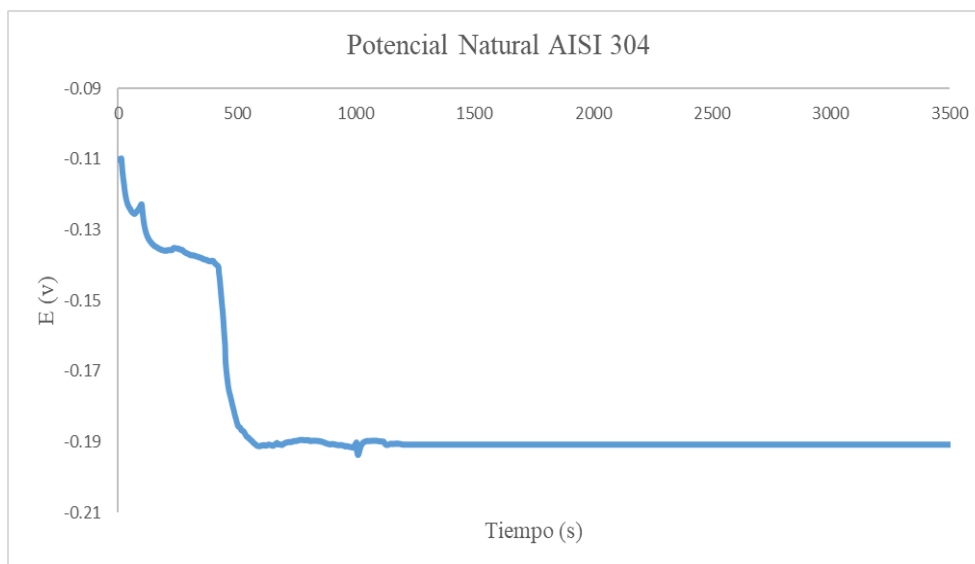
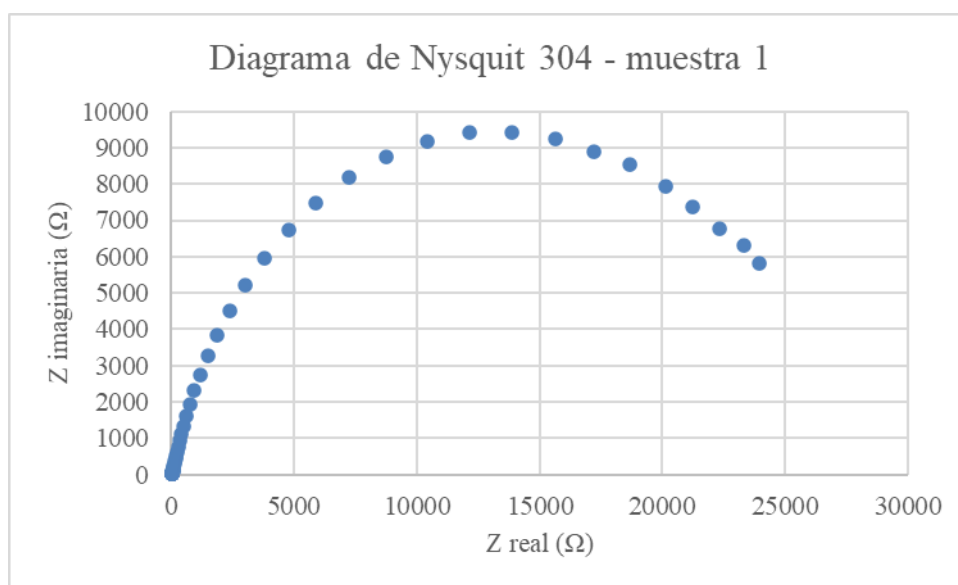
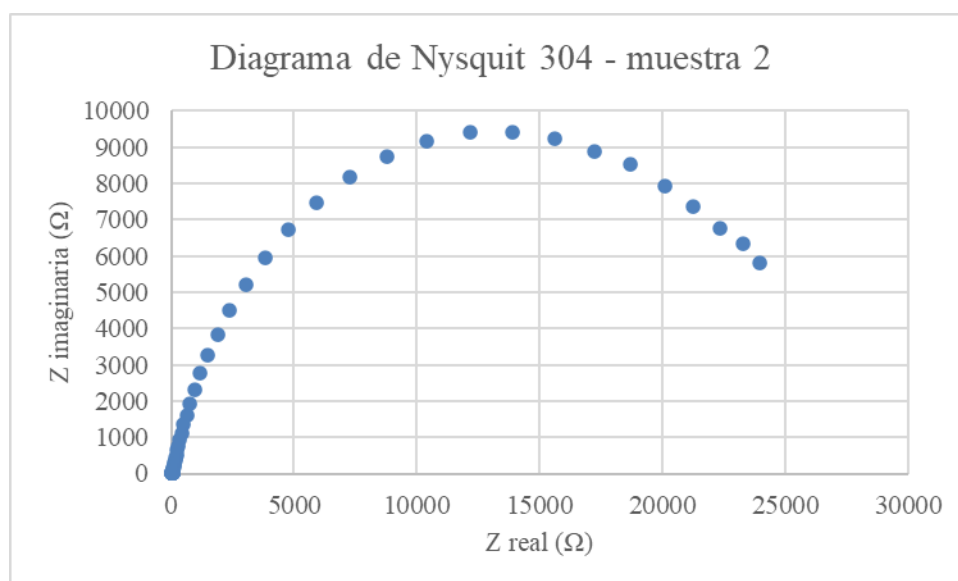


Figura A.6 Potencial Natural 304 – muestra 3

APÉNDICE B. Generación de Gráficas de la Variación de Resultados en los Diagramas de

Nyquist y Bode

Análisis del ensayo de espectroscopía de impedancia electroquímica realizado en los aceros AISI 316 y AISI 304.

**Figura B.1** Diagrama de Nyquist 304 – muestra 1**Figura B.2** Diagrama de Nysquit 304 – muestra 2

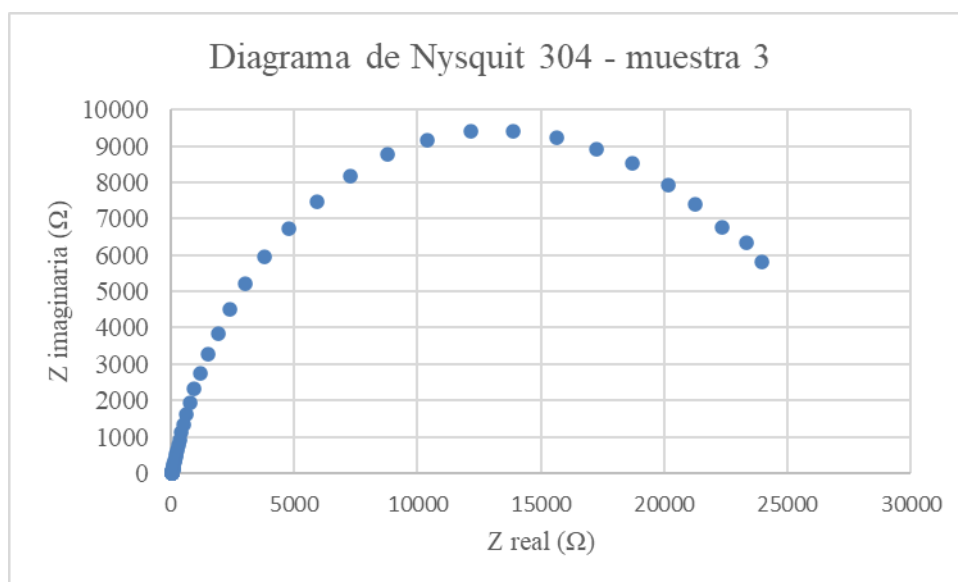


Figura B.3 Diagrama de Nyquist 304 – muestra 3

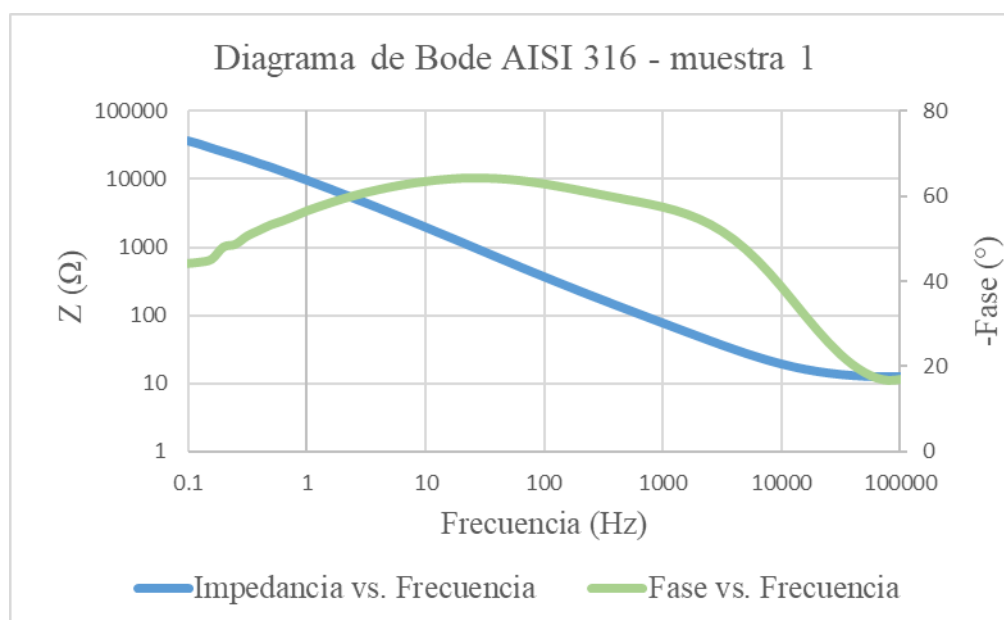


Figura B.4 Diagrama de Bode AISI 316 – muestra 1

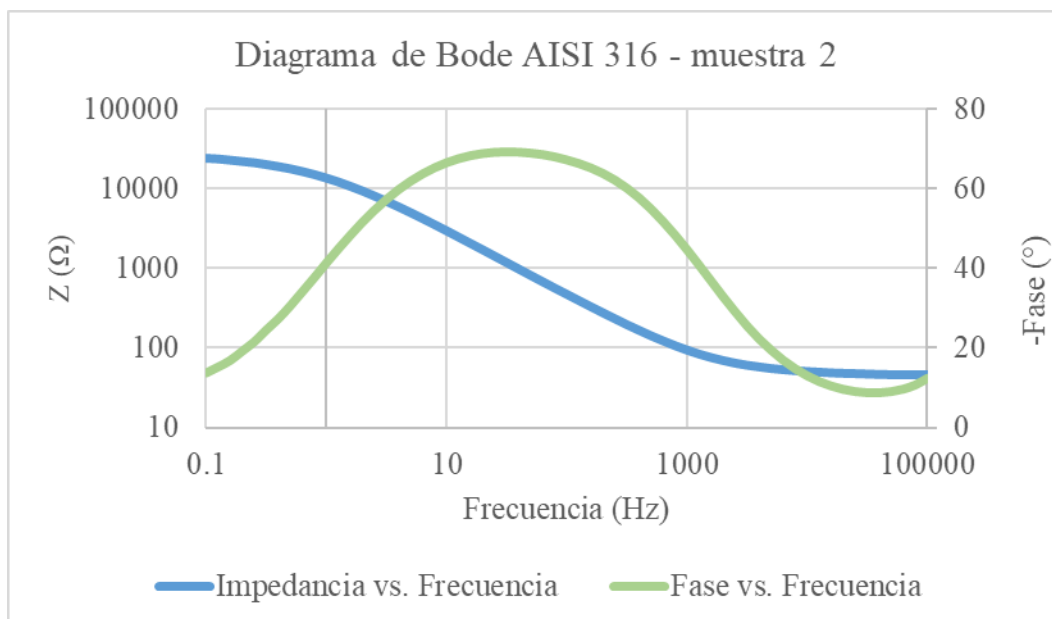


Figura B.5 Diagrama de Bode AISI 316 – muestra 2

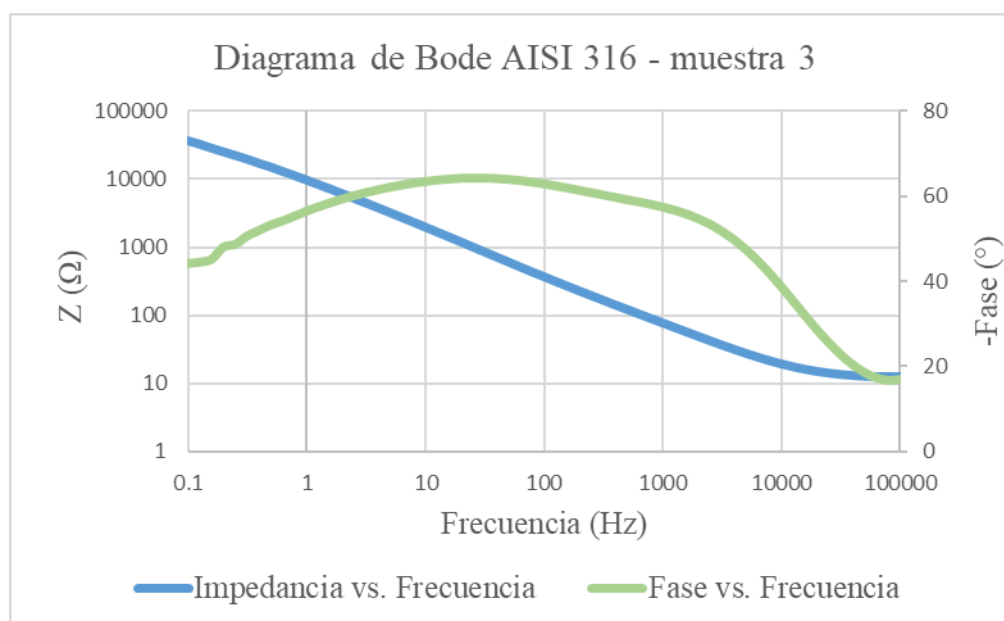


Figura B.6 Diagrama de Bode AISI 316 – muestra 3

APÉNDICE C. Obtención de curvas de polarización potencioestática.

Análisis del ensayo curvas de polarización potencioestática realizado en los aceros AISI 316 y AISI 304.

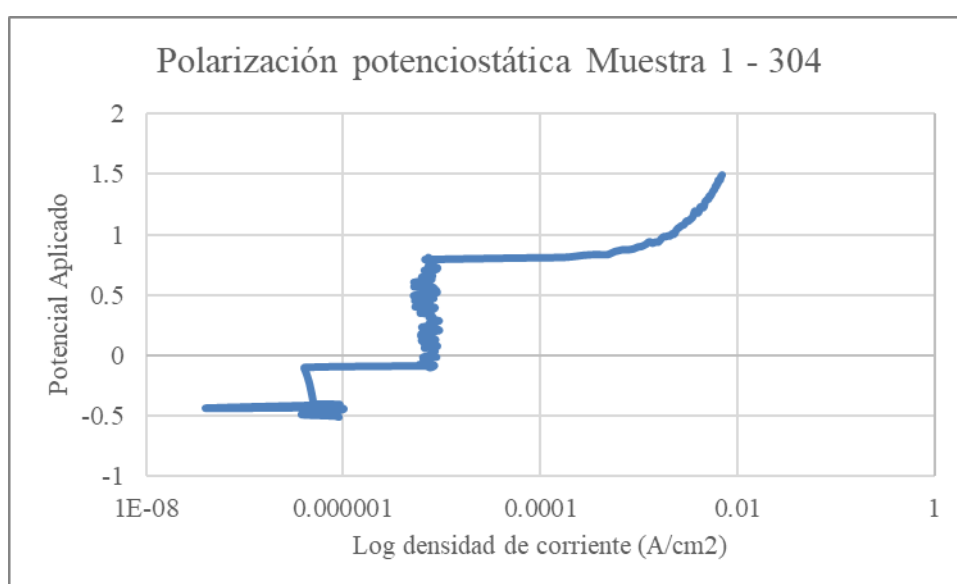


Figura C.1 Muestra 1 AISI 304 PP

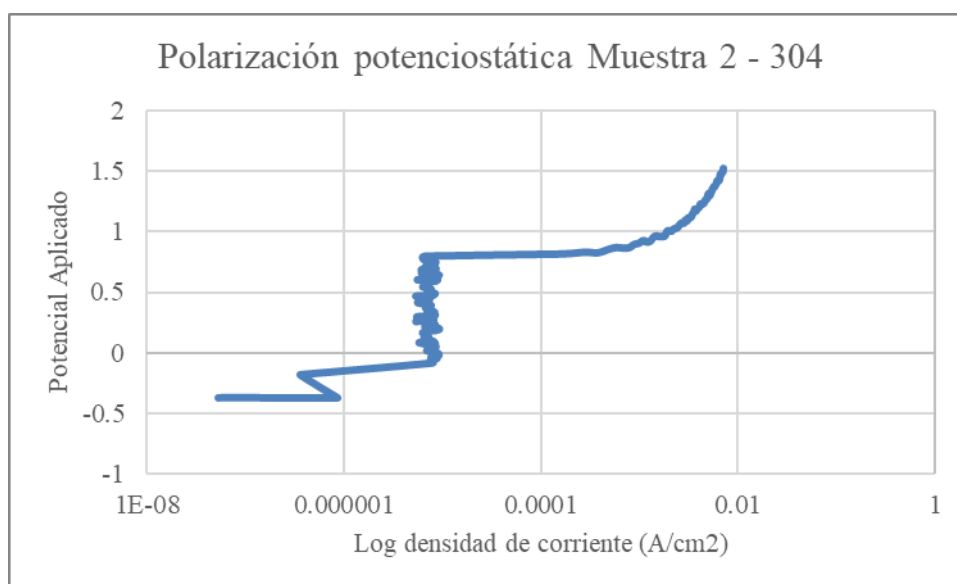


Figura C.2 Muestra 2 AISI 304 PP

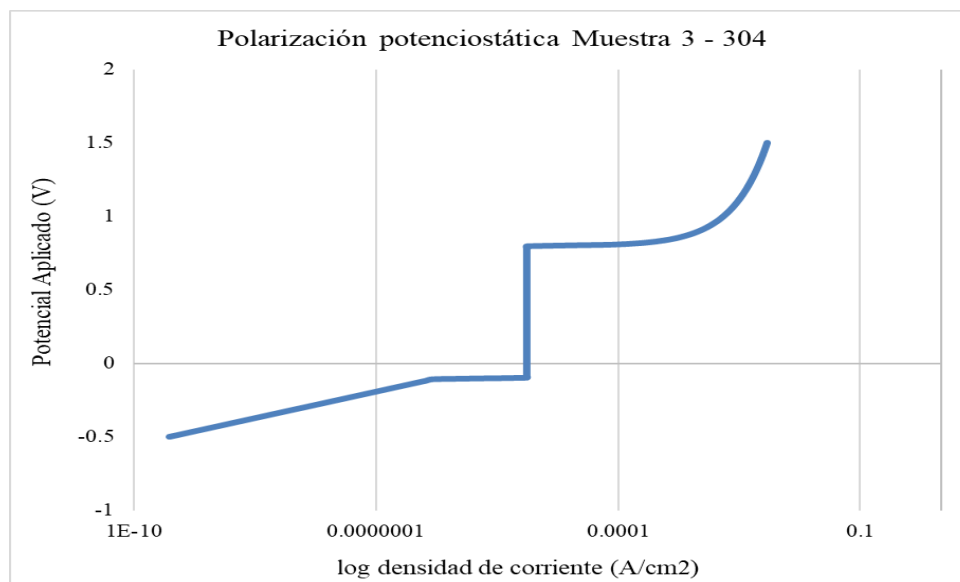


Figura C.3 Muestra 3 Acero 304 PP

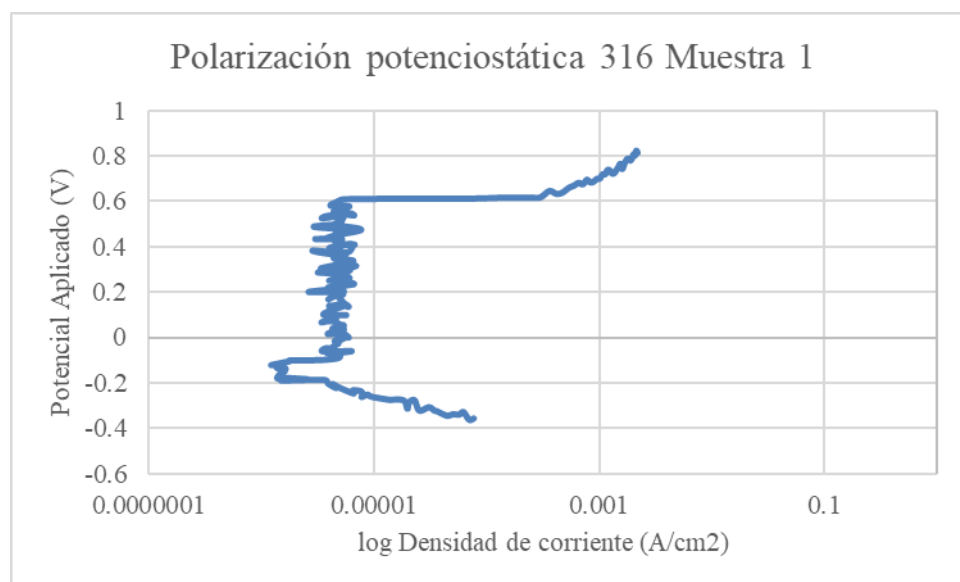


Figura C.4 Muestra 1 PP 316

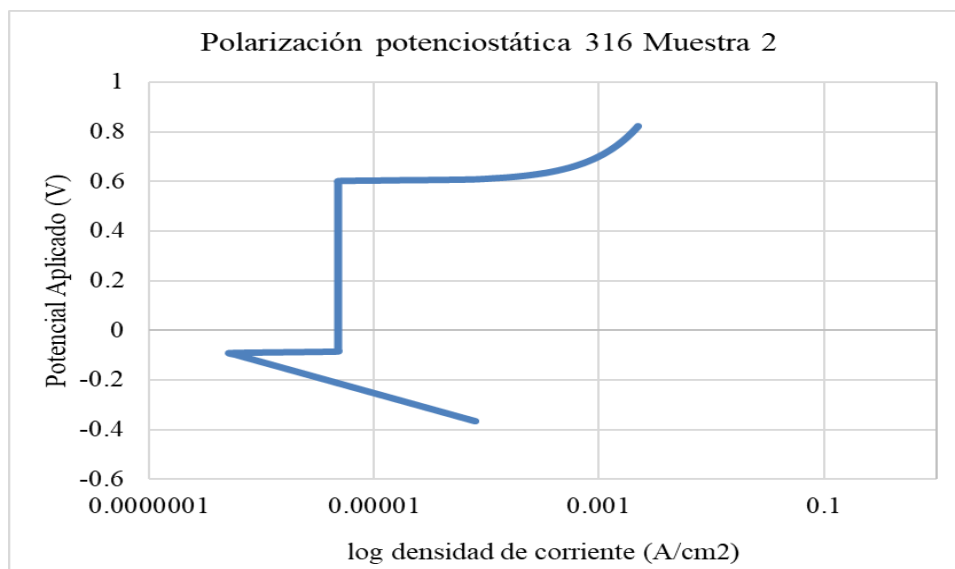


Figura C.5 Muestra 2 316 PP

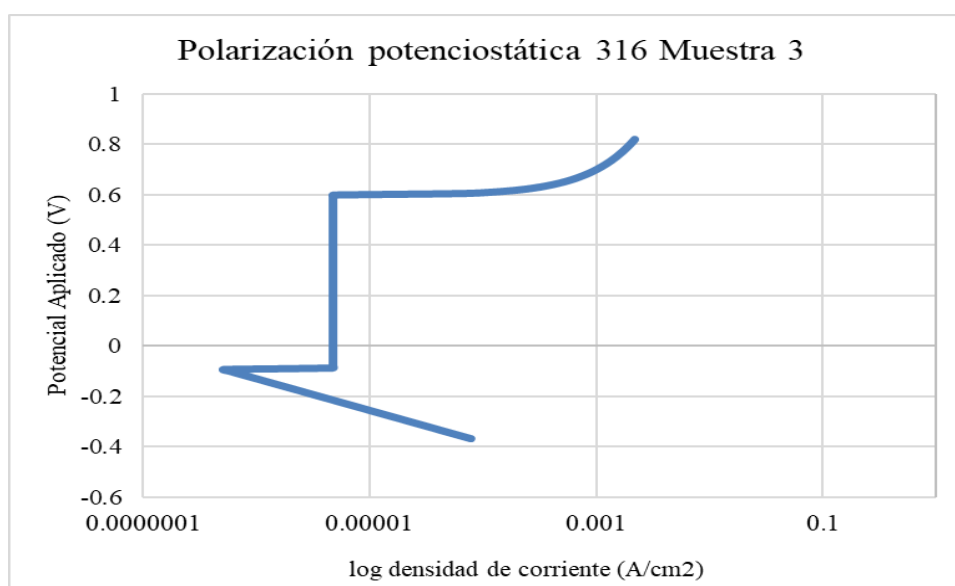


Figura C.6 Muestra 3 316 PP

Apéndice D. Cálculo detallado del valor actual neto (VAN) proyectado a 5 años.

Fórmula para calcular el valor actual neto.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - C_o$$

Donde:

- F_t : Flujo de caja neto en el año t.
- r : Tasa de descuento
- n : Número de años
- C_o : Inversión Inicial.

Datos para el cálculo

- F_t : 43.754,85 USD.
- r : 10% (0.10)
- n : 5
- C_o : 84.303,40 USD

Valor de los flujos de caja por año:

- **Año 1:**

$$\frac{43.754,85}{(1+0.1)^1} = 39.777,14 \text{ USD}$$

- **Año 2:**

$$\frac{43.754,85}{(1+0.1)^2} = 36.161,03 \text{ USD}$$

- **Año 3:**

- **Año 4:**
$$\frac{43.754,85}{(1 + 0.1)^3} = 32.873,67 \text{ USD}$$

- **Año 5:**
$$\frac{43.754,85}{(1 + 0.1)^4} = 29.885,15 \text{ USD}$$

$$\frac{43.754,85}{(1 + 0.1)^5} = 27.168,32 \text{ USD}$$

Suma del valor por año de los flujos de caja:

Suma del valor presente por año = $39.777,14 + 36.161,03 \text{ USD} + 32.873,67 \text{ USD}$

$+29.885,15 + 27.168,32 = 165.865,31 \text{ USD}.$

Resta de la inversión inicial, obtención del VAN:

VAN = $165.865,31 - 84.303,40 = 81.561,91 \text{ USD}.$

Apéndice E. Anexo de reconocimiento de responsabilidades éticas y profesionales
**“Evaluación de la corrosión mediante ensayos electroquímicos en aceros inoxidable
empleados en la industria camaronera”**

Cantos Kevin; Jaime Patrick

1. Identificación del problema y factores críticos desde el punto de vista ético

El presente proyecto integrador tiene como objetivo la evaluación de la corrosión mediante ensayos electroquímicos en aceros inoxidable empleados en la industria camaronera ecuatoriana. Se propone desarrollar una metodología detallada para la evaluación de materiales en entornos altamente corrosivos, tomando como referencia los aceros inoxidable 304 y 316, que son materiales convencionales en este sector debido a su resistencia a la corrosión y compatibilidad con ambientes alimenticios [1].

Desde el punto de vista ético, los factores críticos identificados incluyen:

- **Seguridad alimentaria:** Garantizar que los materiales utilizados en la industria camaronera no comprometan la calidad de los productos alimenticios, evitando la migración de elementos metálicos hacia el producto [2].
- **Impacto ambiental:** Evaluación del deterioro de los materiales para evitar la contaminación por partículas metálicas en cuerpos de agua [3].
- **Sostenibilidad y costos:** Promoción del uso de materiales adecuados que reduzcan costos de mantenimiento y reemplazos frecuentes, permitiendo a la industria camaronera ecuatoriana ser más eficiente y sostenible [4].

- **Toma de decisiones informadas:** Brindar información técnica precisa para que la industria alimentaria pueda evaluar sus materiales y tomar decisiones fundamentadas en términos de costos y rendimiento [1].

Dilema ético identificado

Uno de los principales dilemas éticos en la industria camaronera ecuatoriana es la disyuntiva entre la reducción de costos de producción y la necesidad de garantizar un entorno seguro y sostenible [5]. En la industria ecuatoriana se prioriza la reducción de costos operativos, lo que lleva al uso de materiales de menor calidad o al retraso en mantenimientos preventivos, aumentando el riesgo de deterioro de los materiales [5]. Esto a su vez, aumento los costos a largo plazo [5].

2. Reconocimiento de las partes interesadas y sus roles

Las partes interesadas en este proyecto incluyen:

- **Empresas camaroneras y de procesamiento de mariscos:** Dependen de la durabilidad de sus equipos metálicos para garantizar la seguridad y eficiencia de sus operaciones [5].
- **Fabricantes y proveedores de aceros inoxidables:** Responsables de ofrecer materiales resistentes a la corrosión que cumplan con las normativas alimentarias [4].
- **Organismos regulatorios y de control sanitario (Agrocalidad, ARCSA, INEN en Ecuador):** Supervisan el cumplimiento de estándares de seguridad y calidad en la industria alimentaria [6].
- **Investigadores y comunidad académica:** Generan conocimiento y metodologías para la evaluación y selección de materiales resistentes a la corrosión.

- **Consumidores finales:** Indirectamente beneficiados por el uso de materiales adecuados que garanticen la calidad e inocuidad de los productos alimenticios.

En caso de dilemas éticos, los responsables de la toma de decisiones serán los investigadores del proyecto, en conjunto con las empresas y organismos reguladores, quienes evaluarán las mejores alternativas para garantizar seguridad y sostenibilidad.

3. Evaluación de las posibles soluciones y su impacto

Se han identificado dos posibles soluciones para abordar el problema:

Opción 1: Implementación de ensayos electroquímicos regulares en aceros inoxidables empleados en la industria camaronera

- **Impacto ambiental:** Permite detectar corrosión temprana y evitar liberación de partículas metálicas al medio [1].
- **Impacto social:** Protege la salud de los consumidores al disminuir la contaminación de cuerpos de agua por partículas metálicas que provienen de estructuras corroídas [3].
- **Impacto económico:** Reduce costos de mantenimiento y reemplazo de equipos a largo plazo [5].
- **Impacto global:** Promueve la estandarización de metodologías de evaluación de la corrosión en la industria camaronera de Ecuador.

Impacto a corto plazo (1 año): Implementación piloto en plantas procesadoras para evaluar la efectividad de la metodología y el monitoreo.

Impacto a largo plazo (+10 años): Reducción significativa en costos de mantenimiento, menor impacto ambiental y aumento en la calidad de las exportaciones de camarón.

Opción 2: Desarrollo de un protocolo de mantenimiento y monitoreo basado en los resultados de ensayos electroquímicos

- **Impacto ambiental:** Reducción en el uso de productos químicos agresivos para mantenimientos preventivos frecuentes.
- **Impacto social:** Capacitación del personal en la detección y prevención de la corrosión.
- **Impacto económico:** Optimización del mantenimiento preventivo, reduciendo fallas inesperadas [5].
- **Impacto global:** Posible aplicación de la metodología en otras industrias alimentarias con condiciones similares.

Impacto a corto plazo (1 año): Capacitación de operarios en el uso de metodologías de monitoreo de materiales en ambientes salinos.

Impacto a largo plazo (+10 años): Mejora en la gestión de activos en las industrias, asegurando un incremento en la vida útil de los materiales empleados en la industria camaronera [5].

Dado el impacto positivo de estas soluciones, se recomienda la implementación de ensayos electroquímicos con regularidad junto con un protocolo de monitoreo para mitigar los efectos de la corrosión en la industria camaronera ecuatoriana, asegurando un desarrollo sostenible y competitivo en el mercado internacional [5][6].

Referencias

- [1] T. O. Olugbade, “Corrosion Resistance, Evaluation Methods, and Surface Treatments of Stainless Steels,” *Stainless Steels [Working Title]*, 2022.
- [2] A. Zaffora, F. D. Franco y M. Santamaría, “Corrosion of stainless steel in food and pharmaceutical industry,” *Current Opinion in Electrochemistry*, vol. 100760, 2021.
- [3] J. V. do Nascimento, R. A. Carvalho, D. Garcia, R. Maziero, E. A. Gomes y J. Rubio, “Stainless steel corrosion in instrumentation pipe,” *Cadernos UniFOA*, 2019.
- [4] S. Roy and P. Mandal, “Corrosion Resistance Methods for Stainless Steel,” *International Conference on Material Science and Engineering*, 2020, pp. 208-225.
- [5] V. Morales Llona, *Impacto económico en la industria camaronera ecuatoriana debido a la baja calidad de la larva de camarón*, Universidad de Especialidades Espíritu Santo (UEES), Facultad de Economía y Ciencias Empresariales, Tutor: Isidro Fierro, Samborondón, Ecuador, 25 de febrero de 2011.
- [6] ARCSA, “Instructivo Externo: Certificación de Buenas Prácticas de Manufactura - Alimentos Procesados”, Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria, abril 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/04/IE-B.3.4.2-BPM-01-Instructivo-Externo-Certificacion-de-buenas-practicas-de-manufactura-Alimentos-Procesados-Version-3.0.pdf>. [Último acceso: 7 de febrero de 2025].