

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Uso del Extracto de *Phalaris canariensis* como inhibidor de la
corrosión del acero 316L en el sistema LiCl/H₂O

TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA

PRESENTA:
I. Q. EARVIN GALVÁN

DIRECTOR: Dr. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

CUERNAVACA, MORELOS

FEBRERO DE 2025

RESUMEN

En este trabajo de investigación, se analizó el efecto inhibidor del extracto de semilla de *Phalaris canariensis* sobre la corrosión del acero 316L, sumergido en una solución de LiCl/H₂O al 35%. Se realizaron pruebas a distintas concentraciones del inhibidor 0, 5, 10, 25, 50 y 100 ppm a diferentes temperaturas: 25, 45 y 70 °C.

Las pruebas de corrosión incluyeron técnicas electroquímicas como Potencial en circuito abierto (OCP), Resistencia a la polarización lineal (LPR), Curvas de polarización potenciodinámica (PDP), Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y Ruido electroquímico (EN). Las mediciones se realizaron a intervalos regulares durante un total de 24 h de exposición. Además, se llevaron a cabo análisis gravimétricos durante un período de 72 h. Adicionalmente, para analizar la morfología superficial de las muestras metálicas, se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).

Los resultados de las pruebas gravimétricas y electroquímicas corroboran el efecto inhibidor del extracto de semilla de *Phalaris canariensis*, observándose que la eficiencia aumenta con el incremento de la concentración del inhibidor. Sin embargo, al elevar la temperatura, la eficiencia disminuye en comparación con los resultados obtenidos a 25 °C con una concentración óptima de 100 ppm. El extracto provocó la formación de productos de corrosión protectores pasivantes adsorbiéndose físicamente a la superficie del acero siguiendo una isoterma de adsorción de Temkin. El inhibidor afectó tanto las pendientes de Tafel anódicas como catódicas, comportándose, por lo tanto, como un inhibidor de tipo mixto. Los principales compuestos del extracto responsables de inhibir la corrosión fueron los ácidos grasos linoleico, palmítico y oleico.

ABSTRACT

In this research work, the inhibitory effect of *Phalaris canariensis* seed extract on the corrosion of 316L steel submerged in a 35% LiCl/H₂O solution was analyzed. Tests were conducted at various inhibitor concentrations: 0, 5, 10, 25, 50, and 100 ppm at different temperatures: 25, 45, and 70 °C.

The corrosion tests included electrochemical techniques such as Open Circuit Potential (OCP), Linear Polarization Resistance (LPR), Potentiodynamic Polarization Curves (PDP), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), and Electrochemical Noise (EN). Measurements were taken at regular intervals over a total exposure time of 24 hours. Additionally, gravimetric analyses were carried out over a 72-hour period. To analyze the surface morphology of the metal samples, a Scanning Electron Microscope (SEM) was used.

The results from the gravimetric and electrochemical tests corroborate the inhibitory effect of *Phalaris canariensis* seed extract, showing that the efficiency increases with the concentration of the inhibitor. However, as the temperature rises, the efficiency decreases compared to the results obtained at 25 °C with an optimal concentration of 100 ppm. The extract induced the formation of passive protective corrosion products that physically adsorbed onto the steel surface following a Temkin adsorption isotherm. The inhibitor affected both the anodic and cathodic Tafel slopes, behaving, therefore, as a mixed-type inhibitor. The main compounds in the extract responsible for inhibiting corrosion were palmitic and oleic fatty acids.

Dedicatoria:

A mis padres, por la educación y las enseñanzas que me brindaron. Agradezco profundamente el esfuerzo que siempre hicieron para asegurarme una buena formación y permitirme continuar mis estudios. Gracias por apoyarme en cada decisión que he tomado y, sobre todo, por estar a mi lado cuando más los he necesitado. Este trabajo se los dedico principalmente a ustedes. Los amo.

A mis hermanos, quienes siempre han estado a mi lado en mi camino académico, de quienes me siento inmensamente orgulloso.

A mi pareja Vanessa, por su amor y apoyo incondicional. Eres mi compañera de vida, y tu aliento y apoyo han sido fundamentales para que yo pueda llegar donde me encuentro hoy en día.

Agradecimientos:

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el apoyo económico brindado para que se pudiera llevar a cabo esta investigación.

Al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) por permitirme hacer uso de sus equipos e instalaciones.

A mi director de tesis el Dr. J. Gonzalo González Rodríguez, por sus enseñanzas y dedicación que me brindo a lo largo de esta investigación.

A los investigadores la Dra. Karen Gálvez Larios, Dra. Daysi Elusaí Millán Ocampo, Dr. Isaí Rosales Cadena y el Dr. Ulises León Silva por el apoyo de sus consejos y conocimientos a lo largo del desarrollo de esta investigación de tesis.

A mis compañeros y amigos Dalia, Martha y José, quienes me brindaron su apoyo incondicional, así como los aportes positivos que han tenido en mi vida y durante mi estancia en el posgrado.

A mi pareja Vanessa, por brindarme su apoyo incondicional en todo momento.

INDICE

CAPITULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Corrosión.	2
1.2. Características del alpiste.	3
1.3. Sistema de refrigeración por absorción.	4
1.4. Revisión bibliográfica.	5
1.4.1. Corrosión en sistemas de enfriamiento por absorción.	7
CAPITULO 2	10
2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA, JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS E HIPÓTESIS.	10
2.1. Planteamiento de problema.	11
2.2. Justificación.	11
2.3. Objetivo general.	12
2.3.1. Objetivos específicos.	12
2.4. Hipótesis.	12
CAPITULO 3	13
3. FUNDAMENTO TEÓRICO	13
3.1. Corrosión.	14
3.1.1. Clasificación de la corrosión.	14
3.2. Métodos de protección anticorrosiva.	16
3.2.1. Recubrimiento anticorrosivos.	16
3.2.2. Protección catódica.	17
3.2.3. Protección anódica.	17
3.2.4. Inhibidores de corrosión.	18
3.3. Inhibidores verdes.	22

3.4.	Isotermas de adsorción.....	24
3.5.	Pruebas electroquímicas.....	28
3.5.1.	Potencial a circuito abierto (OCP: Open circuit potential).	30
3.5.2.	Resistencia a la polarización lineal (LPR).....	30
3.5.3.	Curvas de polarización potenciodinámica.....	31
3.5.4.	Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).....	33
3.5.5.	Ruido Electroquímico (EN).	35
CAPITULO 4		39
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL		39
4.1.	Obtención del extracto del <i>Phalaris Canariensis</i>	40
4.1.1.	Molienda y tamizado.	40
4.1.2.	Extracción Soxhlet.	40
4.2.	Caracterización del extracto <i>Phalaris canariensis</i>	42
4.3.	Preparación de probetas.....	42
4.3.1.	Material.	42
4.3.2.	Electrolito.	44
4.3.3.	Concentración del inhibidor.	45
4.3.4.	Arreglo experimental.....	48
4.3.5.	Parámetros experimentales.	49
4.4.	Pruebas electroquímicas.....	49
4.4.1.	Primera etapa de mediciones electroquímicas.	49
4.4.2.	Segunda etapa de mediciones electroquímicas.....	51
4.5.	Pérdida de peso (pruebas gravimétricas).	52
4.5.1.	Preparación de las probetas de prueba.	52
4.5.2.	Preparación de las celdas de experimentación	53

CAPITULO 5	56
5. RESULTADOS Y ANALISIS	56
5.1. Caracterización del extracto de <i>Phalaris canariensis</i>	57
5.1.1. Espectroscopia FT-IR.	57
5.1.2. Cromatografía de gases GC-MS.....	58
5.2. Caracterización del material.....	59
5.3. Pérdida de masa.....	60
5.3.1. Isoterma de adsorción. Extracto de <i>Phalaris canariensis</i>	63
5.3.2. Morfología superficial de muestras del acero 316L expuesta a LiCl/H ₂ O a diferentes temperaturas.	67
5.4. Pruebas electroquímicas.....	71
5.4.1. Potencial a circuito abierto (OCP).....	71
5.4.2. Resistencia a la polarización lineal (LPR).	74
5.4.3. Curvas de Polarización (CP).....	77
5.4.4. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).	82
5.4.5. Ruido electroquímico.	95
6. Conclusiones.	104
7. Referencias.	106

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Resistencia de Polarización Lineal (LPR).....	31
Figura 2. Curva de polarización (TAFEL).....	32
Figura 3. Diagrama Nyquist para un sistema electroquímico simple.	34
Figura 4. Diagrama de Bode para un sistema electroquímico simple.....	35
Figura 5. Transistores de potencial y corriente que pueden analizarse por medio de la técnica de RE.	36
Figura 6. Semilla de alpiste tamizada.	40
Figura 7. Equipo Soxhlet.	41
Figura 8. Extracto del alpiste.	41
Figura 9. Barras de acero 316L.	43
Figura 10. Probetas para pruebas.	43
Figura 11. Solutos utilizados para el electrolito.	44
Figura 12. Inhibidor aforado a 250 ml con hexano.	45
Figura 13. Celda electroquímica.....	48
Figura 14. Potenciostato/Galvanostato GAMRY INTERFACE 1010.....	48
Figura 15. Electrodo de referencia, auxiliar y de trabajo.	50
Figura 16. GAMRY INTERFACE 1010 acoplado a una computadora.	50
Figura 17. Montaje de celda electroquímica para medición de RE.....	51
Figura 18. Potenciostato / Galvanostato marca ACM Instruments GillAC.	52
Figura 19. Probetas de experimentación para pruebas gravimétricas.....	53
Figura 20. Celdas para pruebas gravimétricas.	54
Figura 21. Espectro FT-IR del extracto del <i>Phalaris canariensis</i>	58
Figura 22. Micrografías del acero 316L a) región longitudinal, b) región transversal.....	60
Figura 23. Efecto de la concentración del inhibidor y la temperatura sobre la pérdida de peso del acero 316L en la solución de LiCl/H ₂ O.	62
Figura 24. Variación de la eficiencia del inhibidor con respecto a la concentración del inhibidor y la temperatura para el acero 316L en LiCl/H ₂ O.....	63
Figura 25. Isotermas de adsorción de Temkin para el acero 316L en LiCl/H ₂ O con el extracto de <i>Phalaris canariensis</i> obtenidas por el método de pérdida de peso.	64

Figura 26. Grafica de Arrhenius para el acero 316 L en LiCl/H ₂ O en presencia de Phalaris canarienses.	66
Figura 27. Micrografías del acero 316L inmerso en LiCl/H ₂ O para el sistema a 0 ppm y 100 ppm a una temperatura de 25°C a 100X a) y c), 500X b) y d).	68
Figura 28. Micrografías del acero 316L inmerso en LiCl/H ₂ O para el sistema a 0 ppm y 100 ppm a una temperatura de 45°C a 100X a) y c), 500X b) y d).	69
Figura 29. Micrografías del acero 316L inmerso en LiCl/H ₂ O para el sistema a 0 ppm y 100 ppm a una temperatura de 70°C a 100X a) y c), 500X b) y d).	70
Figura 30. Variación del valor de OCP a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 25°C.	72
Figura 31. Variación del valor de OCP a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 45°C.	73
Figura 32. Variación del valor de OCP a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 70°C.	74
Figura 33. Variación del valor de RP a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 25°C.	75
Figura 34. Variación del valor de Rp a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 45°C.	76
Figura 35. Variación del valor de RP a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 70°C.	77
Figura 36. Curvas de polarización para el acero inoxidable 316L en la solución LiCl/H ₂ O a diferentes concentraciones del inhibidor y diferentes temperaturas (a) 25°C, (b) 45°C y (c) 70°C.	79
Figura 37. Efecto de la concentración del inhibidor en los Diagramas de Nyquist del acero 316L en LiCl/H ₂ O a una temperatura de 25°C.	83
Figura 38. Efecto de la concentración del inhibidor en los Diagramas de Nyquist del acero 316L en LiCl/H ₂ O a una temperatura de 45°C.	85
Figura 39. Efecto de la concentración del inhibidor en los Diagramas de Nyquist del acero 316L en LiCl/H ₂ O a una temperatura de 70°C.	86
Figura 40. Variación de la eficiencia del inhibidor a diferentes concentraciones del inhibidor y temperaturas con la técnica de impedancia electroquímica.	89

Figura 41. Diagrama de Bode (Modulo) del acero 316L en LiCl/H ₂ O a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 25°C.....	90
Figura 42. Diagrama de Bode (Angulo de fase) del acero 316L en LiCl/H ₂ O a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 25°C.	91
Figura 43. Diagrama de Bode (Modulo) del acero 316L en LiCl/H ₂ O a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 45°C.....	92
Figura 44. Diagrama de Bode (Angulo de fase) del acero 316L en LiCl/H ₂ O a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 45°C.	93
Figura 45. Diagrama de Bode (Modulo) del acero 316L en LiCl/H ₂ O a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 70°C.....	94
Figura 46. Diagrama de Bode (Angulo de fase) del acero 316L en LiCl/H ₂ O a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 70°C.	95
Figura 47. Series de tiempo para la corriente del acero 316L a 0 y 100 ppm de inhibidor a) 25, b) 45 y c) 70°C, en 0 y 24 h de prueba.	98
Figura 48. Series de tiempo en potencial del acero 316L a 0 y 100 ppm de inhibidor con respecto a la concentración de inhibidor a a) 25, b) 45 y c) 70°C, en 0 y 24 h de prueba.	101

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Diferentes isothermas que pueden ser usadas para describir la adsorción del inhibidor sobre la superficie del metal.	27
Tabla 2. Características generales sobre las técnicas para el estudio de la corrosión [60].	29
Tabla 3. Clasificación del tipo de corrosión con base en el IL.....	37
Tabla 4. Composición química del acero 316L.	42
Tabla 5. CG-EM de los principales compuestos químicos identificados en el extracto del <i>Phalaris canariensis</i>	59
Tabla 6. Datos de pérdida de peso del acero 316L en LiCl/H ₂ O a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	61
Tabla 7. Parámetros termodinámicos del acero 316L en LiCl/H ₂ O en presencia de extracto de <i>Phalaris canariensis</i> a diferentes temperaturas.	65
Tabla 8. Parámetros de activación del <i>Phalaris canariensis</i> en LiCl/H ₂ O.....	66
Tabla 9. Efecto de la concentración del inhibidor en los parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización a una Temperatura de 25°C.....	81
Tabla 10. Efecto de la concentración del inhibidor en los parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización a una Temperatura de 45°C.....	81
Tabla 11. Efecto de la concentración del inhibidor en los parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización a una Temperatura de 70°C.....	81
Tabla 12. Parámetros de impedancia para el acero 316L inmerso en LiCl/H ₂ O a diferentes concentraciones de <i>Phalaris canariensis</i>	87
Tabla 13. Parámetros de Ruido electroquímico a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 25°C.....	102
Tabla 14. Parámetros de Ruido electroquímico a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 45°C.....	102
Tabla 15. Parámetros de Ruido electroquímico a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 70°C.....	103

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Corrosión.

Los fenómenos de corrosión en metales y aleaciones involucran principalmente dos elementos: el material y su entorno [1]. La corrosión se define como el deterioro de un material, generalmente un metal, que resulta de una reacción con su entorno [2], provocando la degradación de ambos a través de una reacción química o electroquímica directa para formar compuestos [3].

Existen tres razones importantes para el estudio de la corrosión: La primera es económica, cuyo objetivo involucra el disminuir la pérdida de material en tuberías, tanques, componentes metálicas de máquinas, barcos, puentes estructuras metálicas, etc. La segunda razón es implementar medidas de seguridad en la operación del equipo en el cual, a través de la corrosión, puede provocar fallas con consecuencias catastróficas. La tercera y última razón es la conservación de los recursos naturales, ya que el suministro mundial de metales es limitado [4].

Hay información que sugiere que la corrosión puede ser controlada de manera eficiente, con el uso de inhibidores de la corrosión (IC). Muchos de estos IC son compuestos orgánicos con grupos funcionales (amino, carboxilo, etc.) y átomos (nitrógeno, fosforo, azufre y oxígeno) presentes en la estructura química de los IC. Estos grupos funcionales y átomos bien orientados en la estructura del IC, infiere en propiedades únicas para su adsorción (física o química) sobre la superficie del metal o aleación [5]. Sin embargo, algunos de estos IC son tóxicos y bioacumulables.

En la actualidad, el uso de IC en la industria se ha enfocado en la búsqueda de nuevos compuestos no tóxicos, debido a las normas existentes de protección al medio ambiente (EPA, Environmental Protección Agency). Dentro de estas exigencias la industria ha puesto un especial interés en el desarrollo de “inhibidores verdes”, por tratarse de compuestos obtenidos a partir de extractos de plantas en las cuales hay muchos antioxidantes. Por ejemplo, si al aguacate se le quita el hueso, el resto se oxida, debido a la existencia de antioxidantes en el hueso, ó si a la manzana se le quita la cáscara, el resto se oxida, por la existencia de antioxidantes en la misma. En la actualidad, el uso de inhibidores de la corrosión

(IC) se ha extendido en la selección de compuestos orgánicos verdes, como hierbas aromáticas, especias y plantas medicinales, debido a su naturaleza ecológica y amigable con el medio ambiente [6].

Actualmente existen diferentes técnicas para la evaluación de inhibidores de corrosión que pueden ser a partir de pruebas gravimétricas y electroquímicas. Estas técnicas de evaluación son Potencial a circuito abierto (OCP), Resistencia a la polarización lineal (RPL), Espectroscopia de impedancia (EIS), Curvas de Polarización (CP) y Ruido Electroquímico (EN). De esta forma se puede determinar la eficiencia de un inhibidor de corrosión [7].

1.2. Características del *Phalaris canariensis*.

El *Phalaris canariensis* es una gramínea anual, que se cultiva extensivamente en las regiones templadas del mundo para la obtención de granos, estos han sido utilizados, casi con exclusividad, en la alimentación de aves ornamentales. Sin embargo, hay una tendencia creciente de su uso para la alimentación humana. El grano de alpiste tiene una composición semejante a otros cultivos como el trigo, cebada o arroz; posee un 55% de almidón, un 19-22% de proteínas y 5-7% de grasas [8]. Los granos de alpiste descascarado tienen un comportamiento similar a los del trigo común [9].

El grano de alpiste de las variedades glabras tiene en su composición química alrededor del 69% de carbohidratos de los cuales el 58% son almidones, un 21% de proteínas y el 7% de aceite [10], en esta composición química se observa el alto porcentaje de proteína del grano, comparado con el trigo que es aproximadamente de un 13% [11]. Este aceite contiene muchos antioxidantes tipo omega 3, 6 y 9, como son el ácido oleico, palmítico, linoleico, etc. El grano del alpiste es una fuente importante de triptófano, tiene un promedio de 2,97 g por 16 g de N, aproximadamente un 90% más alto que la proporción en la proteína de huevo [12].

1.3. Sistema de refrigeración por absorción.

El enfriamiento es un proceso que consiste reducir la temperatura de un cuerpo o espacio determinado y mantener esa temperatura en niveles más bajos a la temperatura ambiente, implica la transferencia de calor entre los cuerpos o espacios de mayor a menor temperatura [13].

La demanda de energía de alto grado está aumentando rápidamente para satisfacer las necesidades de los usuarios domésticos e industriales en el mundo [14]. Especialmente la refrigeración y la bomba de calor consumen alrededor del 17 % de la electricidad mundial [15]. Para ahorrar energía de alto grado (es decir, electricidad), los sistemas de refrigeración por absorción se están convirtiendo en la mejor alternativa [16]. El sistema de refrigeración por absorción (ABR) no solo ahorra energía, sino que también protege el medio ambiente utilizando fluidos de trabajo naturales para su funcionamiento [17].

El sistema de ABR depende en gran medida de las características químicas y termodinámicas del fluido de trabajo. El fluido de trabajo es la tecnología central del ciclo de refrigeración por absorción, este fluido está compuesto generalmente de dos tipos de materiales con diferente punto de ebullición [18]. Donde el compuesto con el punto de ebullición más bajo es el refrigerante y el componente con un punto de ebullición más alto es el absorbente.

Hoy en día se emplean mezclas como el $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ y $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ como fluidos de trabajo más comunes. La solución de $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ tiene un alto rendimiento de absorción, pero la temperatura de generación de vapor es alta y se necesita un equipo de rectificación, además de eso el uso de NH_3 limita la aplicación en interiores debido a su toxicidad [19]. Debido a esto las soluciones de $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ y $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$ presentan ventajas considerables como la no toxicidad de la solución, la no volatilidad del absorbente (por lo tanto, la eliminación del rectificador) y el alto valor de vaporización del H_2O como refrigerante. Sin embargo, solo puede obtener la capacidad de enfriamiento por encima de 0°C debido al punto de congelamiento del agua, además de que contiene una sal de metal alcalino (litio) la cual al

cristalizarse puede generar problemas de corrosión. Asimismo, el rendimiento del sistema aun no es satisfactorio para su aplicación comercial [20].

Recientemente, ha crecido rápidamente el interés por estudiar estos cuatro compuestos químicos ($\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ y $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$) con el objetivo de superar las limitaciones mencionadas. La investigación se centra en tres direcciones principales: líquidos iónicos, sales inorgánicas y compuestos orgánicos. Además, se busca que estas alternativas presenten baja toxicidad o corrosividad, un rendimiento amigable con el medio ambiente y que eviten la zona de rectificación.

1.4. Revisión bibliográfica.

La mayoría de los inhibidores naturales no son tóxicos, son biodegradables y son abundantes en la naturaleza. A la fecha se han utilizado extractos a partir de semillas, frutas, hojas, flores, etc. como potenciales IC. Se ha encontrado que reducen notablemente la velocidad de corrosión en diferentes medios corrosivos en aleaciones. En los extractos de plantas, están presentes un gran número de compuestos químicos, especialmente heterocíclicos, que inhiben la corrosión de manera eficiente. El efecto inhibidor se atribuye a la adsorción de estas sustancias orgánicas sobre la superficie del metal, que bloquea los sitios activos o forman una capa protectora. Los resultados obtenidos a la fecha demuestran que a mayoría de los inhibidores orgánicos actúan por adsorción en la interface metal/solución; mediante el desplazamiento de las moléculas de agua formando una película compacta que funciona como barrera fílmica [21].

En trabajos previos se han estudiado algunos inhibidores de origen natural para el acero al carbono, los cuales han presentado eficiencias considerables. A continuación, se describen algunos de estos trabajos de investigación:

S. Prihart et al [22] llevaron a cabo un estudio sobre el extracto de cáscara de sandía como inhibidor de la corrosión en acero al carbono ST-37 en agua de mar. En esta investigación, se analizaron la velocidad de corrosión y la eficiencia de inhibición mediante el método de pérdida de peso. Los resultados de laboratorio indicaron que la eficiencia de inhibición máxima alcanzó el 71,64 % a una concentración del 5 %

de inhibidor en 100 ml de agua de mar a temperatura ambiente. Además, se examinó el efecto de la temperatura y el tiempo de inmersión en la eficiencia de inhibición.

R. Ihamdane et al [23] realizaron un estudio del aceite esencial de hoja de orégano (*Origanum vulgare*) como un agente anticorrosivo respetuoso con el medio ambiente para el acero al carbono en ácido clorhídrico. La inhibición de la corrosión de *Origanum vulgare* se caracterizó por morfología superficial, métodos electroquímicos, de pérdida de peso, teóricos y computacionales. En los resultados obtuvieron que el extracto de orégano es un inhibidor de la corrosión muy eficaz para el acero en soluciones ácidas agresivas a bajas concentraciones. Se encontró que el rendimiento de inhibición más alto de *Origanum vulgare* fue del 85,64 % a 2 g/l en HCl 1 M a una temperatura de 25°C.

K. Mu'azu et al [24] utilizaron como inhibidor de corrosión el extracto de hoja de aguacate para el acero dulce en ácido sulfúrico 0,5 M. La concentración de inhibidor y el tiempo se variaron en el rango de 0-14 g/l y 48-280 a intervalos de 2 g/l y 48 h respectivamente. La velocidad de corrosión disminuyó conforme se aumentó las concentraciones de inhibidor. Los resultados que obtuvieron fue que la máxima eficiencia de inhibición del 97,89 % se produjo al valor óptimo de 10 g/l de la concentración de inhibidor a una temperatura de 30°C.

N. Bhardwaj et al [25] llevaron a cabo un estudio sobre la actividad corrosiva del extracto del fruto de *Aegle marmelos* en H₂SO₄ al 0.5 M como medio corrosivo. Se realizaron mediciones de polarización Tafel, EIS y estimaciones de pérdida de peso para verificar la eficiencia de inhibición. La prueba electroquímica y la estimación de pérdida de peso revelan que el extracto de la fruta de *Aegle marmelos* presenta una notable eficiencia de inhibición, alcanzando hasta un 83,08 % a una concentración de 500 mg/L en una solución de ácido sulfúrico 0,5 M para acero al carbono a 298 K.

A. Nikitasari et al [26] analizaron el extracto de sargazo como un nuevo inhibidor de corrosión contra la corrosión del acero al carbono API-5L en una solución de 0.1 M HCl. La acción inhibidora de este extracto se investigó mediante Polarización

potenciodinámica y Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). La concentración de inhibidor fue de 50, 100, 200, 400 y 500 ppm. Además, se varió la temperatura y el tiempo de exposición para determinar su efecto sobre la eficiencia del inhibidor. Las pruebas se realizaron variando la temperatura a temperatura ambiente, 40°C y 50°C. Los resultados mostraron que la eficiencia del inhibidor aumentó cuando la concentración del inhibidor, la temperatura y el tiempo de exposición aumentaron de acuerdo con los resultados de la prueba de polarización. Asimismo, el extracto de sargazo a 500 ppm manifestó una eficiencia de inhibición de hasta el 95 % con un tiempo de exposición de 30 minutos a temperatura ambiente.

1.4.1. Corrosión en sistemas de enfriamiento por absorción.

La corrosión es un aspecto crucial en los sistemas de enfriamiento por absorción. Aunque las mezclas de trabajo utilizadas en estos sistemas se consideran ecológicas, con el tiempo pueden dañar la estructura de los metales que los componen, reduciendo su vida útil. Los problemas de corrosión en estos sistemas se originan por factores como la solubilidad y la presión de vapor. Para evaluar el deterioro de los metales en los sistemas de enfriamiento por absorción, se han realizado diversas investigaciones, algunas de las cuales se detallan a continuación [27].

Tao When et al. [28] llevaron a cabo un estudio sobre un sistema de enfriamiento por desecante líquido, analizando el comportamiento de la corrosión y el rendimiento de regeneración de soluciones de formiato de potasio (KCOOH) y LiCl. Se examinó la corrosión del acero inoxidable 316L en ambas soluciones mediante pruebas electroquímicas. Los resultados indicaron que la velocidad de corrosión del acero inoxidable 316L en la solución de KCOOH fue significativamente más lenta que en la de LiCl, y el potencial de corrosión en KCOOH fue mayor que en LiCl.

Na Li et al. [29] realizaron un estudio de corrosión en un sistema de refrigeración por absorción de una sola etapa, impulsado por energía solar, utilizando una mezcla cuaternaria de $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ sobre acero inoxidable 316L, aplicando el método de pérdida de peso. Los resultados revelaron una velocidad de corrosión

muy baja, de 1.67 $\mu\text{m/año}$, sin evidencias de corrosión local, lo que la hace adecuada para aplicaciones prácticas.

M. Kaneko et al. [30] investigaron la formación de picaduras en acero inoxidable en soluciones de bromuro y cloruro, afirmando que, para un acero inoxidable austenítico sin molibdeno, el potencial de picaduras es mayor en soluciones de LiBr en comparación con LiCl. El potencial de picaduras aumenta con la relación de iones Br/Cl en las soluciones. Además, la velocidad de disolución activa del acero inoxidable en soluciones de cloruro saturadas de iones fue aproximadamente 300 veces mayor que en soluciones saturadas de Br. Por otro lado, el acero inoxidable ferrítico mostró una mejor resistencia a la picadura en soluciones de bromuro en comparación con las de cloruro, aunque esta tendencia se invirtió con un contenido de molibdeno superior al 5 y 10%.

A. Igual et al. [31] llevaron a cabo un estudio sobre la corrosión en aceros inoxidables austeníticos y dúplex en soluciones de H_2O -LiBr a diferentes temperaturas. Los resultados mostraron que, al aumentar la temperatura, los valores del Potencial a circuito abierto se desplazan hacia valores más negativos en las tres aleaciones estudiadas. La aleación austenítica con menor contenido de molibdeno y níquel mostró una mayor corrosión en soluciones de alta concentración de bromuro. También se reportó que los aceros inoxidables presentan una excelente resistencia a la corrosión en soluciones de LiBr a temperatura ambiente, aunque su resistencia disminuye considerablemente a temperaturas superiores a 50°C. En el caso del acero inoxidable dúplex, su resistencia a la corrosión por picaduras mejora considerablemente; sin embargo, una vez que la corrosión se inicia, no se detiene.

Mariano et al. [32] demostraron que los aceros inoxidables sufren corrosión por picadura en soluciones de todos los haluros, excepto en los fluoruros, que son el anión de un ácido débil. La corrosión por picaduras sigue el orden $\text{Cl} > \text{Br} > \text{I}$ para aceros inoxidables con contenido de Molibdeno inferior al 3% en peso. Los iones de haluro afectan las propiedades de la película pasiva; el acero inoxidable austenítico sensibilizado sufre corrosión por tensión en soluciones de todos los haluros, siendo

los cloruros los más agresivos. La ruptura de la pasividad de los aceros inoxidable en soluciones de yoduro requeriría potenciales excesivamente altos, y los yoduros son inestables en presencia de oxígeno disuelto, reaccionando con él para producir yodatos y yodo. Por tanto, los yoduros actúan como inhibidores para la corrosión bajo tensión en aceros inoxidable en entornos de bromuros y cloruros.

CAPITULO 2

2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA, JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS E HIPÓTESIS.

2.1. Planteamiento de problema.

La corrosión es uno de los mayores problemas económicos de la industria. Las pérdidas anuales se estiman en torno al 3,5% del producto nacional bruto en los países industrializados.

Como se ha mencionado los sistemas ABR depende en gran medida de las características químicas y termodinámicas del fluido de trabajo. Dentro de los compuestos estudiados recientemente se encuentra LiCl y LiBr. Sin embargo, estos pueden generar efectos no deseados en los materiales de construcción de los sistemas ABR, los cuales normalmente son: aceros al carbón, aceros inoxidables, aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre y titanio, generando degradación de estos por corrosión.

2.2. Justificación.

Los metales y sus aleaciones en la mayoría de las ocasiones son atacados por el ambiente en el que se encuentran, el cual funciona como electrolito generando un proceso de degradación que se conoce como corrosión, este proceso sucede a partir de reacciones electroquímicas. Todos los procesos comerciales diseñados para funcionar de manera continua tienen fallas prematuras por corrosión, incluidos los sistemas ABR donde el fluido refrigerante funciona como electrolito. Las fallas generadas por la interacción del fluido con el material de construcción pueden significar paros y operaciones de mantenimiento costosas.

Si bien la mayoría de los inhibidores de corrosión son efectivos, su naturaleza química les confiere una alta persistencia, escasa o nula degradabilidad, y en muchos casos, una alta toxicidad. Por esta razón, los inhibidores de corrosión de origen orgánico-sintético no se consideran soluciones a largo plazo. El uso extendido y prolongado de estos inhibidores de origen orgánico-sintético ha tenido un impacto ambiental significativo, lo que ha llevado a intensificar la búsqueda de nuevas alternativas. Estas alternativas buscan reducir la velocidad de corrosión de los materiales metálicos y, al mismo tiempo, ser amigables con el medio ambiente."Los aspectos anteriores han motivado, desde hace dos décadas,

diversas investigaciones y estudios de fuentes naturales como inhibidores de la corrosión. Se han estudiado diversas plantas en distintas formas de aplicación, como polvos, aceites esenciales, infusiones acuosas y extractos orgánicos, así como la actividad inhibitoria de la corrosión de frutas, semillas, condimentos, hojas y raíces.

Por esta razón, el extracto de la semilla de *Phalaris canariensis* (alpiste), que contiene antioxidantes presentes en otros inhibidores derivados de plantas, se presenta como un candidato prometedor para ser investigado como un inhibidor de la corrosión natural y amigable con el medio ambiente, para la protección del acero 316L en un medio de LiCl/ H₂O.

2.3. Objetivo general.

Determinar el efecto inhibitorio que tiene el extracto de la semilla de *Phalaris canariensis* sobre la corrosión del acero 316L en la solución LiCl/H₂O.

2.3.1. Objetivos específicos.

- Extraer el aceite de la semilla de *Phalaris canariensis* por el método Soxhlet.
- Caracterizar químicamente el extracto de *Phalaris canariensis* mediante Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y cromatografía de gases acoplado a espectroscopia de masas (GC-MS).
- Determinar mediante las técnicas gravimétricas y electroquímicas la eficiencia de inhibición del extracto de *Phalaris canariensis* a las concentraciones de 5,10,25,50 y 100 ppm en la solución de LiCl/H₂O.
- Caracterizar las muestras corroídas en ausencia y presencia del inhibidor mediante Microscopio electrónico de barrido (SEM).

2.4. Hipótesis.

El inhibidor a base del extracto de la semilla de *Phalaris canariensis* disminuirá la velocidad de corrosión en el acero 316L en una solución de LiCl-H₂O.

CAPITULO 3

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1. Corrosión.

La corrosión se define como la degradación de un material debido a la acción del entorno en el que se encuentra. Esta degradación resulta de las interacciones entre el material y el ambiente bajo condiciones específicas de exposición [33].

Los fenómenos de corrosión pueden clasificarse de acuerdo con muy variados criterios. Por la morfología del ataque: ataque uniforme, ataque localizado. Por el medio atacante: corrosión por ácidos, por sales fundidas, corrosión atmosférica, corrosión de estructuras enterradas, etc. Por las acciones físicas que junto con las químicas motivan el deterioro del metal: corrosión bajo tensión, fatiga con corrosión, corrosión por cavitación, corrosión por corrientes vagabundas, etc. Por los mecanismos de reacción, la oxidación directa y la corrosión electroquímica [34].

3.1.1. Clasificación de la corrosión.

- **Por la morfología.**

Corrosión uniforme.

En la corrosión uniforme, el ataque se extiende de manera homogénea sobre toda la superficie metálica, resultando en una penetración media aproximadamente igual en todos los puntos [35].

Corrosión localizada.

La corrosión localizada es una de las formas más peligrosas de corrosión, ya que es menos predecible que la corrosión uniforme y puede tener graves consecuencias, como fallas estructurales totales o catastróficas. Todas las formas de corrosión general que dan lugar a superficies no uniformes se consideran corrosión localizada [36].

Corrosión por picadura.

La corrosión por picadura se caracteriza por la pérdida localizada de material, que se propaga internamente formando pequeños túneles. Este tipo de corrosión suele avanzar con rapidez debido a que las velocidades de corrosión en las zonas afectadas son elevadas [37].

Corrosión intergranular.

La corrosión intergranular ocurre en los límites de grano y áreas adyacentes de aleaciones o metales, resultando en la desintegración del material y pérdida de resistencia. Las impurezas presentes en los límites de grano suelen ser las más afectadas por este tipo de corrosión [38].

Corrosión galvánica.

La corrosión galvánica se produce cuando un metal o aleación está eléctricamente acoplado a otro metal o material no conductor en el mismo electrolito. En este proceso, el metal más activo se corroe más rápidamente, actuando como ánodo, mientras que el metal más noble se convierte en cátodo, generando así un flujo de corriente [39].

- **Mecanismos de reacción.**

Oxidación directa.

Este proceso implica reacciones químicas en las que el material interactúa con un medio no electrolito [40]. Generalmente, este mecanismo se presenta en metales a altas temperaturas, en las cuales no hay presencia de agua en estado líquido. Se produce una oxidación uniforme de toda la superficie del metal, caracterizada por la pérdida de electrones [41].

Corrosión electroquímica.

Este proceso ocurre en un medio líquido o húmedo, donde la superficie metálica experimenta dos reacciones electroquímicas que tienen lugar en distintas áreas: los ánodos y los cátodos locales. Estas reacciones, al considerarse en conjunto, constituyen el proceso global de corrosión [42].

3.2. Métodos de protección anticorrosiva.

Actualmente, existen diversos métodos para controlar, reducir y prevenir la corrosión metálica. Sin embargo, ninguno de estos métodos puede eliminarla por completo. Los enfoques más utilizados en la protección contra la corrosión son:

- Recubrimientos anticorrosivos
- Protección catódica
- Protección anódica
- Inhibidores de corrosión [37].

3.2.1. Recubrimiento anticorrosivos.

Metálicos: Los recubrimientos metálicos se aplican en capas finas para aislar el metal del ambiente corrosivo, funcionando como ánodos de sacrificio que se corroen en lugar del metal subyacente. Un ejemplo común es el galvanizado [44]. Puede lograrse recubrimientos metálicos por medio de la electrodeposición de metales como el cobre, níquel, zinc, cromo, estaño, etc. [45].

Orgánicos: Los recubrimientos orgánicos, que incluyen polímeros y resinas naturales o sintéticas, se aplican como líquidos que se secan o endurecen en finas películas sobre el material base. Las pinturas son un ejemplo típico de recubrimientos orgánicos [44].

Inorgánicos: Los recubrimientos inorgánicos ofrecen acabados lisos y duraderos. Entre los más utilizados se encuentran el vidrio y los cerámicos [44].

3.2.2. Protección catódica.

Los principales métodos para detener o mitigar la corrosión de estructuras metálicas enterradas son el uso de recubrimientos protectores y la protección catódica. Los recubrimientos protectores ayudan a reducir la superficie expuesta de la estructura al ambiente corrosivo [46]. La protección catódica, por su parte, consiste en ajustar el potencial electroquímico de la estructura para mantenerlo por debajo de su potencial normal de reducción, logrando así una velocidad de corrosión aceptablemente baja [47-49].

Este ajuste se realiza suministrando una cantidad específica de corriente a la estructura, conocida como densidad de corriente de protección (i_{cp}), mediante dos métodos principales:

- **Ánodos de sacrificio (SACP):** En este método, se utilizan metales más activos como ánodos, que se corroen "sacrificándose" en lugar del metal que se desea proteger, el cual actúa como cátodo. Los ánodos de sacrificio más comunes son aleaciones de magnesio, zinc o aluminio. El zinc y el aluminio son especialmente eficaces en aplicaciones marinas debido a su rendimiento óptimo en presencia de iones de cloruro. Por otro lado, los ánodos de magnesio tienen una eficiencia inferior al 50% y se utilizan en aplicaciones con alta resistividad del medio o en agua dulce [50].
- **Corriente impresa (ICCP):** En este método, la corriente de protección proviene de una fuente externa de corriente continua. El polo negativo de la fuente se conecta al metal a proteger, mientras que el polo positivo se conecta a un ánodo auxiliar inerte, que actúa como dispersor de corriente, cerrando el circuito a través del electrolito [51].

3.2.3. Protección anódica.

La protección anódica es un método de protección electroquímica contra la corrosión que se basa en la capacidad de pasar un metal, que normalmente se encuentra en estado activo, a un estado pasivo mediante la polarización anódica.

Este proceso se logra mediante una fuente externa que impone un potencial de protección previamente seleccionado [52].

Este método es aplicable a materiales metálicos que pueden volverse pasivos en el entorno corrosivo en el que se encuentran. Es decir, se aplica a aquellos materiales que pueden alcanzar un estado de alta resistencia a la corrosión bajo condiciones en las que, de otro modo, el ataque corrosivo sería termodinámicamente posible. La protección se basa en inhibir el proceso anódico y, por ende, ralentizar la corrosión [52].

Para que este método sea efectivo, es crucial mantener el potencial del material dentro de la región pasiva. Si el potencial se encuentra fuera de esta región, la velocidad de disolución del metal puede aumentar significativamente, comprometiendo la pasividad y, en consecuencia, permitiendo el paso a un estado activo o la aparición de picaduras debido a la transpasividad [52].

La principal limitación de la protección anódica es que solo es aplicable a metales y aleaciones que pueden pasivarse en el medio en cuestión. Sin embargo, en la práctica, esta restricción no es tan significativa como podría parecer inicialmente, ya que la mayoría de los materiales estructurales modernos pueden pasivarse bajo condiciones específicas. Muchos reactivos químicos altamente agresivos, como ciertos ácidos fuertes, pueden formar capas pasivantes sobre diversos metales y aleaciones industriales en un amplio rango de potenciales. Por lo tanto, la protección anódica se considera uno de los métodos más efectivos para prevenir la corrosión en tales sistemas [53].

3.2.4. Inhibidores de corrosión.

Los inhibidores de corrosión son sustancias químicas que, al añadirse a un medio corrosivo, ralentizan o detienen el proceso de corrosión [34]. Estas sustancias se introducen en concentraciones muy bajas del orden de partes por millón (ppm), para evitar impactos negativos en el medio ambiente, y su objetivo es reducir la velocidad de corrosión del metal [54]. La incorporación del inhibidor se realiza en dosis muy

bajas, típicamente en el rango de 10 a 1000 ppm para la inyección continua, y de 1 a 20% en volumen para el tratamiento por lotes. Es importante tener en cuenta que tanto el tipo como la cantidad de inhibidor de corrosión están estrechamente relacionados con el grado de corrosividad del fluido [55].

Los inhibidores actúan disminuyendo la velocidad de corrosión mediante varios mecanismos, como el ajuste de las reacciones anódicas y catódicas, la reducción de la velocidad de difusión de los reactantes en la superficie del metal y la disminución de la resistencia eléctrica de dicha superficie [56].

Algunos inhibidores se adsorben protegiendo la superficie metálica, mediante la formación de una película que retarda el proceso de corrosión e incrementa el comportamiento de la polarización anódica y catódica, reduciendo el movimiento o difusión de los iones hacia la superficie metálica incrementando la resistencia eléctrica de la superficie metálica. Además, tiene alta afinidad o polarización hacia el metal, esto quiere decir que se va a adsorber [57].

Existen diferentes tipos de inhibidores de corrosión que actúan según su composición. Entre ellos, los inhibidores inorgánicos suelen ser sales cristalinas como cromato de sodio, fosfato y molibdato. Por otro lado, los inhibidores orgánicos, que se utilizan frecuentemente en sistemas de enfriamiento, son a menudo de tipo anódico e incluyen compuestos como sulfatos de sodio y fosfatos. Estos inhibidores orgánicos protegen el metal formando una película hidrofóbica en su superficie, que se adhiere por adsorción en función de la carga iónica del inhibidor y la carga de la superficie del metal. Los inhibidores orgánicos crean una barrera molecular que bloquea las reacciones anódicas y catódicas, que se originan en micro celdas electroquímicas sobre el metal debido al medio acuoso [58].

3.2.4.1. Clasificación de inhibidores.

Los inhibidores de la corrosión pueden clasificarse atendiendo a diversos criterios, algunos de las más usuales se indican seguidamente [59]:

A. Atendiendo a su mecanismo de actuación:

- Inhibidores anódicos
- Inhibidores catódicos
- Inhibidores mixtos
- Inhibidores de adsorción

B. Atendiendo su composición química

- Inhibidores orgánicos
- Inhibidores inorgánicos

C. Atendiendo su aplicación:

- Inhibidores en fase de vapor
- Inhibidores de decapado
- Inhibidores para soluciones alcalinas
- Inhibidores par soluciones de cloruros
- Inhibidores para agua potable
- Inhibidores para agua de calderas
- Inhibidores para productos petrolíferos
- Inhibidores para pinturas
- Inhibidores para hormigón armado
- Inhibidores para grasas y aceites
- Inhibidores para anticongelantes

Inhibidores anódicos.

Estos inhibidores aumentan la polarización del ánodo al promover la formación de una capa pasiva de productos de corrosión. Aunque el efecto inicial puede ser depolarizador, estos inhibidores también se conocen como pasivantes o pasivadores. La capa pasiva generada depende de la naturaleza del inhibidor y de las condiciones termodinámicas [59].

Inhibidores catódicos.

Los inhibidores catódicos incrementan la polarización del cátodo mediante diversos mecanismos [59]:

- Dificultando la descarga de iones H^+ en medios ácidos o la formación de hidrógeno en medios básicos.
- Reaccionando con el oxígeno disuelto, lo que impide la formación de hidróxidos necesarios para la producción de productos de corrosión con el metal.
- Reduciendo las reacciones catódicas mediante el depósito de productos insolubles.

Inhibidores mixtos.

Los inhibidores mixtos tienen la capacidad de inhibir simultáneamente las reacciones anódicas y catódicas [59].

Inhibidores de adsorción.

Estos inhibidores son compuestos orgánicos, generalmente con cadenas largas y grupos laterales, que se adsorben en la superficie metálica. Pueden actuar mediante los siguientes mecanismos [59]:

- Aumentando el sobrepotencial de hidrógeno en las zonas catódicas.
- Dificultando la difusión del oxígeno a través de la capa formada.
- Impidiendo la difusión de iones metálicos.

3.2.4.2. Obtención de inhibidores de corrosión.

Las principales vías para obtener inhibidores de corrosión incluyen:

- *Síntesis orgánica:* Se refiere a la producción de sustancias individuales comunes mediante procesos químicos dirigidos.

- *Productos y subproductos industriales*: Estos pueden ser utilizados tal como se generan en la industria, o tras sufrir algunas modificaciones.
- *Mezclas de productos*: Consiste en combinar sustancias seleccionadas para lograr un efecto sinérgico entre ellas.
- *Extractos de plantas*: Conocidos como inhibidores verdes, estos se obtienen a partir de extractos vegetales [60].

3.3. Inhibidores verdes.

Uno de los principales problemas asociados con los inhibidores orgánicos sintéticos es su impacto ambiental, que puede incluir toxicidad, problemas de biodegradación y bioacumulación. La creciente preocupación por la sostenibilidad ha llevado a la implementación de estrictas regulaciones ambientales, impulsando a los investigadores a buscar materiales y procesos más ecológicos. En este contexto, los productos naturales extraídos de fuentes vegetales y algunos compuestos orgánicos no tóxicos, que contienen moléculas polares como nitrógeno, oxígeno, azufre y fósforo, han demostrado ser efectivos como inhibidores en diversos sistemas de corrosión [61].

La interacción entre los grupos funcionales de los inhibidores y la superficie metálica, así como los heteroátomos presentes, juega un papel crucial en la inhibición de la corrosión. Los pares de electrones libres en los heteroátomos, como nitrógeno, oxígeno, azufre y fósforo, facilitan la transferencia de electrones hacia el metal, formando enlaces covalentes coordinados [62].

En general, los inhibidores orgánicos interactúan con la superficie del metal a través de dos mecanismos principales: quimisorción y fisisorción. La quimisorción implica una interacción química entre el inhibidor y la superficie metálica, que protege las zonas anódicas al formar enlaces químicos con el metal. Este proceso interferirá con la disolución metálica al transferir o compartir cargas entre el inhibidor y los átomos metálicos. Las moléculas quimisorbidas, debido a su enlace químico, tienden a permanecer en la superficie por un tiempo prolongado y participan en

ciclos de adsorción/desorción, mostrando características como un alto calor de adsorción, persistencia y especificidad [58].

Por otro lado, la fisisorción o adsorción física es típica de moléculas orgánicas, aniones y cationes cargados eléctricamente. Se basa en la atracción electrostática entre el metal y la especie orgánica, con las moléculas unidas a la superficie metálica mediante fuerzas de Van der Waals. Este tipo de adsorción bloquea los sitios catódicos en el metal, ralentizando así la reacción catódica. Además, los grupos polares de la molécula pueden formar enlaces con el metal, mientras que el extremo no polar se orienta hacia afuera, creando una barrera que repele las especies corrosivas y protege la superficie metálica [62].

La estructura electrónica de las moléculas de inhibidor orgánico determina la densidad electrónica de los grupos funcionales y su capacidad para adsorberse sobre la superficie metálica. Según algunos autores [63], el mecanismo de inhibición de ciertos compuestos orgánicos se basa en el bloqueo de los sitios activos en la superficie, que pueden ser catódicos o anódicos, dependiendo de la naturaleza del inhibidor y su afinidad por procesos específicos (oxidación o reducción) o ambos (inhibidor mixto) [64].

Recientemente, los extractos de plantas se han identificado como una valiosa fuente de compuestos químicos naturales. Gracias a su estructura química, estos compuestos pueden ser extraídos mediante procedimientos simples y de bajo costo, lo que los convierte en inhibidores efectivos para diversos procesos [65].

Las principales características que deben poseer los inhibidores son:

- Alta eficiencia en la protección de aceros y otras aleaciones.
- Buena solubilidad en las fracciones de agua utilizadas para preparar soluciones inhibidoras.
- Buena estabilidad, lo que garantiza que el inhibidor pueda ser almacenado durante al menos un año sin perder sus propiedades esenciales.
- Inocuo para el proceso tecnológico, sin causar efectos negativos en su funcionamiento.

- No tóxico y sin impacto perjudicial sobre el medio ambiente [66].

Varias investigaciones han descrito el uso de extractos de plantas. Janaina Cardozo de Rocha et al [67] analizaron extractos de mango, naranja, pasiflora o maracuyá y cáscara de nueces de la india, como inhibidores de corrosión en acero al carbón, aplicando curvas de polarización, impedancia electroquímica y pérdida de masa para su estudio. La eficiencia de inhibición incrementa conforme aumenta la concentración del extracto y disminuye al aumentar la temperatura. El comportamiento de eficiencia presentaba la siguiente tendencia: nuez<mango<pasiflora<naranja.

En su investigación M. Rana, S. Joshi y J. Bhattarai [68] investigaron el efecto inhibidor de la corrosión de varios extractos de plantas como la *Areca catechu*, *Laurus nobilis* y *Catharanthus roseus* sobre el acero dulce en una solución de NaCl 0,5 M al aire libre, utilizando pruebas de inmersión, mecanismos de inhibición y mediciones del potencial de corrosión. La velocidad de corrosión del acero disminuyó al aumentar la concentración de los extractos hasta 2000 ppm. Se descubrió que el extracto de la planta *Catharanthus roseus* era el inhibidor más eficiente entre los tres extractos utilizados en este estudio.

Subir P. y Ishita Koley [69] desarrollaron una investigación con la semilla de Papaya en acero al carbono en medio ácido. En el caso de las semillas de papaya, se ha observado que los residuos vegetales provenientes de estas semillas actúan como inhibidores ecológicos altamente efectivos para prevenir la corrosión ácida del acero de construcción con bajo contenido de carbono. El estudio se llevó a cabo en soluciones de ácido sulfúrico (H_2SO_4) con concentraciones que varían de 0,5 a 3 N. Los resultados indican que a medida que aumenta la concentración del inhibidor, la tasa de degradación del acero disminuye. Sin embargo, existe una concentración óptima en la que el efecto inhibidor es máximo; más allá de esta concentración, la velocidad de corrosión vuelve a incrementarse.

3.4. Isotermas de adsorción.

Describir el efecto de los inhibidores de corrosión resulta complejo debido a la amplia variedad de enfoques presentes en la literatura. Estos enfoques abarcan desde la evaluación de la eficiencia de inhibición hasta el uso de técnicas avanzadas de modelado molecular para entender las interacciones entre el inhibidor, la superficie metálica y los productos de corrosión [70].

Un enfoque común asume que la protección contra la corrosión se logra mediante la adsorción de moléculas de inhibidor en la superficie metálica, lo que disminuye la velocidad de una o ambas reacciones electroquímicas involucradas en el proceso corrosivo. En este contexto, se considera que el grado de protección es directamente proporcional al nivel de cobertura proporcionado por el inhibidor (θ). Para establecer la relación entre θ y la concentración del inhibidor en el medio, se utilizan isothermas de adsorción [71]. Estas isothermas ofrecen información valiosa sobre el mecanismo de inhibición y la naturaleza de las interacciones entre el metal y el inhibidor [72].

La fuerza de adsorción se determina a partir de la isoterma de adsorción, que muestra la relación de equilibrio entre la concentración del inhibidor en la superficie y en la solución. Para describir este equilibrio, se han propuesto varias isothermas de adsorción, como las de Langmuir, Frumkin, Bockris-Swinkels, Temkin y Freundlich [73].

Es importante destacar que estas isothermas suponen la adsorción de una sola monocapa de inhibidor sobre la superficie, excluyendo la formación de películas de múltiples capas [70]. A continuación, se presentan las distintas isothermas y sus respectivas expresiones matemáticas:

Isoterma de Adsorción de Langmuir.

Esta isoterma describe cuantitativamente la formación de una monocapa de adsorbato en la superficie del adsorbente. Langmuir representa la distribución de equilibrio de iones metálicos entre las fases sólida y líquida, asumiendo que todos los sitios de adsorción son idénticos y energéticamente equivalentes. El modelo se basa en la premisa de que cada sitio de adsorción puede contener una sola

molécula de adsorbato, sin interacción entre moléculas adsorbidas. En el caso de adsorción máxima, se forma únicamente una monocapa, ya que las moléculas de adsorbato no se acumulan sobre la monocapa previamente adsorbida [74].

Isoterma de Adsorción de Freundlich.

Esta isoterma se utiliza para describir la adsorción en superficies heterogéneas. Representa una adsorción superficial inicial seguida por un efecto de condensación debido a la fuerte interacción entre adsorbatos. La isoterma de Freundlich tiene una forma exponencial, indicando que el calor de adsorción generalmente disminuye a medida que aumenta el grado de adsorción. Esta disminución, que sigue una tendencia logarítmica, sugiere que los sitios de adsorción están distribuidos exponencialmente con respecto a la energía de adsorción. A diferencia de otras isotermas, la de Freundlich no establece un límite de adsorción cuando se alcanza una cobertura completa ($\theta = 1$) [75].

Isoterma de Adsorción de Temkin.

Esta isoterma incorpora un factor que considera explícitamente las interacciones entre el adsorbato y el adsorbente. Asume que el calor de adsorción disminuye con el aumento de la cobertura, y que esta disminución es más probable que sea lineal en lugar de logarítmica. Este modelo es útil para describir sistemas donde las interacciones adsorbato-adsorbente afectan significativamente el proceso de adsorción [76].

Isoterma de Adsorción de Frumkin.

La isoterma de Frumkin asume que la superficie del adsorbente no es homogénea, o que las interacciones laterales entre adsorbatos no son despreciables. Según este modelo, la dependencia del grado de cobertura sobre el potencial del electrodo se debe a cambios en la energía de la capacitancia de la doble capa, causada por la sustitución de agua por moléculas orgánicas con una constante dieléctrica menor [77].

Isoterma de Adsorción de Bockris-Swinkels.

Este modelo considera que, en una solución acuosa, la superficie del electrodo está cubierta por dipolos de agua que deben ser reemplazados por moléculas orgánicas durante la adsorción. La termodinámica del proceso de sustitución depende de la cantidad de moléculas de agua (n) que se eliminan por las moléculas orgánicas [72].

Tabla 1. Diferentes isothermas que pueden ser usadas para describir la adsorción del inhibidor sobre la superficie del metal [66].

Nombre	Isoterma	Grafico
Langmuir	$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C$	$\frac{C}{\theta}$ vs. C
Frumkin	$\left[\frac{\theta}{1-\theta} \right] e^{-2f\theta} = K_{ads}C$	$\log \left[C \left(\frac{\theta}{\theta-1} \right) \right]$ vs. $\log(C)$
Bockris-Swinkels	$\frac{\frac{\theta}{(1-\theta)^n} [\theta + n(1-\theta)^{n-1}]}{n^n} = \frac{Ce^{-K_{ads}}}{55.5}$	a vs. $\log(C)$
Temkin	$\exp(f\theta) = K_{ads}C$	θ vs. $\log(C)$
Freundluich	$\theta = K_{ads}C$	$\log(\theta)$ vs. $\log(C)$

Donde θ representa la fracción de la superficie cubierta a diferentes concentraciones de inhibidor, C (mol dm^{-3}) es la concentración del inhibidor, n es el número de moléculas de agua reemplazadas por las moléculas del inhibidor, y f es el parámetro de interacción del inhibidor. La constante de adsorción K_{ads} ($\text{dm}^3 \text{mol}^{-1}$) refleja la afinidad de las moléculas inhibidoras por los sitios de adsorción y está relacionada con la energía libre de Gibbs de la adsorción ΔG_{ads} (J mol^{-1}) a una temperatura constante. La relación se expresa de la siguiente manera [70]:

$$K_{ads} = \frac{1}{C_{solvente}} \exp \left(\frac{-\Delta G_{ads}}{RT} \right) \quad (1)$$

Donde:

R ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$) = Constante de los gases

T (K) = Temperatura

$C_{solvente}$ = Concentración molar del solvente

La energía libre de adsorción (ΔG°_{ads}) esta relacionada con la constante de adsorción y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta G^{\circ}_{ads} = -RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (2)$$

Donde:

R = Constante universal de los gases

T = Temperatura en Kelvin

EL valor 55.5 corresponde a la concentración molar del agua en solución.

3.5. Pruebas electroquímicas.

Como resultado de la corrosión, se modifican diversas propiedades de la muestra analizada, incluyendo el peso, la resistencia eléctrica, el flujo magnético, la reflectividad y la dureza. En respuesta a estos cambios, se han desarrollado técnicas experimentales para evaluar la velocidad de corrosión. Estas técnicas se dividen en dos categorías principales:

1. **Métodos físicos:** Incluyen técnicas gravimétricas, analíticas y volumétricas, que permiten medir los cambios en la geometría del material expuesto a la corrosión.
2. **Métodos electroquímicos:** Proporcionan información sobre los parámetros que afectan o son afectados por el medio corrosivo, así como sobre los productos generados por la corrosión. Estas técnicas electroquímicas son especialmente valiosas en la actualidad, ya que permiten determinar el mecanismo de corrosión en un entorno específico [38].

Ambos métodos están recomendados por la Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (NACE, por sus siglas en inglés: National Association of Corrosion Engineers). Entre ellas se encuentran métodos como la pérdida de peso, las curvas de impedancia, la polarización y la polarización lineal, que permiten obtener

parámetros de corrosión directamente relacionados con la cinética del proceso. Estas técnicas están detalladas en los estándares publicados por la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés: American Society for Testing and Materials) [38].

La información que proveen las técnicas de análisis de corrosión permite evaluar la eficiencia de un inhibidor de corrosión. En la Tabla 2, se describen algunas características relacionadas con las diversas técnicas empleadas para determinar el grado de corrosión generado sobre los metales [38].

Tabla 2. Características generales sobre las técnicas para el estudio de la corrosión [60].

Métodos	Ventajas	Desventajas
Físicos		
-<i>Gravimétricos</i>: medida de la pérdida de peso o ganancia de peso. -<i>Analíticos</i>: medida de la concentración de los componentes metálicos en la solución	-Medida directa de la corrosión.	-Tiempos muy largos de exposición, con resistencia a la corrosión elevados. -Determinación solo de valores integrales. -Seguridad y reproducibilidad relativamente bajas.
Electroquímicos		
A. Estacionarias		
-Método de intersección -Método de resistencia a la polarización	-Enorme seguridad y sensibilidad en las	-Perturbaciones del sistema estudiado por la polarización aplicada.

Curvas de polarización, potenciales críticos y curvas de potencial-tiempo.	medidas de potenciales y densidades de corriente. -Son rápidos y pueden arrojar información instantánea de velocidad de corrosión.	-Estimación indirecta de la corrosión, es necesario un contraste y conocimiento del mecanismo del proceso para interpretar resultados.
B. No estacionarias		
Técnicas de impedancia		
-Métodos de impulso -Ruido electroquímico -Métodos potenciodinámicos	-Una sola muestra provee información integral sobre la evolución del fenómeno de corrosión.	-Todos ellos son métodos aproximados; fiables si se aplican correctamente.

3.5.1. Potencial a circuito abierto (OCP: Open circuit potential).

La medición del potencial en circuito abierto (OCP, por sus siglas en inglés: Open Circuit Potential) es una técnica utilizada para monitorear la evolución temporal del potencial de un electrodo con respecto a un electrodo de referencia, ambos sumergidos en un electrolito específico, sin aplicar ningún potencial o corriente externa al sistema. Desde una perspectiva electroquímica, el OCP es crucial para identificar los cambios en la superficie del electrodo de trabajo en relación con el electrodo de referencia, permitiendo así evaluar su tendencia a corroerse.

En esta técnica, las variaciones en el potencial se deben exclusivamente a cambios en la interfaz entre el electrolito y el metal, por lo que es esencial que el electrodo de referencia sea altamente estable. Con el tiempo, el potencial tiende a estabilizarse. Generalmente, un incremento en el potencial indica la formación de una capa pasiva sobre el metal, que lo protege al aislarlo del medio circundante.

En términos generales, un mayor potencial de corrosión en circuito abierto de un metal sugiere un comportamiento más noble, lo que implica una menor tendencia a la corrosión [78].

3.5.2. Resistencia a la polarización lineal (LPR).

Consiste en la aplicación de un pequeño potencial (± 20 mV) alrededor del potencial de reposo o potencial de corrosión, para evitar alterar el sistema electroquímico. El objetivo de este procedimiento es determinar la Resistencia a la Polarización (R_p), que se calcula como la pendiente de la curva de Voltaje Aplicado vs. Corriente en la celda. Este valor es un parámetro útil en el cálculo de la velocidad de corrosión en los sistemas. Sin embargo, por sí solo, proporciona únicamente información cualitativa sobre la celda [79].

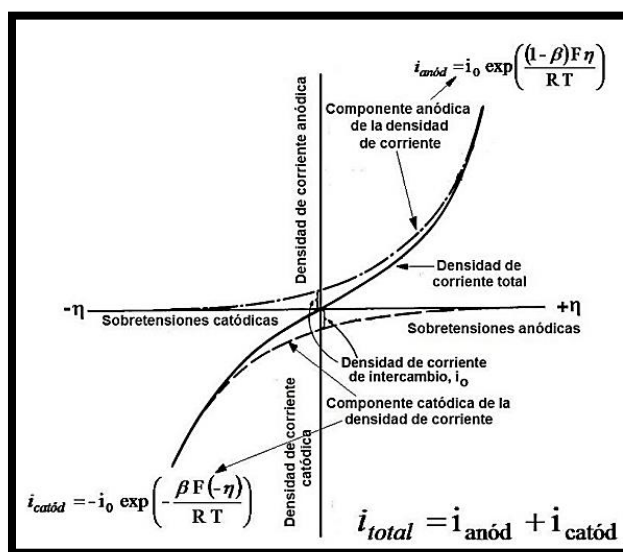


Figura 1. Resistencia de Polarización Lineal (LPR).

3.5.3. Curvas de polarización potenciodinámica.

Es similar a la prueba de Resistencia a la Polarización Lineal (LPR), pero en este caso, la excitación de voltaje se extiende entre ± 200 mV con respecto al potencial de reposo. La gráfica se presenta en una escala semilogarítmica, con la forma $\log I$ vs. V . El modelo utilizado para analizar los procesos de corrosión asume que las tasas de las reacciones anódicas y catódicas están controladas por la cinética de las reacciones de transferencia de electrones en la superficie del metal, que es el caso general para las reacciones de corrosión [80].

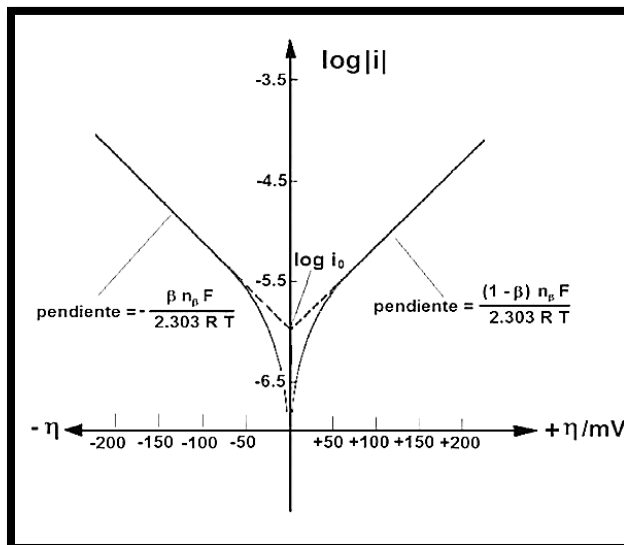


Figura 2. Curva de polarización (TAFEL).

3.5.3.1. Métodos para realizar las Curvas de Polarización.

La obtención experimental de curvas de polarización se puede realizar mediante varias técnicas:

- **Potenciostática:** Se mantiene constante el potencial aplicado y se mide la variación de la corriente que circula en el sistema.
- **Galvanostática:** Se mantiene constante la corriente que circula por el sistema y se mide la variación del potencial.
- **Potenciodinámica:** El potencial del sistema se varía de manera uniforme con el tiempo, y se registra el cambio correspondiente en la corriente del sistema.
- **Galvanodinámica:** La corriente que circula en el sistema se varía de manera uniforme con el tiempo, y se registra el cambio correspondiente en el potencial.

Conociendo que en el potencial de corrosión (E_{corr}) la suma de las corrientes anódicas es igual a la suma de las corrientes catódicas, se puede determinar la corriente de corrosión (I_{corr}) mediante el método de Extrapolación de Tafel.[81].

El cálculo de la velocidad de corrosión por el método de extrapolación de Tafel, se basa en la extrapolación lineal o de Tafel en un diagrama experimental E vs log i.

3.5.4. Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).

EIS: se aplica un estímulo de potencial sinusoidal de baja amplitud, realizándose un barrido discreto de frecuencias. La respuesta de corriente será asimismo sinusoidal, pero desfasada y con amplitud proporcional al módulo de la impedancia. [82]

Elemento resistivo Ley de Ohm

$$R = \frac{E}{I} \quad (3)$$

La relación se cumple para:

- El valor de R es independiente de la frecuencia
- Las señales AC de voltaje V e I están en fase al pasar por el elemento

Los sistemas reales contienen elementos que siguen un comportamiento más complejo, se utiliza como elemento general de circuito a la impedancia. La impedancia al igual que la resistencia representa la propiedad del circuito de resistir el pasaje de corriente. Al contrario de la resistencia no están limitadas por las propiedades expuestas en el párrafo anterior. [83]

EIS es medida normalmente utilizando excitaciones de potencial de baja amplitud (aprox. 10 mA). Bajo esta perturbación es de esperar que el sistema se comporte como pseudo – lineal.

Diagramas de Impedancia: Se entiende por respuesta de frecuencia de un circuito eléctrico al espectro formado por la variación de la impedancia en un barrido de frecuencia. Las representaciones más usuales de frecuencia de un sistema lineal son:

- Diagrama de Nyquist.
- Diagrama de Bode.

El diagrama de Nyquist, también conocido como diagrama de impedancia en el plano complejo, representa las curvas semicirculares o funciones compuestas por varios semicírculos. En este diagrama, se grafica el componente imaginario de la impedancia (Z'') frente al componente real de la impedancia (Z') para cada frecuencia a la que se aplicó una señal sinusoidal de voltaje. Esto resulta en una semicircunferencia sobre el eje de la resistencia [84].

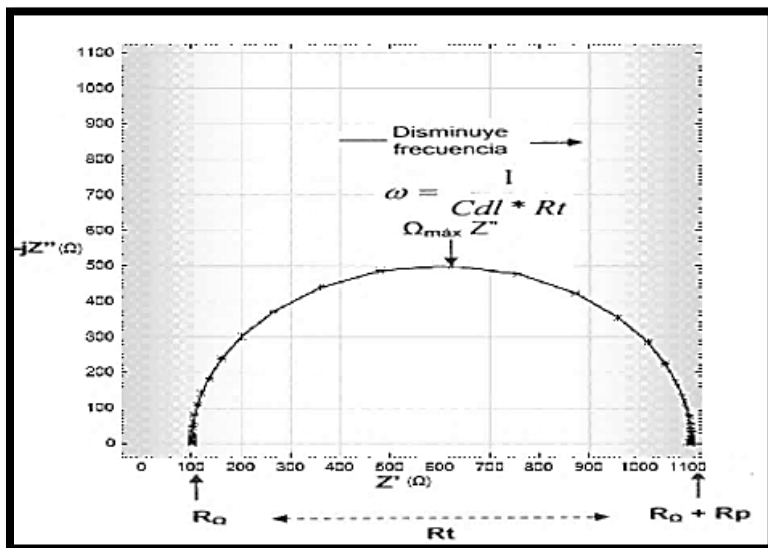


Figura 3. Diagrama Nyquist para un sistema electroquímico simple.

El diagrama de Bode muestra la variación de la impedancia real en función de la frecuencia, graficada en coordenadas log-log. En este diagrama, la presencia de resistencias en el circuito se manifiesta como mesetas horizontales, mientras que los capacitores se representan con pendientes negativas y los inductores con pendientes positivas [84].

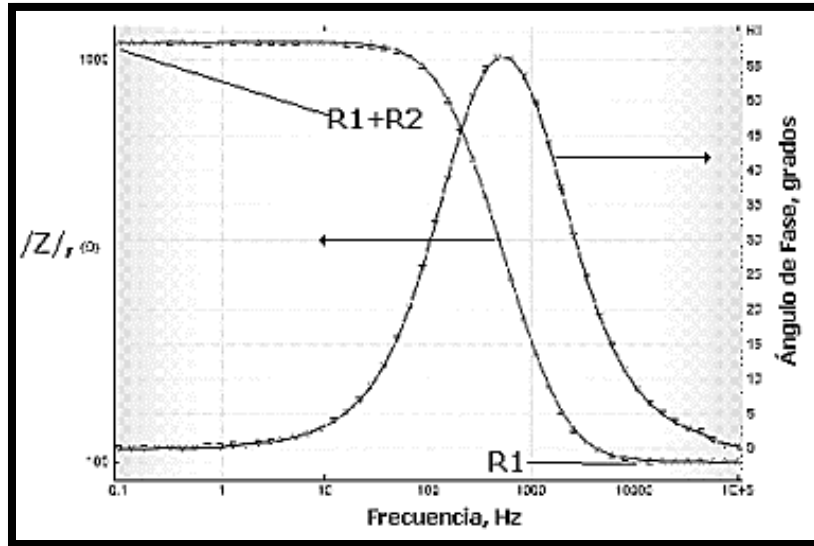


Figura 4. Diagrama de Bode para un sistema electroquímico simple.

3.5.5. Ruido Electroquímico (EN).

Esta técnica no destructiva se utiliza para monitorear procesos de corrosión sin requerir perturbaciones externas para analizar la señal generada por el proceso. Su objetivo principal es medir las fluctuaciones espontáneas del potencial y la corriente durante la corrosión [85].

La medición del Ruido electroquímico de potencial y corriente puede realizarse simultáneamente. El ruido de potencial se mide observando las fluctuaciones en el potencial de corrosión con respecto a un electrodo de referencia o a un electrodo nominalmente idéntico. Por otro lado, el ruido de corriente se obtiene midiendo las fluctuaciones de corriente entre dos electrodos idénticos. La medición simultánea de ambos tipos de ruido permite calcular la resistencia al ruido electroquímico utilizando la ley de Ohm y, mediante un análisis espectral, determinar la impedancia de ruido [86]. Esta resistencia se considera equivalente a la resistencia a la polarización.

Entre los métodos de análisis basados en la técnica de ruido electroquímico se incluyen el análisis de transitorios mediante series temporales, la Resistencia del Ruido (R_n), el Índice de Localización (IL), el análisis espectral del potencial y la

corriente, y la Impedancia del Ruido (Z_n), todos basados en el estudio del dominio de la frecuencia [85].

3.5.5.1. Dominio del tiempo.

Considera las fluctuaciones instantáneas de corriente o potencial en función del tiempo. El cual identifica los detalles que son características de un tipo de corrosión en particular, por ejemplo, la observación del aumento y disminución de fluctuaciones que son características de rompimiento y repasivación de la película pasiva por el proceso de corrosión localizada, ya sea por resquejio o por picadura.

En este caso los dos electrodos producirán la misma cantidad de ruido, provocando que la medición de la desviación estándar sea de veces mayor que la correspondiente a un solo electrodo [85].

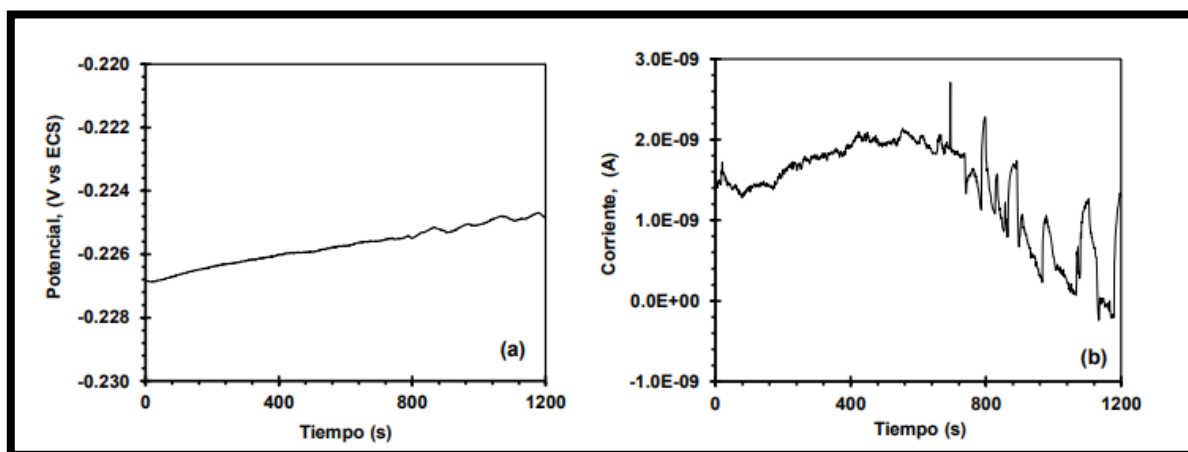


Figura 5. Transistores de potencial y corriente que pueden analizarse por medio de la técnica de RE.

3.5.5.2. Resistencia del Ruido (R_n).

El término de resistencia del ruido (R_n), fue definido en la década de los ochenta con la idea de complementar la información proporcionada por los registros de corriente y potencial. La resistencia del ruido se define como la relación de la desviación estándar del potencial (σ_E) y la desviación estándar de la corriente (σ_I), tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Rn = \frac{\sigma E}{\sigma I} \quad (4)$$

Finalmente, la Rn se multiplica por el área total expuesta. La Rn está relacionada con las pendientes de Tafel anódica y catódica según la ecuación de Stern-Geary, la diferencia entre la Rp es que en Rn el sistema se desplaza del equilibrio en forma espontánea, mientras que para calcular Rp es necesario polarizar con una señal externa [87].

3.5.5.3. Índice de Localización (IL).

Este método de análisis se encuentra relacionado con fenómenos de corrosión localizada y es otro de los parámetros estadísticos que se utiliza en el análisis y se define como la relación que existe entre la desviación estándar de la corriente σ_I y la raíz cuadrada media de la corriente [88].

$$IL = \frac{\sigma_I}{I_{rms}} \quad (5)$$

La clasificación para el índice de localización se encuentra en la norma ASTM G199, dichos parámetros se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación del tipo de corrosión con base en el IL.

Índice de Localización (IL)		Tipo de corrosión
Máximo	Mínimo	
1	0.1	Localizada
0.1	0.01	Mixta
0.01	0.001	Uniforme

3.5.5.4. Dominio de la frecuencia.

Impedancia del Ruido (Zn).

El estimado espectral es el proceso de cálculo de la potencia presente en varias frecuencias en un registro infinito de datos. Cuando se analizan las frecuencias

presentes en una señal compleja, se divide las potencias entre frecuencias. Existen dos métodos utilizados para la estimación del espectro en potencia en estudio de RE: La transformada de Fourier y el Método de Máxima Entropía. El primero produce un espectro ruidoso mientras que el segundo produce un espectro más liso, siendo ambos equivalentes.

Para aplicar este tipo de análisis se utiliza un artificio matemático que es la remoción de la tendencia o corrimiento en DC, usualmente en la forma de una sustracción de los datos mediante una regresión lineal. Posteriormente se aplica una función ventana para escoger secciones de la serie de tiempo (suponiéndola infinita) que quiere analizarse. La ventana reduce la extensión de las frecuencias a lo largo del espectro. Una vez realizado esto se aplica el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (TRF) o de máxima entropía (MME) para obtener el espectro (equivalente a la varianza) [89].

Para obtener el espectro de potencial de la impedancia se derivan los espectros de potencia de potencial y se dividen sobre los espectros de potencia de la corriente, para cada frecuencia medida y obteniendo la raíz cuadrada se deriva la densidad espectral o espectro de la impedancia de ruido electroquímico (Z_n), el cual es comparable a la impedancia electroquímica convencional para bajas frecuencias (menores a 1 Hz). Z_n mide el módulo de la impedancia electroquímica del sistema a muy bajas frecuencias. La impedancia del ruido, Z_n , permite obtener las velocidades de corrosión a partir de la ecuación análoga de Stern y Geary para Z_n , mostrada en la siguiente ecuación:

$$Z_n = \frac{\beta}{i_{corr}} \quad (6)$$

CAPITULO 4

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1. Obtención del extracto del *Phalaris Canariensis*.

4.1.1. Molienda y tamizado.

La semilla del *Phalaris canariensis* fue molida en un mortero con el objetivo de separar la cáscara. Se realizó la molienda de 4 kg de alpiste. Una vez realizada la molienda, se tamizó la semilla para llevar a cabo la separación de la cáscara y la semilla, previamente pulverizada. Se utilizó un tamiz de 0.40 mm, de donde se obtuvo solamente 400 g de la semilla pulverizada como muestra para la obtención del extracto.

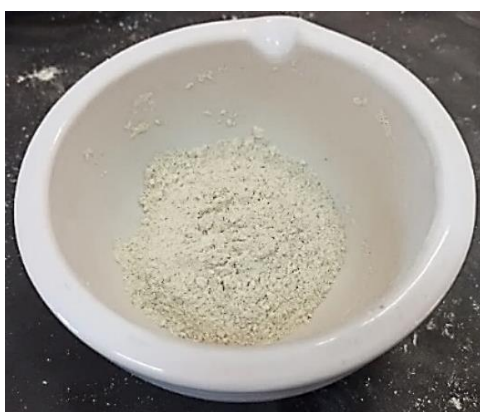


Figura 6. Semilla de alpiste tamizada.

4.1.2. Extracción Soxhlet.

Para la extracción se empleó el método Soxhlet, un proceso en el que el solvente permanece en contacto continuo con la muestra durante un período prolongado. El equipo Soxhlet consta de un tubo extractor con un sifón y una tubuladura lateral. Este tubo se conecta por su extremo inferior, mediante uniones esmeriladas, a un matraz de balón que contiene el solvente (hexano), mientras que en el extremo superior se ajusta un condensador vertical que actúa como refrigerante [42].

Dentro del tubo extractor se coloca un dedal o cartucho poroso que contiene la muestra, permitiendo la entrada del solvente y evitando la salida del sólido mediante un tapón de algodón. Es crucial que la muestra esté previamente seca para evitar que el agua interfiera con el solvente y altere la prueba [42].

El equipo se coloca en una fuente de calor a la temperatura de ebullición del solvente (hexano, con un punto de ebullición de 68.7°C). El hexano se evapora, asciende por la tubuladura lateral del tubo extractor, se condensa en el refrigerante y luego cae sobre la muestra, acumulándose en el tubo extractor. El solvente atraviesa las paredes porosas del dedal o cartucho, contacta con la muestra y solubiliza las grasas presentes. Cuando el nivel del solvente en el tubo extractor supera el nivel del sifón, el extractor se descarga, y el hexano que contiene la grasa extraída se transfiere al matraz de destilación. El ciclo de evaporación del solvente, condensación, caída sobre la muestra, acumulación y descarga se repite [42].

Una vez transcurrido el tiempo especificado para el proceso, el solvente se elimina del matraz por evaporación, utilizando un rotavapor. Al final, en el matraz de destilación queda únicamente el residuo lipídico extraído.



Figura 7. Equipo Soxhlet.



Figura 8. Extracto del *Phalaris canariensis*.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

4.2. Caracterización del extracto *Phalaris canariensis*.

Se llevaron a cabo los análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS) para la caracterización química del extracto de *Phalaris canariensis*. El análisis FTIR se realizó con un espectrómetro Nicolet 6700, abarcando la región espectral de 4000 a 500 cm^{-1} . Se realizaron 32 escaneos de la muestra y del fondo, utilizando apodización de Happ-Genzel y corrección de fase de Mertz. Para el análisis GC-MS, se empleó un sistema de Agilent Technologies, equipado con una columna capilar HP-5 ms (30 m, 0,25 mm de diámetro interior, 0,25 μm de grosor de película), acoplado a un espectrómetro de masas 5973 N como detector.

4.3. Preparación de probetas.

En esta fase, se construyeron 8 probetas de acero 316L para simular el material utilizado en los equipos de refrigeración por absorción.

4.3.1. Material.

Se usó el acero 316L, que es un material utilizado en los equipos de refrigeración por absorción. Este material presenta la composición química mostrada en la Tabla 4.

Tabla 4. Composición química del acero 316L.

Acero	%Cr	%Ni	%Mo	%Mn	%C	%P	%S	%Fe
316L	16-18	12-16	2-3	1.6	0.03	0.04	0.03	balance

El procedimiento para preparar las probetas fue el siguiente:

Se cortaron 8 barras de acero 316L de 10mm de diámetro y 12 mm de longitud. Se le realizó un orificio en la parte central a cada una de las 8 barras de acero, a las cuales se le introdujo a presión un pedazo de cable de cobre. Se utilizó resina para encapsular las barras de acero utilizando tubo de PVC como molde. Se espero dos



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

días para el secado total de las probetas a temperatura ambiente. Una vez secas las probetas, se llevó a cabo el desmoldado de cada una.

Por último, se pulieron las probetas con diferente papel esmeril de grado, (80, 100, 200, 500, 600, 1000, y 1200.), obteniendo una superficie donde la presencia de rayas no se convierta en generadores de corrosión. Esto garantiza una superficie limpia y homogénea, con un adecuado grado de preparación para el área del electrodo de trabajo.



Figura 9. Barras de acero 316L.

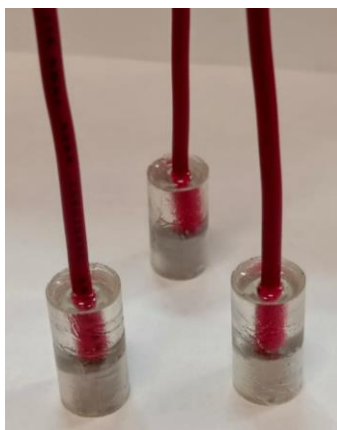


Figura 10. Probetas para pruebas.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

4.3.2. Electrolito.

Se utilizó una solución de LiCl al 35% peso y agua destilada (LiCl/H₂O) para simular el refrigerante que se utiliza en el sistema de refrigeración por absorción. Para cada prueba se utilizaron 30 mL de solución.

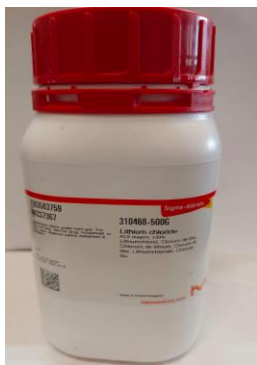


Figura 11. Solute utilizado para el electrolito.

4.3.2.1. Preparación de electrolito.

$$\text{Fracción másica} = \frac{g_{\text{solute}}}{\text{mL}_{\text{disolvente}} + g_{\text{solute}}} \quad (7)$$

$$\text{Fracción másica} = 0.35$$

$$\text{mL}_{\text{disolvente}} = 30 \text{ mL}$$

$$g_{\text{solute}} = 16.15 \text{ g}$$



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

4.3.3. Concentración del inhibidor.

Se consideran concentraciones de 5, 10, 25, 50, y 100 ppm en cada una de las pruebas realizadas, esto con el objetivo de tener un amplio campo de comparación del comportamiento entre cada prueba.

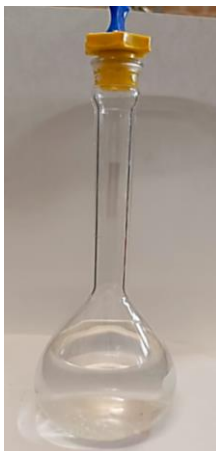


Figura 12. *Inhibidor aforado a 250 mL con hexano.*

4.3.3.1. Preparación de inhibidor.

Se redujo la concentración del inhibidor puro, en una relación de 5 gramos de inhibidor puro y 245 mL de hexano, y se calculó la cantidad en ppm.

$$ppm = \frac{g_{solute}}{mL_{solution}} * 1,000,000 \quad (8)$$

$$ppm = \frac{0.5g}{250 \text{ mL}} * 1,000,000 = 2,000 \text{ ppm}$$



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Para una dosis de:

- 5 ppm

$$mL_{\text{inhibidor}} = \frac{5 \text{ ppm} * 250mL}{2,000 \text{ ppm}} = 0.625 \text{ mL}$$

- 10 ppm

$$mL_{\text{inhibidor}} = \frac{10 \text{ ppm} * 250mL}{2,000 \text{ ppm}} = 1.25 \text{ mL}$$

- 25 ppm

$$mL_{\text{inhibidor}} = \frac{25 \text{ ppm} * 250mL}{2,000 \text{ ppm}} = 3.125 \text{ mL}$$

- 50 ppm

$$mL_{\text{inhibidor}} = \frac{50 \text{ ppm} * 250mL}{2,000 \text{ ppm}} = 6.25 \text{ mL}$$

- 100 ppm

$$mL_{\text{inhibidor}} = \frac{100 \text{ ppm} * 250mL}{2,000 \text{ ppm}} = 12.5 \text{ mL}$$

4.3.3.2. Cálculo de la eficiencia de inhibidores de la corrosión.

El objetivo de este estudio es evaluar la eficiencia del inhibidor de corrosión en la protección contra la corrosión. Para ello, se medirán las velocidades de corrosión de muestras de acero 316L en presencia del inhibidor, y se comparará con la velocidad de corrosión (expresada en pérdida de peso) de muestra en ausencia de inhibidor (conocida como en blanco o referencia).

El procedimiento para evaluar la eficiencia del inhibidor es el siguiente:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

1. Se sumergirán las probetas en una solución de LiCl al 35% peso durante 24 horas.
2. Se medirán las velocidades de corrosión de las probetas con y sin inhibidor.

La eficiencia de protección de un inhibidor ($E.I.$) se calculará utilizando la siguiente fórmula:

$$\%E.I. = \frac{V_{corr_{sin\ inhibidor}} - V_{corr_{con\ inhibidor}}}{V_{corr_{sin\ inhibidor}}} * 100 \quad (9)$$

Donde:

- V_{corr} con inhibidor: velocidad de corrosión de la muestra con inhibidor.
- V_{corr} en blanco: velocidad de corrosión del blanco.

Una eficiencia de protección del 100% indica que el inhibidor ha detenido completamente la corrosión. En cambio, una eficiencia de protección inferior al 100% sugiere que el inhibidor ha brindado cierto grado de protección, pero no ha eliminado completamente la corrosión.

La velocidad de corrosión puede expresarse en diferentes unidades: en términos de velocidad de penetración, como milésimas de pulgada por año; en unidades del Sistema Internacional (SI), como milímetros por año (mm/año); o en términos de cinética electroquímica, en amperios por metro cuadrado (A/m²). La fracción del metal cubierta por el inhibidor, θ , está definido por la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{E.I.}{100} \quad (10)$$



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

4.3.4. Arreglo experimental.

Las pruebas electroquímicas se llevan a cabo en un Potenciostato/Galvanostato marca GAMRY INTERFACE 1010. Cada celda consta de tres electrodos: de referencia cloruro de plata, auxiliar de grafito y el de trabajo el acero 316L.

La celda electroquímica se prepara de la siguiente manera: una sin extracto, esta se usa como testigo, las demás son con adición de 0, 5, 10, 25, 50 y 100 ppm de extracto, respectivamente. Cada evaluación se realizó por duplicado. Las pruebas se llevaron a cabo a 25°C.



Figura 13. Celda electroquímica.



Figura 14. Potenciostato/Galvanostato GAMRY INTERFACE 1010.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

4.3.5. Parámetros experimentales.

Las condiciones de las pruebas realizadas fueron las siguientes:

- i. Espectrometría de Impedancia Electroquímica
 - Barrido de 0.01 a 100,000 Hz, con amplitud de 0.01 V.
- ii. Curvas de polarización potenciodinámicas
 - Barrido de 0.005 V/s, desde -1000 hasta +1000 con respecto al potencial de corrosión (E_{corr}).
- iii. Resistencia a la polarización Lineal
 - Voltaje aplicado ± 0.015 V con respecto a E_{corr} a una velocidad de 0.005 V/s.
- iv. Potencial de circuito abierto
 - Tiempo total 3600 s
- v. Ruido electroquímico
 - 1024 lecturas por prueba midiendo ruido en potencial y en corriente en forma simultánea.

4.4. Pruebas electroquímicas.

4.4.1. Primera etapa de mediciones electroquímicas.

La primera etapa de mediciones electroquímicas se evaluó con una celda convencional de 3 electrodos. El electrodo de referencia fue el electrodo de plata-cloruro de plata (Ag/AgCl), el electrodo auxiliar una barra de grafito y el electrodo de trabajo la muestra de acero 316L (Figura 15). El área de exposición de las muestras de trabajo fue de 0.723 cm² y el electrolito empleado fue una solución de agua destilada y cloruro de litio al 35%. Las pruebas se realizaron a temperatura ambiente y para las mediciones electroquímicas se utilizó un equipo potenciostato / galvanostato GAMRY INTERFACE 1010 el cual estaba acoplado a una computadora (Figura 16).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

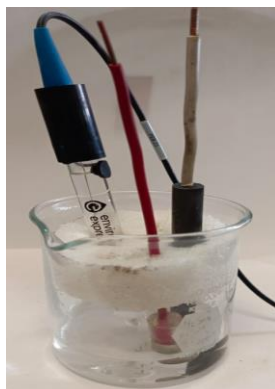


Figura 15. Electrodo de referencia, auxiliar y de trabajo.

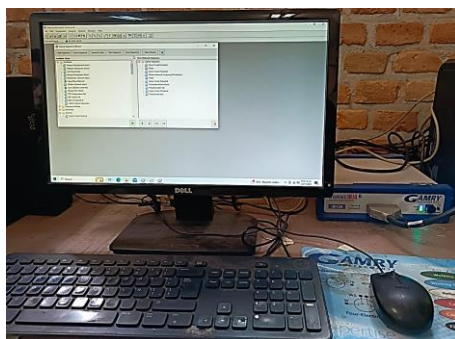


Figura 16. GAMRY INTERFACE 1010 acoplado a una computadora.

La primera etapa consistió en un monitoreo de 24 horas, durante la inmersión de la muestra en la solución de $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$, se llevó a cabo las pruebas de Potencial a circuito abierto (OCP), Resistencia a la polarización lineal (LPR), Curvas de polarización (CP) y Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Para OCP se utilizó un tiempo total de 3600 segundos y un periodo de muestra de 0.5 segundos. Para RPL la amplitud de voltaje aplicado al electrodo de trabajo fue de ± 0.015 V con respecto a E_{corr} en un área de 0.723 cm^2 .

Para las Curvas de polarización, se polarizó ± 0.5 V con respecto al potencial de corrosión (E_{corr}), con una velocidad de barrido de 0.005 V/s . Es importante decir que las mediciones de CP por su carácter destructivo se realizaron por separado de EIS. La densidad de corriente de corrosión, I_{corr} , se calculó mediante extrapolación Tafel.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Para la Espectroscopia de impedancia electroquímica, la amplitud del voltaje aplicado al electrodo de trabajo fue de 0.01 V con respecto al E_{corr} , en un rango de frecuencia de 100000 Hz a 0.01 Hz, tomando 10 puntos por década de frecuencia

4.4.2. Segunda etapa de mediciones electroquímicas.

La segunda etapa de mediciones electroquímicas se evaluó con una celda de 3 electrodos con un arreglo especial para la medición del ruido electroquímico. El electrodo de referencia fue el electrodo de Plata/Cloruro de plata (Ag/AgCl) y los electrodos de trabajo fueron dos muestras nominalmente idénticas de acero 316L (Figura 17). El área de exposición de las muestras de trabajo es 0.723 cm^2 y el electrolito empleado fue la solución de LiCl/H₂O. Todos los experimentos se realizaron a temperatura ambiente y las mediciones electroquímicas se realizaron utilizando un equipo potenciostato / galvanostato marca ACM Instruments GillAC el cual estaba acoplado a una computadora (Figura 18).



Figura 17. Montaje de celda electroquímica para medición de RE.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Figura 18. Potenciostato / Galvanostato marca ACM Instruments GillAC.

Las mediciones de NE fueron realizadas al inicio del experimento y a las 24 h de exposición de la muestra al medio corrosivo. Los datos de corriente y potencial se tomaron simultáneamente cada segundo y el número de puntos por medición fueron de 1024.

4.5. Pérdida de peso (pruebas gravimétricas).

El método gravimétrico de pérdida de peso es una técnica eficaz para evaluar la velocidad de corrosión. Este procedimiento proporciona una medida promedio de la corrosión, lo que permite calcular el porcentaje de eficiencia del inhibidor en estudio. En este análisis, la pieza de metal se conoce como testigo corrosimétrico. El procedimiento está definido por la norma ASTM G 31-99 [65].

4.5.1. Preparación de las probetas de prueba.

Para llevar a cabo las pruebas gravimétricas, la preparación de cada probeta se realizó con pequeños cortes a una varilla cilíndrica del acero 316L, cada cilindro de prueba mide 4.85 mm de diámetro con una altura de 14 mm.

El procedimiento fue el siguiente; se desbastaron las probetas por todas las caras utilizando lijas desde 80 a 600 granos, se tomaron las medidas del diámetro y de la altura en cada probeta y se marcan para tenerlas identificadas. Se realizó un lavado a cada una de las probetas con alcohol metílico para limpiarlas de posibles residuos en el acero. Posteriormente se secaron con una pistola de aire caliente a una



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

temperatura de 70°C, se dejaron enfriar a temperatura ambiente para después realizar y registrar el pesaje de cada una de las probetas mediante una balanza analítica.



Figura 19. *Probetas de experimentación para pruebas gravimétricas.*

4.5.2. Preparación de las celdas de experimentación

La celda de experimentación está formada por un frasco de vidrio de 200 mL previamente lavados con jabón no iónico, enjuagada con agua destilada y etiquetados como se muestra en la Figura 20. En cada uno de los recipientes se colocaron perlas de ebullición para evitar la corrosión por hendidura de las probetas de acero, se agregaron 30 mL de la solución de LiCl/H₂O y la dosificación correspondiente del inhibidor en cada uno de los frascos.

Este experimento consiste en sumergir una probeta limpia y devastada hasta la lija 600 en 30 mL de solución de LiCl/H₂O. Enseguida se agregaron 5, 10, 25, 50 y 100 ppm del extracto de *Phalaris canariensis* a cada uno de los diferentes recipientes, además se utiliza un testigo, es decir una celda sin inhibidor como referencia. Los recipientes son sellados con sus tapas para evitar el contacto con el oxígeno atmosférico y se mantuvieron así durante 72 h, cabe mencionar que estas pruebas se hicieron a diferentes temperaturas 25, 45 y 70°C. Las pruebas se hacen por triplicado.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Figura 20. Celdas para pruebas gravimétricas.

Una vez transcurrido las 72 h de experimentación, las probetas de acero 316L se separan del medio y se limpian por el método de decapado químico, de acuerdo al procedimiento de la norma ASTM G 1-90, la cual consiste en sumergir el material de 5 a 20 min en una disolución formada por 100 mL de ácido nítrico y 20 mL de ácido fluorhídrico aforado a 1000 mL con agua destilada. Las probetas se secan y se pesan para determinar la pérdida de peso mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta W = \frac{m_f - m_i}{(m_i)A \cdot t} \quad (11)$$

Donde:

m_f = Peso después de la prueba gravimétrica (g).

m_i = Peso antes de la prueba gravimétrica (g).

A = Área de exposición de la probeta en la solución (cm²).

t = Tiempo de exposición de la probeta en la solución (h).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Cabe mencionar que la eficiencia de inhibición del extracto de la semilla *Phalaris canariensis* se calculó utilizando la ecuación (9).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CAPITULO 5

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

5.1. Caracterización del extracto de *Phalaris canariensis*.

5.1.1. Espectroscopia FT-IR.

Se llevó a cabo un análisis FT-IR para identificar los grupos químicos presentes en el extracto del *Phalaris canariensis*.

En la Figura 21, se puede observar los espectros FT-IR del extracto del alpiste. En este espectro se muestran las bandas características a diferentes grupos funcionales tales como el grupo -OH (2923.05 cm^{-1}), C-H (2857.38 cm^{-1}), el estiramiento C=O (1741.10 cm^{-1}), C-C (1462.03 cm^{-1}), C-N (1161.42 cm^{-1}) y N-H (718.19) cm^{-1} . La banda O-H y C-H comúnmente formada de alcoholes y carbohidratos representan la mayor composición del extracto. La banda C=O representa los grupos carbonilos que están presentes en el extracto como las grasas insaturadas, mientras que la banda C-N se puede atribuir a la presencia de aminas como las proteínas [90].

Los resultados de este análisis espectroscópico verifican la aparición de diferentes constituyentes que indican las propiedades anticorrosivas del *Phalaris canariensis* debido a la aparición de compuestos heterocíclicos. De acuerdo con la literatura la presencia de oxígeno y dobles enlaces en las estructuras químicas de los compuestos utilizados como inhibidores de la corrosión han resultado ser eficientes [91].



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

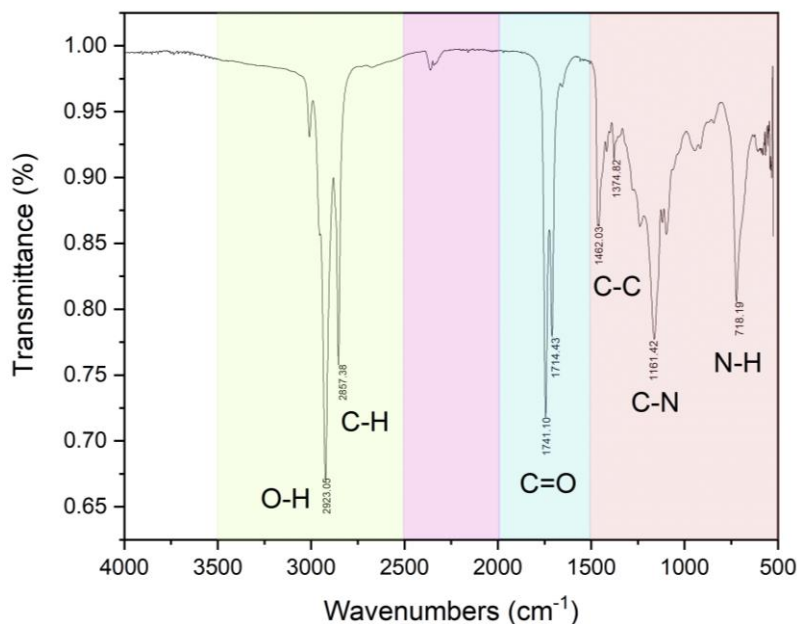


Figura 21. Espectro FT-IR del extracto del *Phalaris canariensis*.

5.1.2. Cromatografía de gases GC-MS.

En la Tabla 5, se pueden observar algunos de los compuestos mayoritarios que se identificaron a partir de la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectroscopia de masas (GC-MS).

Se pudo analizar, que la mayoría de estos compuestos son ácidos grasos. Estos compuestos se han encontrado presentes en inhibidores naturales como reductores de la velocidad de corrosión de los materiales en diferentes medios [92].

Los principales ácidos grasos que pudieron ser identificados fueron; el ácido linoleico, palmítico y oleico, los cuales ya han sido reportados en diferentes investigaciones como compuestos orgánicos que reducen la corrosión en los materiales.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Tabla 5. GC-MS de los principales compuestos químicos identificados en el extracto del *Phalaris canariensis*.

Compuesto	t_r (min)	Formula molecular	Área (%)	[M+]	Estructura química
Octil-oxirano	9.02	$C_{10}H_{20}O$	4.69	156	
(E,E)- 2,4-Decadienal	12.2	$C_{10}H_{16}O$	6.82	152	
Ácido 9, 12-octadecinoico (ácido linoleico)	13.34	$C_{18}H_{32}O_2$	3.78	280	
Ácido n-hexadecanoico (Ácido palmítico)	19.9	$C_{16}H_{32}O_2$	60.2	256	
Ácido oleico	21.66	$C_{18}H_{34}O_2$	100	282	

Donde:

t_r =tiempo de retención en GC.

[M+]= masa del ion molecular

5.2. Caracterización del material.

Los elementos estructurales que se pueden evaluar con un microscopio óptico o electrónico incluyen:

- Granos/cristalitos y sus límites del grano
- Fases intermetálicas y precipitados
- Inclusiones no metálicas y fases

La evaluación se basa en los siguientes criterios:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

- Tipo y forma
- Tamaño y número
- Distribución y orientación

En base a toda esta información, es posible crear una descripción de la microestructura del material y sacar conclusiones sobre sus posibles características.

En la Figura 22, se muestra una micrografía del material base 316L a 100X que se encuentra en una región próxima a la superficie, puede observarse una microestructura compuesta de granos equiaxiales de austenita. Se pueden apreciar dentro de los granos de austenita uno subgranos que se denominan “maclas”.

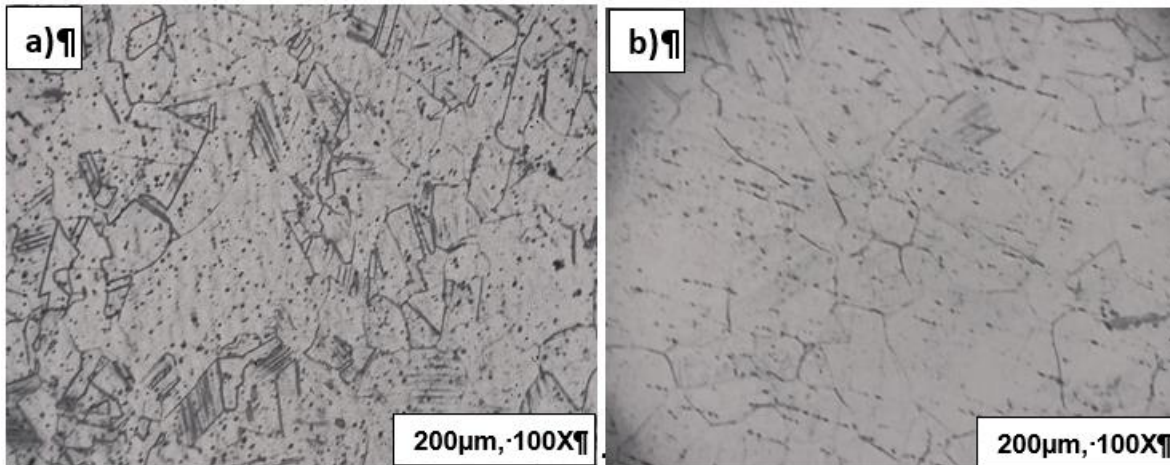


Figura 22. Micrografías del acero 316L a) región longitudinal, b) región transversal.

5.3. Pérdida de masa.

El método de pérdida de masa (Δw), definido por la diferencia de masa inicial y final de las muestras expuestas a un medio corrosivo, es una técnica que ofrece un parámetro directo para la evaluación de la velocidad de corrosión de manera simple.



En la Tabla 6, se puede observar que la pérdida de peso disminuye con el aumento en la concentración del inhibidor, lo cual es debido a la adsorción de este sobre el metal, formando una capa protectora de productos de corrosión, presentando la máxima eficiencia a una concentración de 100 ppm a una temperatura de 25°C. Se aprecia que a medida que se aumenta la temperatura la eficiencia disminuye, mientras que la velocidad de corrosión aumenta, esto es debido a que se presenta una mayor corrosión y por lo tanto una mayor pérdida de masa del acero 316L. La fracción del metal cubierta por el inhibidor, θ , también aumenta con la concentración alcanzando el valor máximo a 100 ppm.

Tabla 6. Datos de pérdida de peso del acero 316L en LiCl/H₂O a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

Temperatura (°C)	C _{inh} (ppm)	Δw (mg/cm ²)	Vel _{corr} (mm/año)	EI (%)	θ
25	5	4.24E-06	0.0042	15	0.15
	10	3.65E-06	0.0036	27	0.27
	25	3.12E-06	0.0031	52	0.52
	50	2.72E-06	0.0027	66	0.66
	100	2.50E-06	0.0025	81	0.81
45	5	6.93E-06	0.0068	9	0.09
	10	6.55E-06	0.0064	15	0.15
	25	6.22E-06	0.0061	22	0.22
	50	5.97E-06	0.0058	29	0.29
	100	5.03E-06	0.0049	51	0.51
70	5	9.68E-06	0.0095	--	--
	10	8.55E-06	0.0084	1	0.01
	25	8.29E-06	0.0081	6	0.06
	50	8.20E-06	0.0080	14	0.14
	100	7.17E-06	0.0070	25	0.25



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Donde:

C_{inh} =Concentración de inhibidor.

Δw =Pérdida de peso.

Vel_{corr} =velocidad de corrosión.

EI =Eficiencia del inhibidor.

θ = Fracción de la superficie cubierta.

En la figura 23, se puede observar el efecto de la concentración del inhibidor y la temperatura sobre la pérdida de masa. Es apreciable que a medida que se aumenta la temperatura existe una mayor pérdida de peso, sin embargo, al aumentar la concentración del inhibidor hay una disminución en esta pérdida de masa en cada una de las temperaturas.

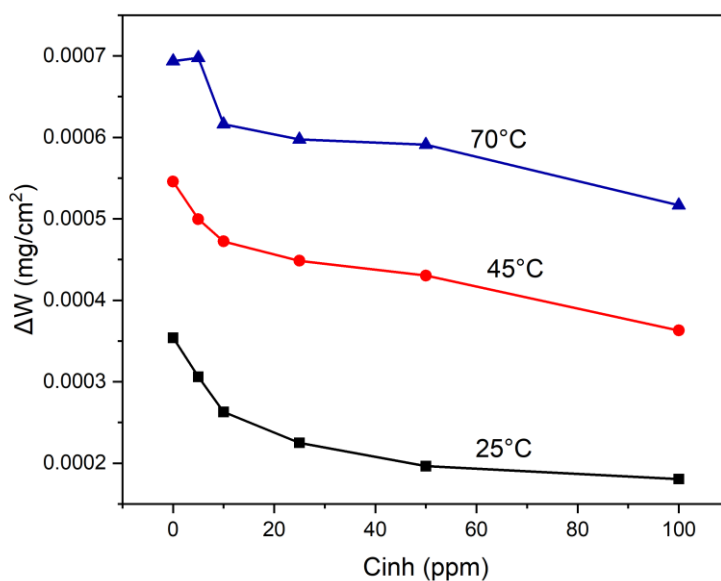


Figura 23. Efecto de la concentración del inhibidor y la temperatura sobre la pérdida de peso del acero 316L en la solución de $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Un análisis que permite observar el comportamiento por pérdida de masa, y comparar la eficiencia del extracto del *Phalaris canariensis*, es la gráfica que se muestra en la Figura 24, en donde se muestra que la eficiencia del inhibidor aumenta con su concentración, pero disminuye conforme se aumenta la temperatura. Esto coincide con los datos registrados en la Tabla 6. El valor mayor de eficiencia fue de 81% obtenido a 100 ppm y a 25°C.

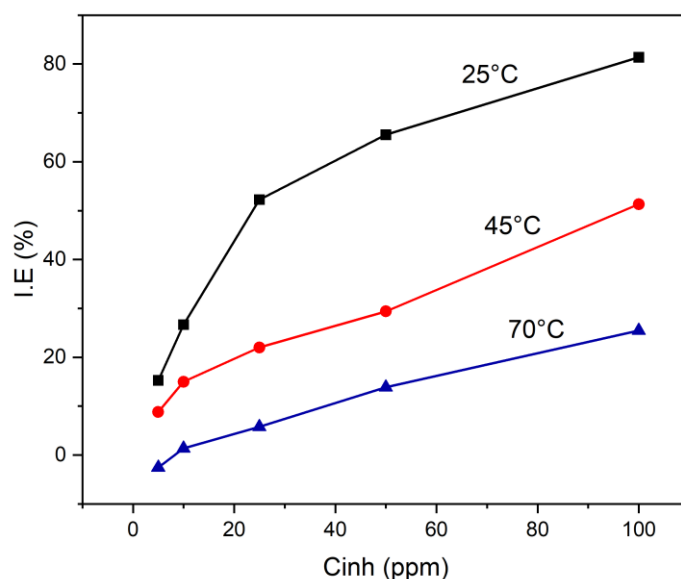


Figura 24. Variación de la eficiencia del inhibidor con respecto a la concentración del inhibidor y la temperatura para el acero 316L en LiCl/H₂O.

5.3.1. Isoterma de adsorción. Extracto de *Phalaris canariensis*.

El comportamiento a la adsorción en la superficie del acero 316L, adicionando diferentes concentraciones de extracto de *Phalaris canariensis* en la solución de LiCl/H₂O en diferentes temperaturas (25, 45 y 70°C) fue realizado empleando diferentes isothermas, como Lagmuir, Temkin, Freundlich, Flory-Huggins y Frumkin,



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

sin embargo, la que presenta un mejor ajuste fue la obtenida por el modelo de isoterma Temkin.

La Figura 25, muestra la isoterma de Temkin obtenida de los cálculos al adicionar concentraciones variables de extracto de *Phalaris canariensis*, la información de eficiencias fue utilizada de los resultados obtenidos del método de pérdida de masa.

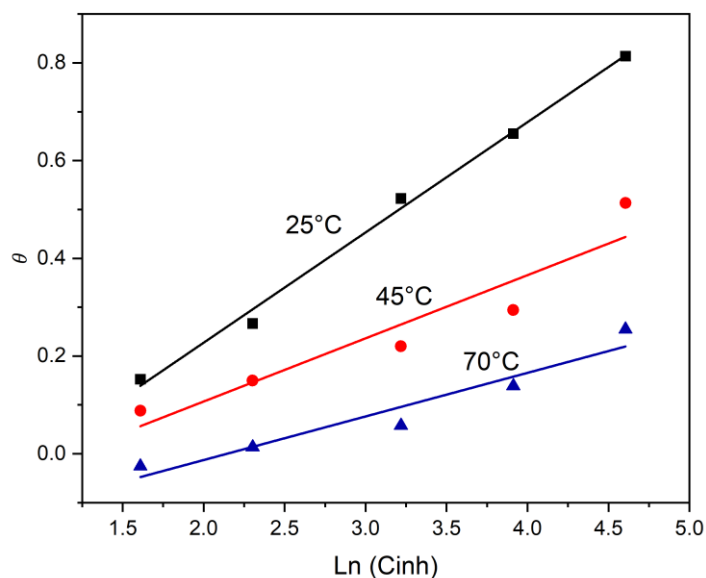


Figura 25. Isotermas de adsorción de Temkin para el acero 316L en LiCl/H₂O con el extracto de *Phalaris canariensis* obtenidas por el método de pérdida de peso.

Los parámetros de adsorción como la constante de adsorción (K_{ads}), el coeficiente de regresión (R^2), la energía libre (ΔG) y los valores de la pendiente y de la intersección fueron obtenidas mediante la regresión lineal entre θ (eje Y) y $\ln(C_{inh})$ (eje X).

La Tabla 7, muestra los valores de ΔG y K_{ads} calculados en las isotermas Temkin. Se observa que los valores de ΔG son negativos lo cual indica la estabilidad de la capa de adsorción sobre la superficie del acero 316L y el proceso espontaneo de



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

adsorción. Las magnitudes de ΔG encontradas alrededor de -20 KJ/mol o menores, se atribuyen a la atracción física, débil, de tipo electrostática que existe entre el inhibidor y la carga de la superficie del metal (fisisorción) [93].

Tabla 7. Parámetros termodinámicos del acero 316L en LiCl/H₂O en presencia de extracto de *Phalaris canariensis* a diferentes temperaturas.

Temperatura (K)	Pendiente	Intersección	K _{ads} (g ⁻¹ l)	R ²	ΔG (Kj/mol)
298.13	0.2257	0.2243	4.4583	0.9594	-20.8269
318.13	0.1293	0.1517	6.5919	0.9836	-23.2584
343.13	0.0892	0.1914	5.2246	0.9848	-24.4230

Para conocer la energía de activación (E_a), se utilizó la ecuación de Arrhenius [94].

$$\log(\Delta m) = -\frac{E_a}{2.3RT} + A \quad (12)$$

Donde

A =es el factor pre exponencial.

E_a =es la energía de activación (kJ/mol).

R =es la constante molar de los gases.

En la Figura 26, se observa los resultados de pérdida de peso obtenidos con las diferentes concentraciones de inhibidor utilizadas frente a $1000/T$. Se observa que a medida que se aumenta la concentración del inhibidor, la pendiente de esta concentración disminuye, lo que indica que al proceso de corrosión requiere más energía para llevarse a cabo en presencia del inhibidor.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

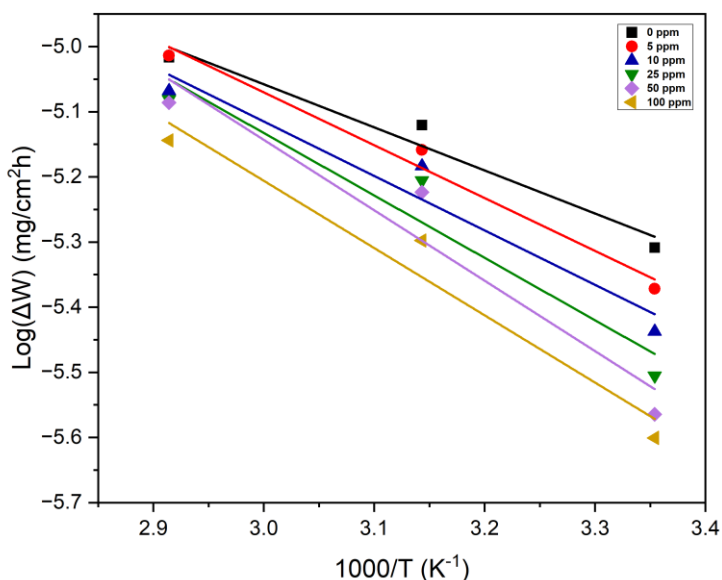


Figura 26. Grafica de Arrhenius para el acero 316 L en LiCl/H₂O en presencia de *Phalaris canariensis*.

Los valores de activación se pueden obtener como se indica en la Tabla 8, esta muestra que los valores de energía de activación son mayores que los obtenidos en la solución que no tiene inhibidor, es decir, en la solución testigo, lo que indica que el proceso de corrosión es más difícil de ocurrir en presencia del extracto de *Phalaris canariensis*. Este aumento en la energía de activación se puede atribuir a que el proceso de corrosión requiere más energía a medida que aumenta la concentración del inhibidor, se hace más difícil.

Tabla 8. Parámetros de activación del *Phalaris canariensis* en LiCl/H₂O.

C _{inh} (ppm)	Pendiente	R (J/molK)	E _a (J/mol)	E _a (kJ/mol)
0	-661.21	8.314	5497.2999	5.4972
5	-811.18	8.314	6744.1505	6.7441
10	-835.8	8.314	6948.8412	6.9488
25	-958.07	8.314	7965.3939	7.9653



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

50	-1080.99	8.314	8987.3508	8.9873
100	-1032.59	8.314	8584.9532	8.5849

5.3.2. Morfología superficial de muestras del acero 316L expuesta a LiCl/H₂O a diferentes temperaturas.

En las Figuras 27-29, se observan imágenes obtenidas a través de microscopia electrónica de barrido (SEM) del acero 316L después de 72 h inmerso en la solución de LiCl/H₂O con 0 ppm que es la muestra testigo, y 100 ppm que fue la concentración optima de inhibidor de extracto de *Phalaris canariensis* bajo condiciones estáticas a diferentes temperaturas (25, 45 y 70°C).

En la Figura 27, se observan dos columnas de imágenes, en la primera columna se muestran tres imágenes de la muestra testigo a una temperatura de 25°C a diferentes magnificaciones 100X y 500X, respectivamente. Estas figuras muestran que, independientemente de la condición del acero, se puede observar la presencia de un tipo de corrosión localizada, y de acuerdo con la forma del ataque se puede considerar como picaduras, esto debido a la presencia de iones Cl⁻ en la solución. Mientras que, en la segunda columna, corresponde a la superficie del acero sumergido en la solución LiCl/H₂O a la que se le adiciono 100 ppm de inhibidor del extracto *Phalaris canariensis*, en estas imágenes se muestra que el acero no sufrió un ataque significativo, esto atribuido a la capa protectora formada por el inhibidor y los productos de corrosión en la superficie del acero.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

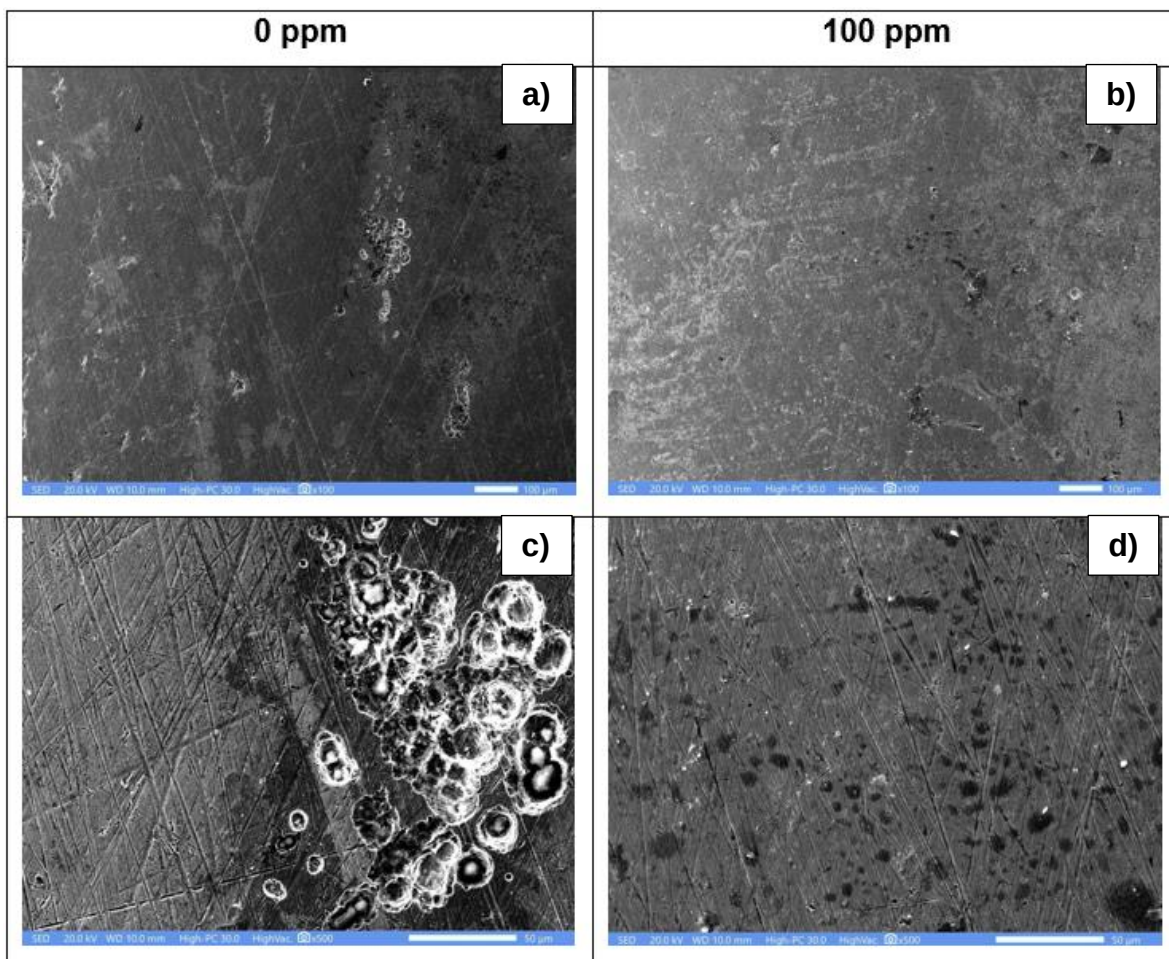


Figura 27. Micrografías del acero 316L inmerso en $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$ para el sistema a 0 ppm y 100 ppm a una temperatura de 25°C a 100X a) y c), 500X b) y d).

La Figura 28, muestra de igual forma dos columnas, la cual la primera pertenece a la muestra testigo (0 ppm) y la segunda a la concentración optima (100 ppm) a una temperatura de 45°C en condiciones estáticas, y diferentes magnificaciones 100X y 500X, respectivamente.

En la morfología superficial de las piezas se aprecia una diferencia representativa de la corrosión provocada por el medio de $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$, y también se puede apreciar la



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

superficie de la muestra en que fue adicionado el inhibidor. En esta se observa una menor densidad de picadura y, por lo tanto, un daño superficial mucho menor.

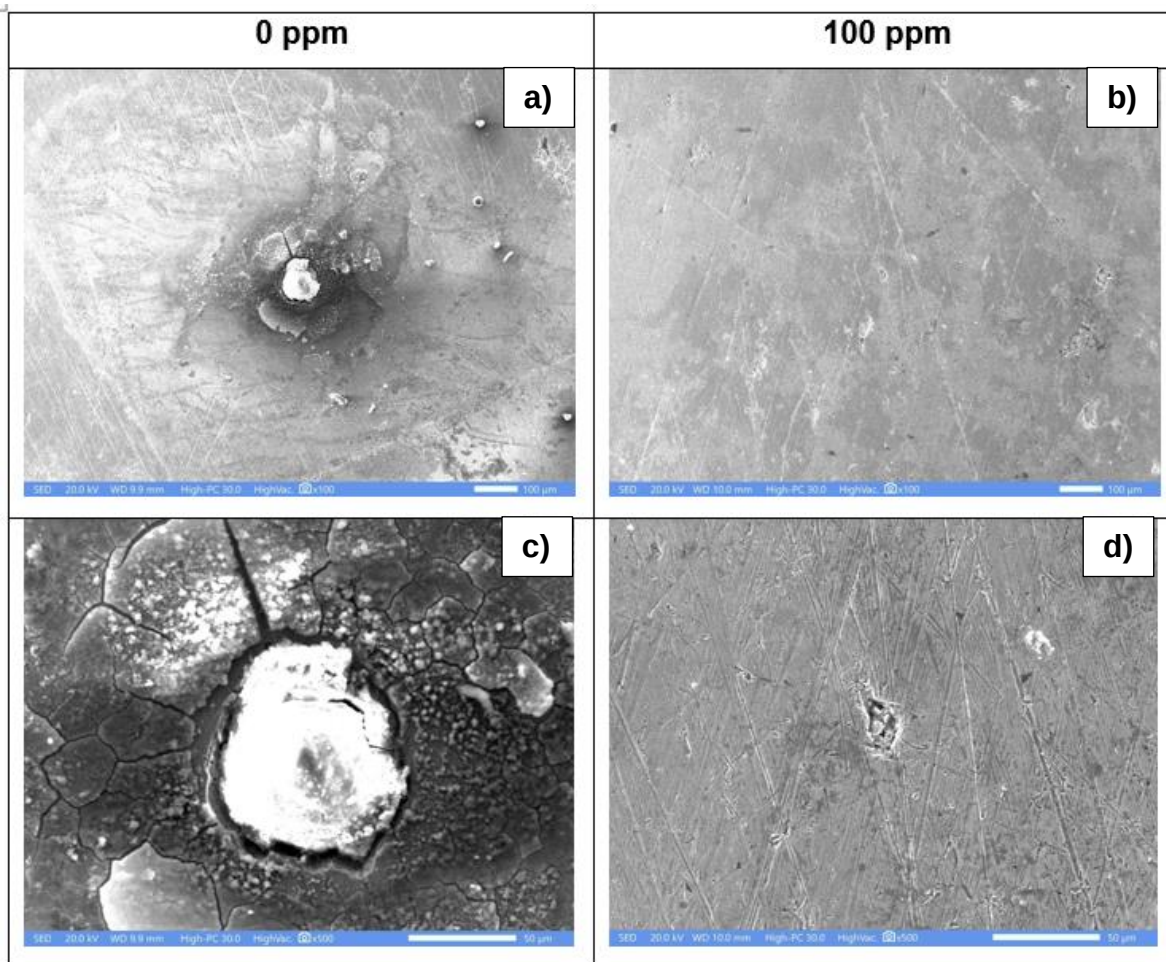


Figura 28. Micrografías del acero 316L inmerso en $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$ para el sistema a 0 ppm y 100 ppm a una temperatura de 45°C a 100X a) y c), 500X b) y d).

En la Figura 29, se observan dos columnas de imágenes, en la primera columna se muestran tres imágenes de la muestra testigo (0 ppm) y en la segunda, son tres imágenes de la concentración óptima (100 ppm) a una temperatura de 70°C a diferentes magnificaciones 100X y 500X, respectivamente.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

En ambas columnas se puede apreciar que, existe la presencia de un tipo de corrosión localizada, como picaduras. En estas no se puede observar una protección de la superficie del metal en la concentración optima, ya que el compuesto orgánico a altas temperaturas puede degradarse y no llevar a cabo la función de proteger la superficie del metal contra la corrosión.

En términos generales, a mayores temperaturas la eficiencia del inhibidor del extracto *Phalaris canariensis* disminuye, permitiendo un mayor ataque sobre la superficie del metal.

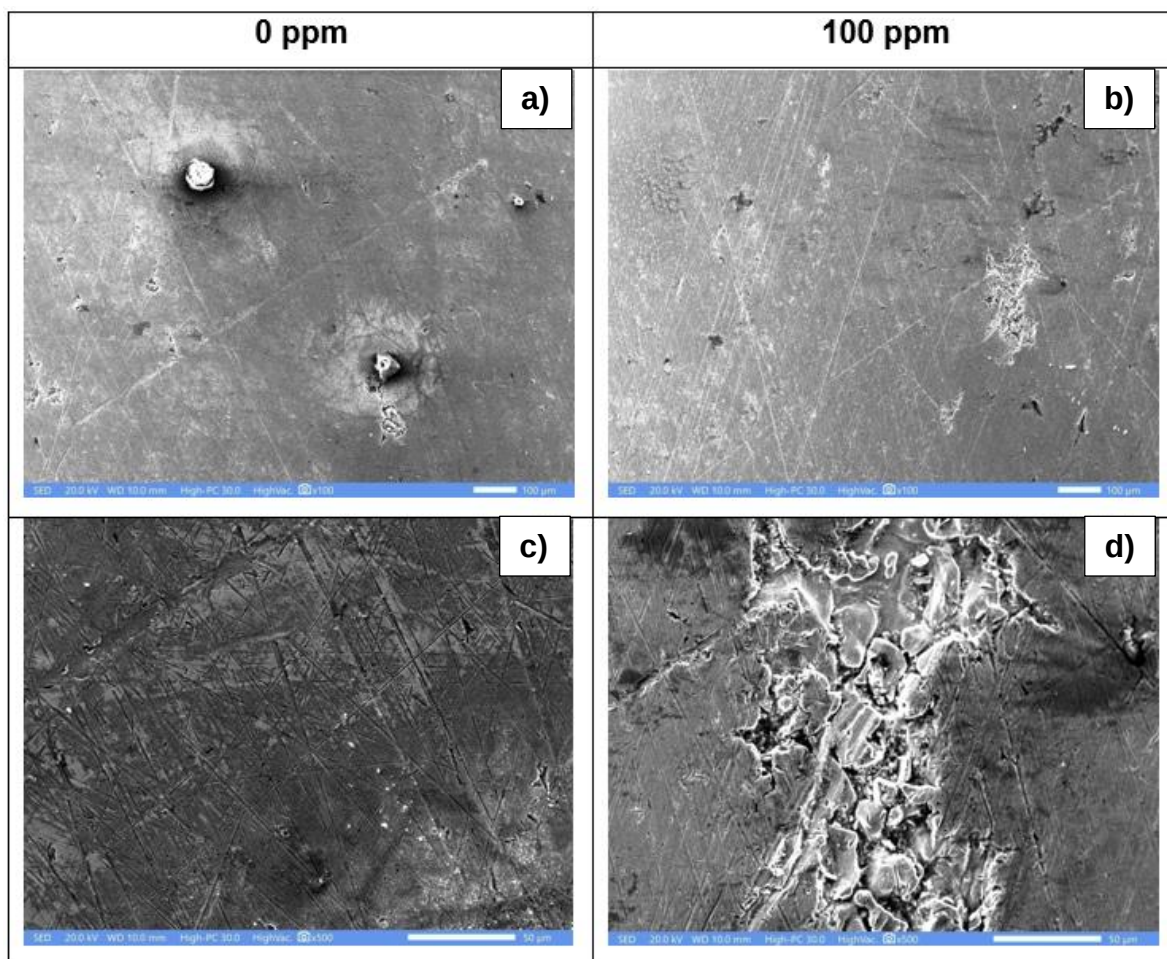


Figura 29. Micrografías del acero 316L inmerso en $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$ para el sistema a 0 ppm y 100 ppm a una temperatura de 70°C a 100X a) y c), 500X b) y d).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

5.4. Pruebas electroquímicas.

Todos los experimentos realizados en este capítulo se realizaron por duplicado de las muestras del acero 316L inmersos en la solución $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$, a diferentes temperaturas 25, 45 y 70°C , presión atmosférica y condiciones estáticas.

5.4.1. Potencial a circuito abierto (OCP).

En la Figura 28, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones del Potencial a Circuito Abierto (Open circuit potential, OCP) contra tiempo de las concentraciones del inhibidor utilizadas en la solución $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$.

Como primer paso se comenzó con la prueba de OCP para las condiciones estáticas. En la Figura 30, se puede observar que, el valor del potencial se estabiliza después de 1200 a 1500 s para las diferentes concentraciones, mientras que la muestra testigo se estabiliza después de los 3500 s.

Adicionalmente, se observa un desplazamiento en el potencial de corrosión hacia valores más nobles conforme se aumenta la adición de la concentración del inhibidor. A una concentración de 0 ppm de inhibidor presenta un valor de potencial de -286 mV, mientras que a una concentración de 100 ppm se puede observar que un incremento en el valor de potencial de -185 mV, por lo que a medida que se aumenta la concentración el acero 316L, este se vuelve más noble. Esto quiere decir que la adición del inhibidor disminuye la tendencia del acero 316L a corroerse.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

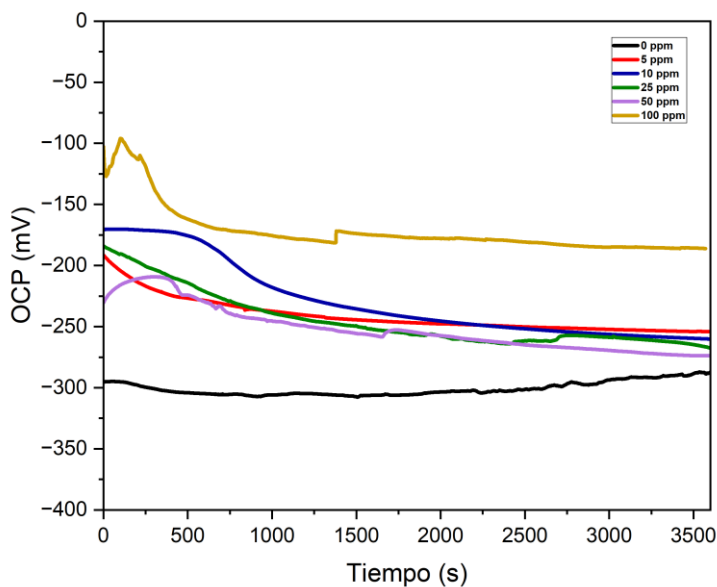


Figura 30. Variación del valor de OCP a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 25°C.

En la Figura 31, se observa que a una temperatura de 45°C hay una estabilización del potencial después de los 3600 s para las diferentes concentraciones, así como para la muestra testigo. Asimismo, el valor de potencial presenta diferentes valores para cada una de las concentraciones utilizadas. Al aumentar la temperatura a 45°C a las condiciones del sistema, los valores del potencial del acero con inhibidor a diferentes concentraciones se hacen más electronegativos que el valor del potencial de las muestras expuestas a 25°C. El valor del potencial en ausencia de inhibidor (0 ppm) es menor en comparación con los valores obtenidos al añadir inhibidor a la solución. Esto indica que, en presencia del inhibidor, el metal se comporta de manera más noble.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

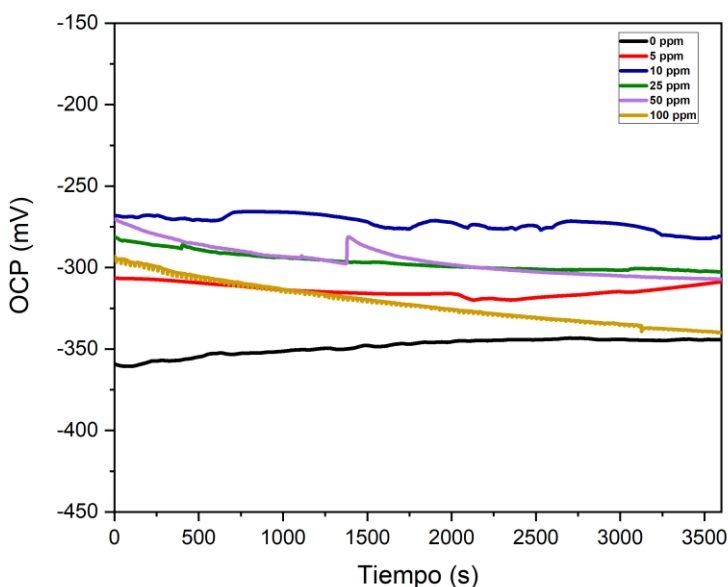


Figura 31. Variación del valor de OCP a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 45°C.

En la Figura 32, se puede apreciar una estabilización del potencial a circuito abierto después de los 3600 s. El valor del potencial se hace más electronegativo conforme se aumenta la temperatura, en la Figura 32 se puede observar que el valor más electronegativo corresponde a nuestra muestra testigo con -300mV, mientras que en la Figura 30, se observa que el valor más electronegativo que se obtuvo es de -450 mV correspondiente a la concentración de 5 ppm. El comportamiento presentado en la figura 32 indica que las reacciones de oxidación y reducción del proceso de corrosión del acero 316L se ven afectador por el aumento en la temperatura en el sistema. Asimismo, se observa que, a medida que aumenta la concentración del inhibidor, el valor de potencial disminuye en comparación con el valor en ausencia de inhibidor. Esto indica que el metal se vuelve más susceptible a la corrosión.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

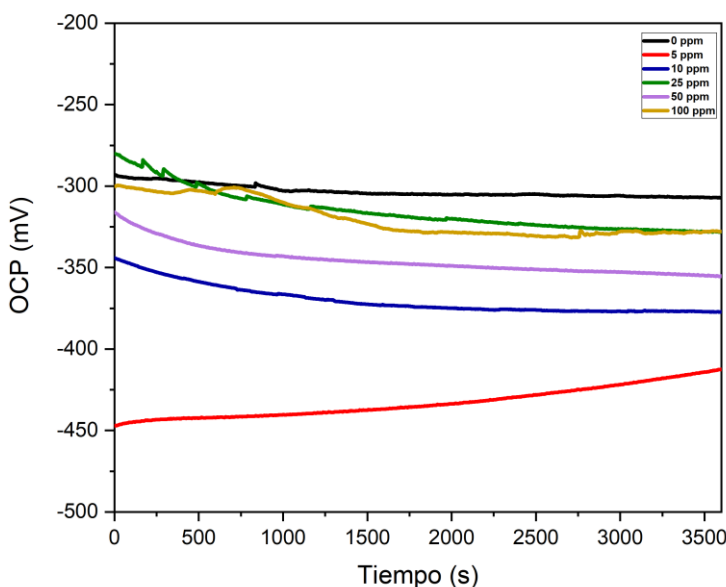


Figura 32. Variación del valor de OCP a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 70°C.

5.4.2. Resistencia a la polarización lineal (LPR).

Es una técnica electroquímica, que permite medir las velocidades de corrosión de forma directa y en tiempo real. Aunque su uso está limitada a medios conductivos líquidos, el tiempo de respuesta y la calidad de los datos que aporta esta técnica es claramente superior, frente a otros medios de monitoreo de la corrosión [78].

En la Figura 33, se puede observar que en comparación con la muestra testigo, el valor de R_p del material presenta un aumento, lo cual se puede atribuir a la adsorción del inhibidor y la formación de la película protectora de la corrosión sobre la superficie del metal. Sin embargo, se puede observar que en la concentración de 10 ppm y 50 ppm se mantiene constante, mientras que en la concentración de 25 ppm se observa como disminuye, esto se puede atribuir al rompimiento de la película protectora o a la degradación del inhibidor orgánico. Por último, en la concentración de 100 ppm se observa un aumento, lo que indica una mayor



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

protección al material evitando la corrosión debido a que el espesor de la capa de productos de corrosión formada por el inhibidor es la más gruesa.

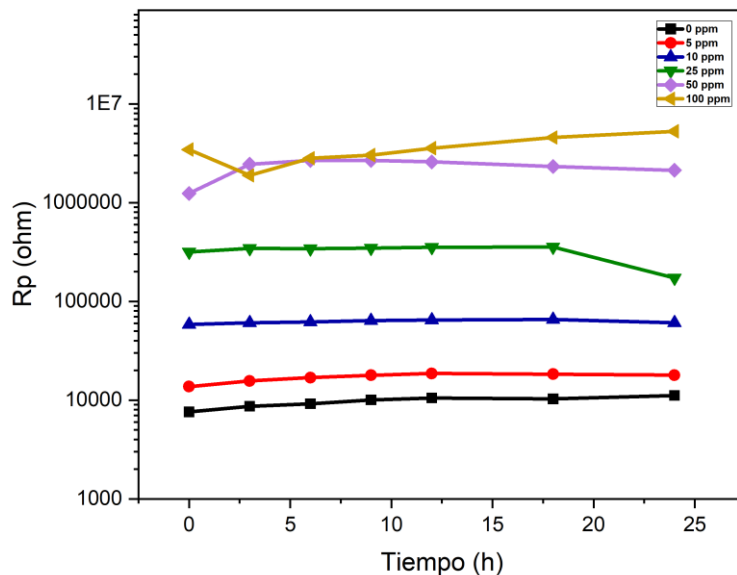


Figura 33. Variación del valor de R_p a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 25°C.

En la Figura 34, se puede observar que en las concentraciones de 5, 10 ppm y la prueba testigo el valor de R_p se mantiene constante durante las 24 h, mientras que, en las concentraciones de 25, 50 y 100 ppm disminuyen conforme pasa el tiempo, esto se puede atribuir a la desorción de la capa protectora debido al aumento de la temperatura. Se puede observar que, a medida que se aumenta la concentración del inhibidor, el valor de R_p también incrementa en comparación con el valor en ausencia de inhibidor. Esto indica que el metal es menos susceptible a la corrosión.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

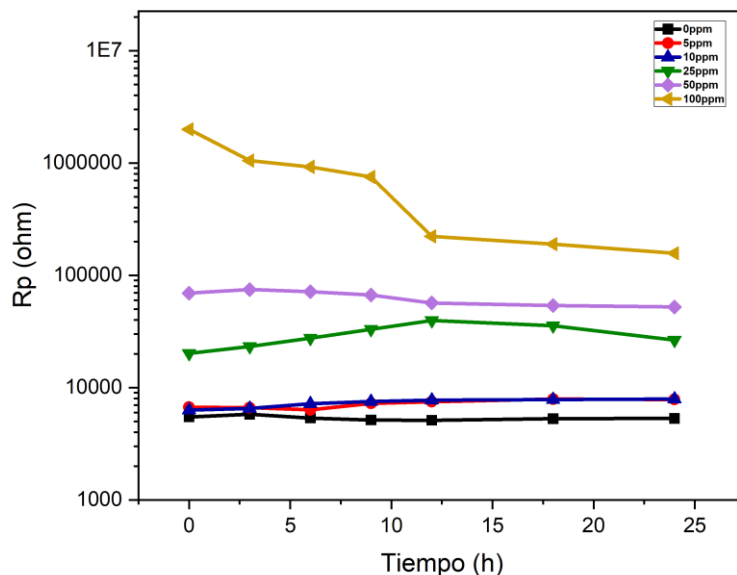


Figura 34. Variación del valor de R_p a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 45°C .

En la Figura 35, se aprecia una disminución en el valor de R_p conforme se aumenta la temperatura. Es decir, a mayor temperatura menor es el valor de la resistencia a la polarización que presenta el acero 316L para la corrosión de este. Esto se puede atribuir al rompimiento de la capa protectora formada en la superficie del material o que la capa de productos de corrosión es más porosa y así, menos protectora debido a la degradación del inhibidor a causa del aumento de la temperatura. De manera similar, se observa un ligero aumento en el valor de R_p a medida que se incrementa la concentración del inhibidor. Sin embargo, este aumento es poco significativo, por lo que no se presenta una diferencia considerable en comparación con el valor de R_p en ausencia de inhibidor.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

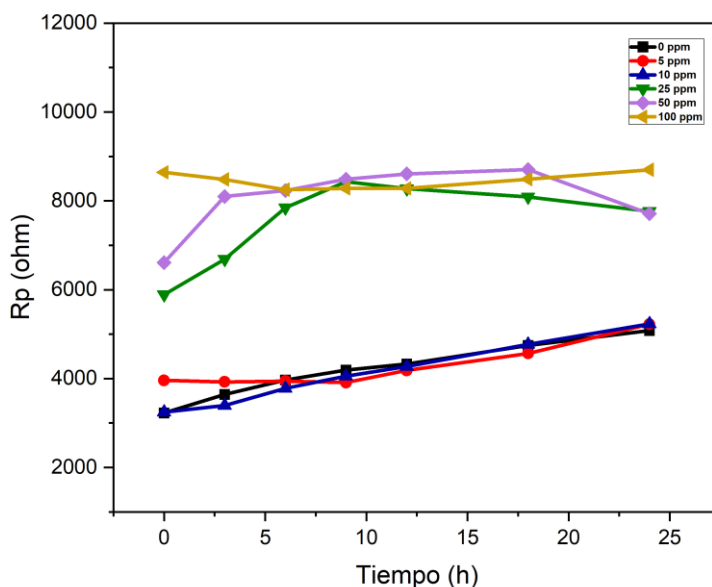


Figura 35. Variación del valor de R_p a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 70°C.

5.4.3. Curvas de Polarización (CP).

Una de las formas más utilizadas para la evaluación de la velocidad de corrosión de un metal en contacto con un ambiente corrosivo, es la polarización de este, a través de la imposición de potenciales o corrientes definidos. En esta parte del trabajo se utilizó la construcción de curvas de polarización de manera potenciodinámica.

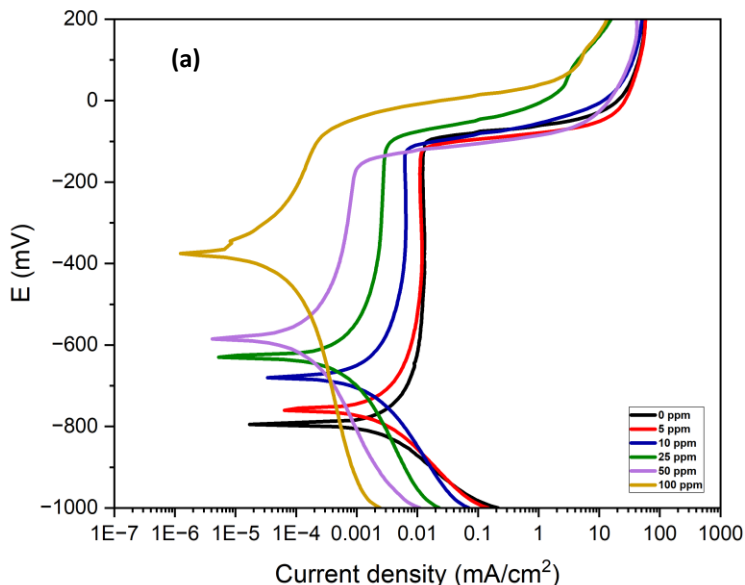
Las curvas de polarización para el acero 316L en LiCl/H₂O en ausencia y presencia de diferentes concentraciones de inhibidor. Se observa en la Figura 36, que en todas las condiciones el material forma una capa pasiva, la cual para este tipo de aceros es debido a la formación de óxidos de hierro como Fe₂O₃, Fe₃O₄ y FeCO₃ así como óxidos/hidróxidos de cromo tales como CrO₃, Cr₂O₃ and Cr(OH)₃, mientras que en presencia de inhibidor otros productos de corrosión se forman. La densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) a 25 y 40°C disminuye en presencia del inhibidor, lo cual se atribuye a que la capa pasiva que esta forma está retardando el proceso de



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

disolución del metal, mientras que a 70°C la densidad de corriente se mantiene o aumenta de acuerdo con la muestra testigo, lo que indica el rompimiento de la capa pasiva y la descomposición del inhibidor, así como una tendencia en el potencial de corrosión (E_{corr}) hacia valores más positivos ó nobles. Por otro lado, las pendientes anódica y catódica cambiaron al aumentar la concentración de inhibidor indicando que se trata de un inhibidor de tipo mixto. Esta observación se atribuyó a la afectación tanto de disolución del acero anódico y la reacción catódica de reducción de oxígeno y evolución de hidrógeno, y esta última se inhibió con el bloqueo de los sitios activos en la superficie del metal.

Como se puede observar, la eficiencia disminuye conforme se aumenta la temperatura. Sin embargo, hay un comportamiento distinto a 70°C, ya que las eficiencias son menores a la muestra testigo.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

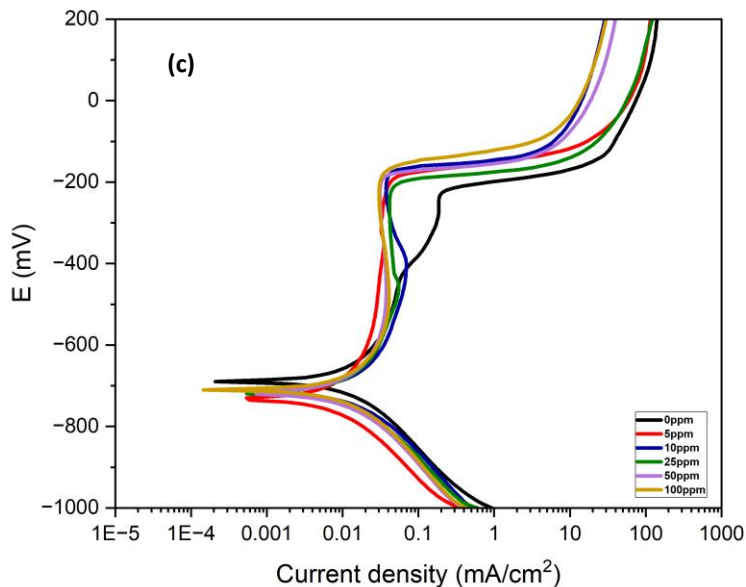
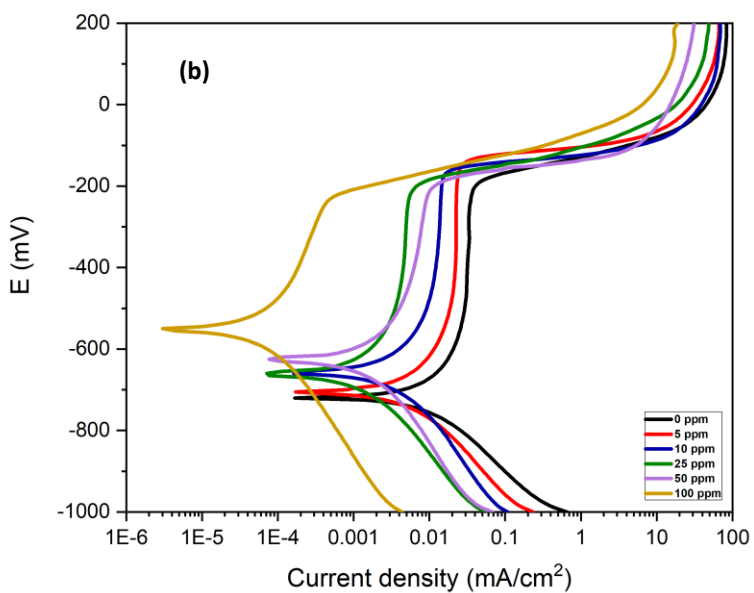


Figura 36. Curvas de polarización para el acero inoxidable 316L en la solución LiCl/H₂O a diferentes concentraciones del inhibidor y diferentes temperaturas (a) 25°C, (b) 45°C y (c) 70°C.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

En las Tablas 9-11, se muestran los parámetros electroquímicos medidos por el método de curvas de polarización. Donde β_a es el valor de la pendiente de Tafel de la rama anódica, β_c corresponde a la pendiente de Tafel de la rama catódica, E_{corr} es el potencial de corrosión, I_{corr} es la densidad de corriente y Vel_{corr} es la velocidad de corrosión.

La velocidad de corrosión se calculó con la siguiente ecuación [60]:

$$Vel_{corr}(\frac{mm}{año}) = \frac{0.13 I_{corr} P_{eq}}{\rho} \quad (13)$$

Donde:

I_{corr} = Densidad de corriente (mA/cm²).

P_{eq} =Peso equivalente del material (g).

ρ =densidad del material (g/cm³).

Las ramas anódicas y catódicas obtenidas sugieren que el mecanismo de inhibición del extracto del *Phalaris canariensis* es del tipo mixto, es decir, afecta tanto las reacciones anódicas como catódicas, puesto que ambas ramas se modifican conforme cambia la concentración del inhibidor.

Los valores de los parámetros electroquímicos calculados a las diferentes concentraciones del extracto *Phalaris canariensis* bajo las diferentes temperaturas, indican que a 25°C con 5 ppm de inhibidor presenta una eficiencia del 79% el comportamiento es tal, que conforme se incrementa la concentración del inhibidor, se incrementa la eficiencia de este contra los efectos corrosivos del LiCl/H₂O sobre el acero 316L. Sin embargo, conforme se aumenta la temperatura, la eficiencia disminuye, pues a 70°C y 5 ppm de extracto la eficiencia es de -35%, es decir que no hay una protección del inhibidor sobre el acero.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Tabla 9. Efecto de la concentración del inhibidor en los parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización a una Temperatura de 25°C.

C_{inh} (ppm)	β_a (mV)	β_c (mV)	E_{corr} (mV)	I_{corr} (mA/cm ²)	Vel_{corr} (mm/año)	EI (%)
0	216	126	-795	2.53E-03	0.82	- -
5	889	637	-759	5.12E-04	0.17	79
10	444	374	-677	3.90E-04	0.13	84
25	456	289	-630	7.46E-04	0.24	70
50	442	312	-585	1.95E-04	0.06	92
100	288	164	-375	2.76E-05	0.01	98

Tabla 10. Efecto de la concentración del inhibidor en los parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización a una Temperatura de 45°C.

C_{inh} (ppm)	β_a (mV)	β_c (mV)	E_{corr} (mV)	I_{corr} (mA/cm ²)	Vel_{corr} (mm/año)	EI (%)
0	316	165	-720	8.76E-03	2.84	- -
5	348	203	-700	5.81E-03	1.89	33
10	416	241	-660	3.84E-03	1.25	56
25	418	295	-660	2.04E-03	0.66	76
50	417	235	625	1.50E-03	0.49	82
100	364	264	-550	7.18E-05	0.02	99

Tabla 11. Efecto de la concentración del inhibidor en los parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización a una Temperatura de 70°C.

C_{inh} (ppm)	β_a (mV)	β_c (mV)	E_{corr} (mV)	I_{corr} (mA/cm ²)	Vel_{corr} (mm/año)	EI (%)
0	357	201	-690	1.54E-02	5.01	- -
5	445	219	-710	2.09E-02	6.77	-35
10	406	201	-715	1.84E-02	5.97	-19
25	435	215	-710	1.71E-02	5.54	-10
50	442.14	205	-720	1.67E-02	5.42	-8



100	437.11	221	-710	1.64E-02	5.33	-6
-----	--------	-----	------	----------	------	----

5.4.4. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

En este trabajo se utilizó la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica aprovechando las características de esta de poder separar las contribuciones de diferentes fenómenos de acuerdo con el tiempo de relajación de cada una de ellas con el fin de establecer, de manera más sencilla, el número de etapas involucradas en el proceso de corrosión.

La eficiencia se calculó con la siguiente ecuación

$$EI = \frac{\frac{1}{R_{tc}(\text{blanco})} - \frac{1}{R_{tc}(\text{inhibidor})}}{\frac{1}{R_{tc}(\text{blanco})}} \times 100 \quad (14)$$

Donde $R_{tc}(\text{blanco})$ y $R_{tc}(\text{inhibidor})$ son los valores de resistencia a la transferencia de carga en ausencia y presencia de inhibidor.

5.4.4.1. Análisis de los diagramas Nyquist.

En la Figura 37, se puede observar que, en los diagramas de Nyquist se forman 2 semicírculos capacitivos, uno a bajas frecuencias, representando los procesos electroquímicos de oxidación y reducción en la doble capa electroquímica, y otro a altas frecuencias, representan los fenómenos electroquímicos de oxidación y reducción que ocurren en la capa de productos de corrosión. Se puede observar que conforme se aumenta la concentración del inhibidor, se aumenta el diámetro de los semicírculos, esto puede ser debido a la formación de la película protectora de corrosión en la superficie del metal.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

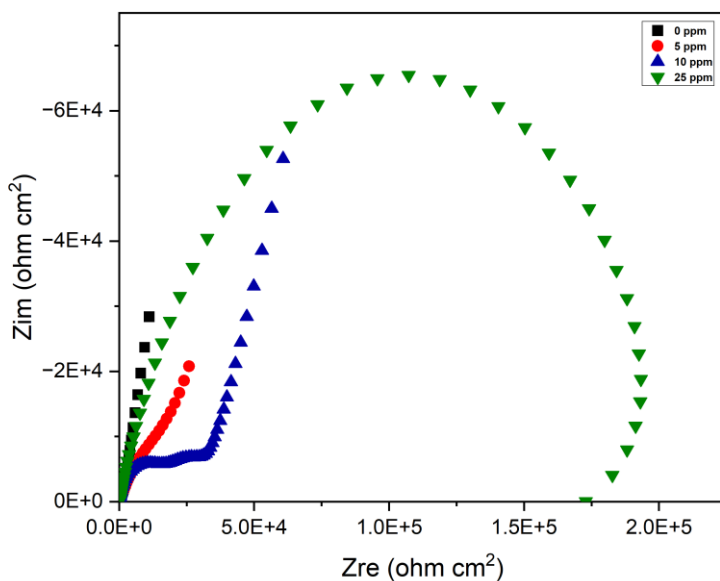
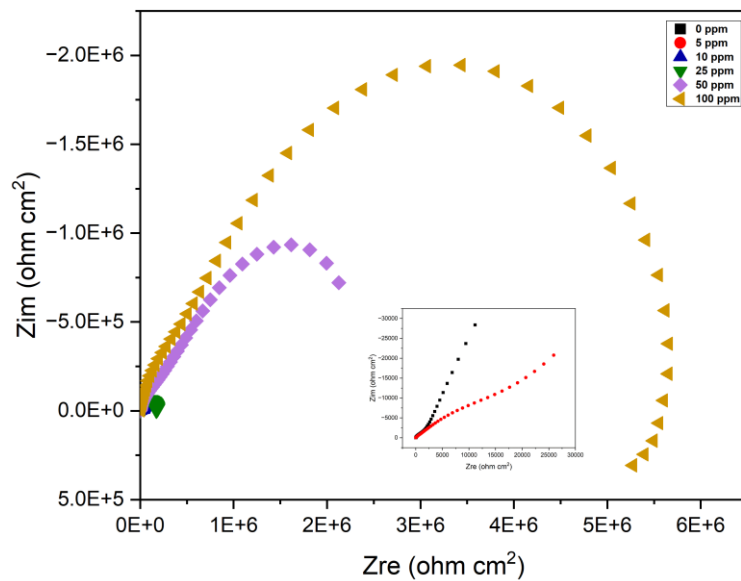


Figura 37. Efecto de la concentración del inhibidor en los Diagramas de Nyquist del acero 316L en LiCl/H₂O a una temperatura de 25°C.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

En el diagrama Nyquist a 45°C (Figura 38), se observan dos semicírculos, uno a altas frecuencias el cual es atribuido a los procesos electroquímicos de oxidación y reducción en la doble capa electroquímica, mientras que el otro semicírculo capacitivo es a medianas frecuencias, esto debido a los fenómenos electroquímicos de oxidación y reducción que ocurren en la capa de productos de corrosión. Adicionalmente, se observa que el diámetro de los semicírculos aumenta a medida que se aumenta la concentración del inhibidor del extracto de *Phalaris canariensis*. Los datos indican que el aumento de la resistencia a la transferencia de carga (R_{tc}) se asocia con una disminución de la capacitancia de doble capa electroquímica (C_{dl}) ya que $C_{dl} = \frac{1}{2\pi R_{tc} f_{max}}$. Esta disminución de los valores de C_{dl} es provocada por la adsorción del inhibidor indicando que el área de la superficie expuesta al medio corrosivo disminuye. Por otro lado, una disminución en C_{dl} , que puede resultar de una disminución en la constante dieléctrica local y/o un aumento en el espesor de la doble capa eléctrica ya que $C_{dl} = \frac{\epsilon\epsilon_0}{\lambda A}$ lo que sugiere que el inhibidor actúa por adsorción en la interfase metal-solución y la formación de una capa protectora en la superficie del electrodo [95].

$$C_{dl} = \frac{\epsilon\epsilon_0}{\lambda A} \quad (15)$$

Donde

ϵ =Permeabilidad del medio.

ϵ_0 =Permeabilidad del vacío.

λ =Espesor de la doble capa electroquímica.

A =Área.

Los resultados presentados en la figura 38, tienen una buena correlación con los resultados obtenidos en las pruebas de curvas de polarización. Se puede observar



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

que los valores de impedancia real van disminuyendo conforme se aumenta la temperatura, debido a la degradación del inhibidor con la temperatura.

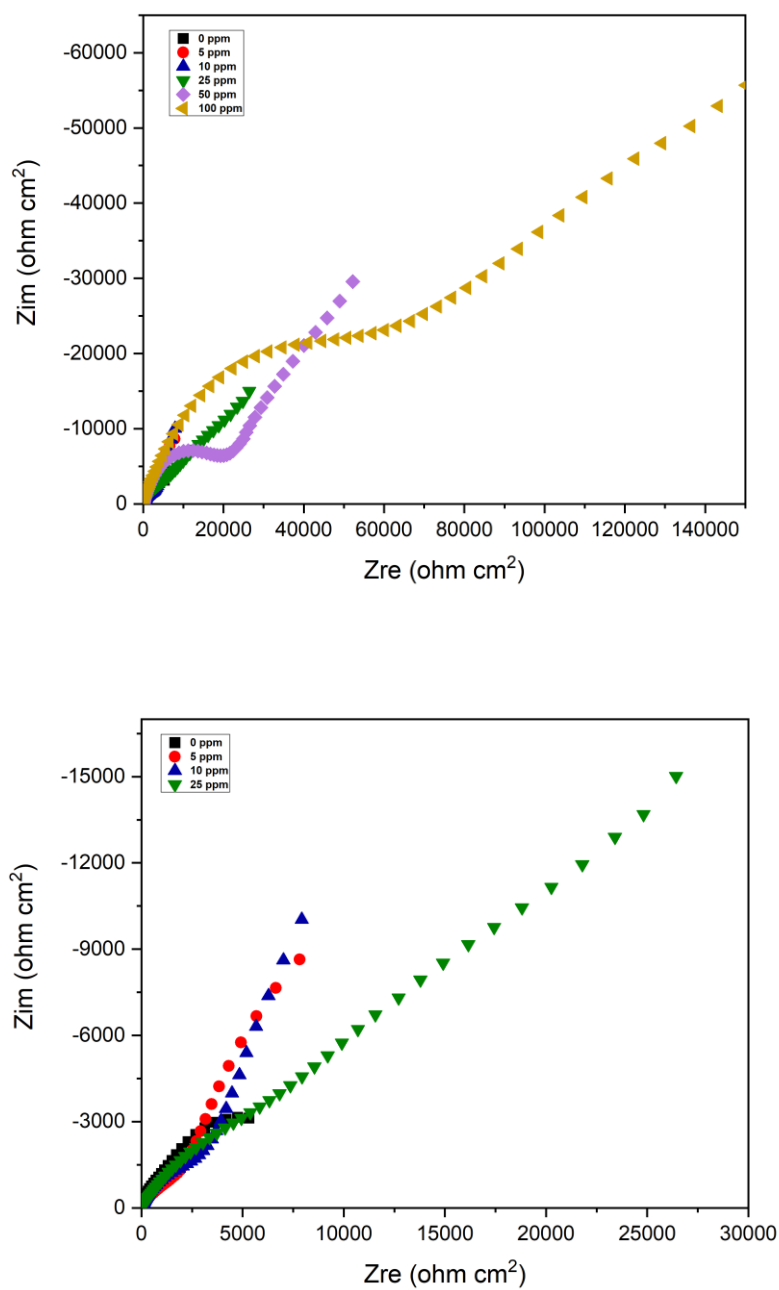


Figura 38. Efecto de la concentración del inhibidor en los Diagramas de Nyquist del acero 316L en $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$ a una temperatura de 45°C .



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

En los datos a 70°C (Figura 39), los semicírculos no dejan muy en claro la presencia de un segundo semicírculo, observándose en la mayoría de las concentraciones utilizadas un solo semicírculo, atribuida al proceso de transferencia de carga, teniendo un comportamiento de tipo capacitivo. A medida se puede observar que la impedancia es mayor conforme se aumenta la concentración del inhibidor del extracto de *Phalaris canariensis*, dando como resultado que la velocidad de corrosión disminuya.

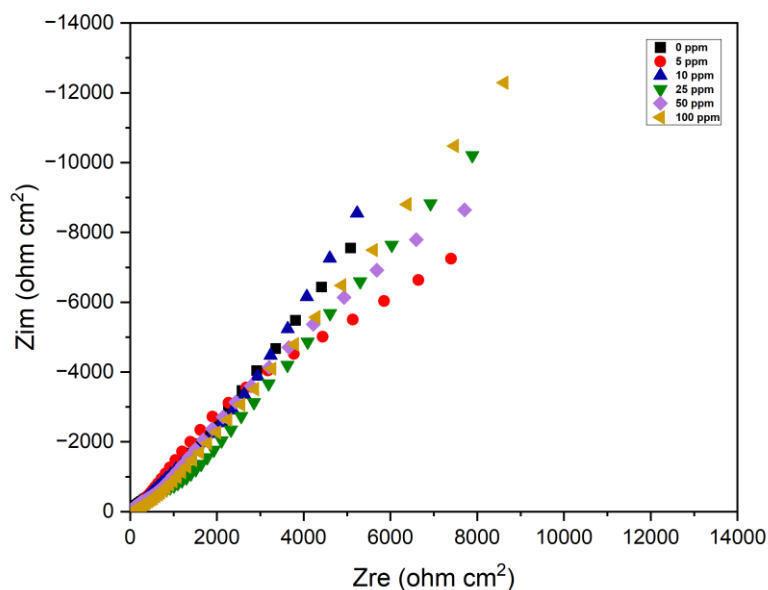


Figura 39. Efecto de la concentración del inhibidor en los Diagramas de Nyquist del acero 316L en LiCl/H₂O a una temperatura de 70°C.

En la Tabla 12, se observa que los valores de la capacitancia de la doble capa (C_{dl}) disminuyen con respecto al aumento de la concentración del inhibidor, esto indica una variación en la constante dieléctrica de la interfase debido a la presencia de especies absorbidas y un aumento en el espesor de la doble capa electroquímica ya que las moléculas del inhibidor desplazan a las moléculas de agua adsorbidas



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

sobre el metal, son muchas más grandes que las moléculas del H_2O . Adicionalmente, se puede observar los valores de eficiencia, la cual fue calculada con la ecuación (12). Se observa un aumento en dicha eficiencia con el aumento de la concentración del inhibidor, aunque también se observa que a medida que se aumenta la temperatura esta eficiencia disminuye para cada una de las concentraciones, es decir, la eficiencia que se tiene en una concentración de 100 ppm a una temperatura de $25^{\circ}C$ no es la misma que se tiene a una temperatura de $70^{\circ}C$.

Para el cálculo de C_{dl} se realizó con la siguiente ecuación [23]:

$$C_{dl} = \frac{1}{2\pi R_{ct} f_{max}} \quad (16)$$

Donde:

R_{tc} = Resistencia de transferencia de carga.

f_{max} = Frecuencia donde se obtuvo el máximo valor de la impedancia imaginario.

Tabla 12. Parámetros de impedancia para el acero 316L inmerso en LiCl/H₂O a diferentes concentraciones de *Phalaris canariensis*.

Temperatura (°C)	C_{inh} (ppm)	R_s (ohms- cm ²)	R_{tc} (ohms- cm ²)	C_{dl} (F/cm ²)	EI (%)
25	0	4	11145	1.281E-09	--
	5	4	17950	4.93E-10	37
	10	57	60767	4.30E-11	81
	25	38	172890	5.32E-12	93
	50	27	2127406	3.51E-14	99
	100	618	5271747	5.72E-15	99
45	0	2.	5312	5.63E-09	--
	5	3	7826	2.59E-09	32



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

70	10	4	7930	2.53E-09	33
	25	12	26428	2.27E-10	79
	50	13	52221	5.83E-11	89
	100	21	157058	6.45E-12	96
	0	4	5081	1.10E-09	- -
	5		7396	1.03E-09	31
	10	22	5231	5.77E-10	2
	25	6	7887	3.08E-10	35
	50	7	7710	2.21E-11	34
	100	88	8618	9.49E-12	41

En la Figura 40, se observa los valores de eficiencia con respecto a la temperatura para distintas concentraciones de inhibidor. Se puede observar la diferencia de eficiencia utilizando la técnica de polarización por aproximación de Tafel y la que se obtiene por impedancia electroquímica. El comportamiento general es el mismo, un aumento de la eficiencia al aumentar la concentración del inhibidor, excepto al aumentar la temperatura. Pero estos valores son muy diferentes, aunque estas diferencias ya han sido observadas por otros autores [96]. Cabe mencionar que la medida de porcentaje de inhibición no está exenta de errores en su cálculo y depende fuertemente de la metodología empleada.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

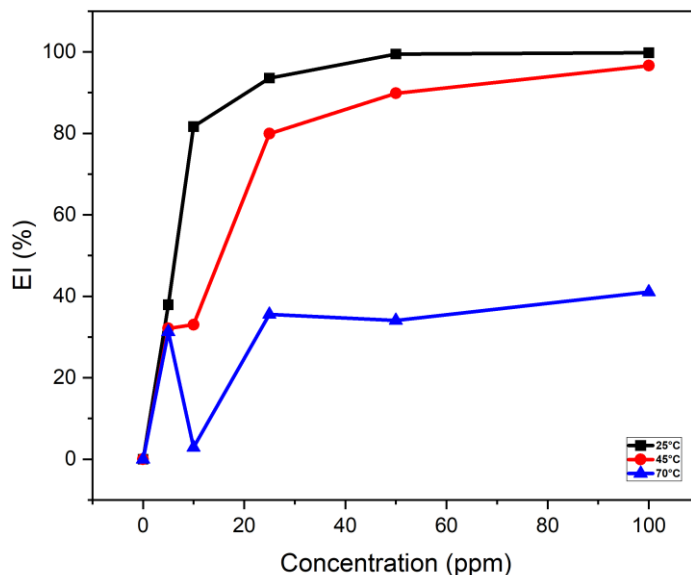


Figura 40. Variación de la eficiencia del inhibidor a diferentes concentraciones del inhibidor y temperaturas con la técnica de impedancia electroquímica.

5.4.4.2. Análisis de las gráficas de Bode.

En la Figura 41, se puede observar que conforme se aumenta la concentración de inhibidor en la solución LiCl/H₂O hay un aumento de la impedancia, este efecto puede asociarse a la formación de la película de productos de corrosión en la superficie del material. Asimismo, se nota la presencia de dos diferentes pendientes en estas gráficas, una de 1000 a 1 Hz aproximadamente, y otra entre 1 y 0.1 Hz, asociadas a los procesos electroquímicos que ocurren en la capa de productos de corrosión y otros en la doble capa electroquímica.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

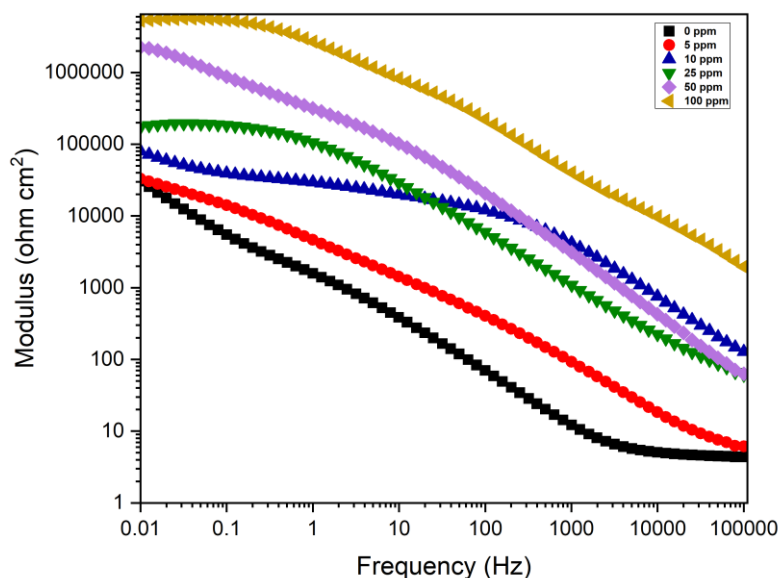


Figura 41. Diagrama de Bode (Modulo) del acero 316L en LiCl/H₂O a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 25°C.

En el diagrama de Bode del ángulo de fase, Figura 42, se puede observar que el máximo ángulo de fase aumenta con la concentración de inhibidor y que ha concentración 0 ppm hay dos picos máximos en el intervalo de bajas y medianas frecuencias; los cuales pueden ser atribuidos al proceso activacional o transferencia de carga y a la difusión de especies a través de los productos de corrosión respectivamente. En el caso de la concentración de 5 ppm se pueden observar dos picos, uno en baja frecuencia y el otro en alta frecuencia, esto se puede atribuir al proceso activacional, mientras que las altas frecuencias se pueden atribuir al proceso de formación de la película de productos de corrosión sobre la superficie metálica o pasivación. En la concentración de 10 ppm se pueden observar dos picos en el intervalo de medianas y altas frecuencias. En la concentración de 25 ppm se pueden observar un pico en altas frecuencias. Para la concentración de 50 ppm se formaron dos picos, uno en bajas frecuencias y otro en altas frecuencias. Finalmente, para la concentración de 100 ppm se puede observar 2 picos, el primero



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

a bajas frecuencias el cual puede ser atribuido a la difusión, y el segundo a altas frecuencias el cual se puede atribuir al proceso de formación de la película de productos de la corrosión. El comportamiento observado en los espectros de impedancia en el diagrama de Bode (ángulo de fase) indica que a partir de la concentración de 5 ppm se lleva a cabo el proceso de formación de la película de productos de corrosión.

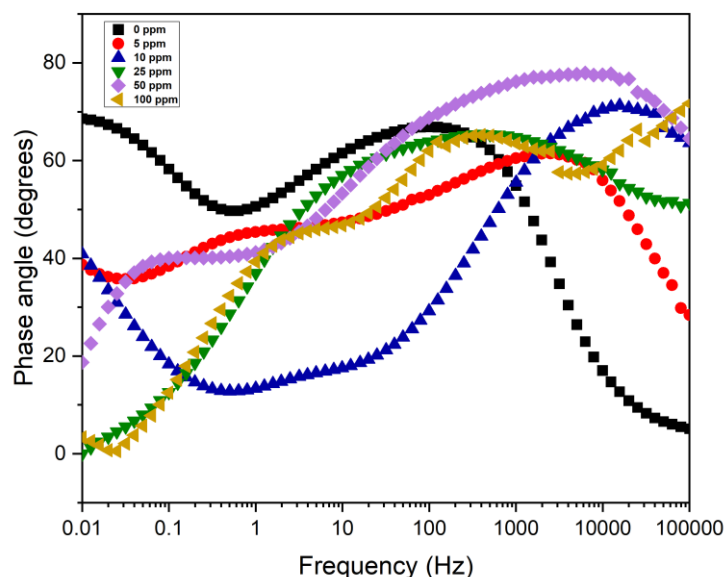


Figura 42. Diagrama de Bode (Angulo de fase) del acero 316L en LiCl/H₂O a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 25°C.

Se observa en la Figura 43, que conforme se aumenta la concentración del inhibidor hay un aumento en la impedancia, esto probablemente debido a que la película tiene una mayor adsorción en la superficie del metal a medida que la concentración aumenta, sin embargo, en comparación con los resultados anteriores, se puede observar una disminución en la impedancia, esto se atribuye a que la temperatura tiene repercusión sobre la capa pasiva que se forma en la superficie del metal. Asimismo, se nota la presencia de dos diferentes pendientes en estas gráficas, una



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

de 1000 a 1 Hz aproximadamente, y otra entre 1 y 0.1 Hz, asociadas a los procesos electroquímicos que ocurren en la capa de productos de corrosión y otros en la doble capa electroquímica.

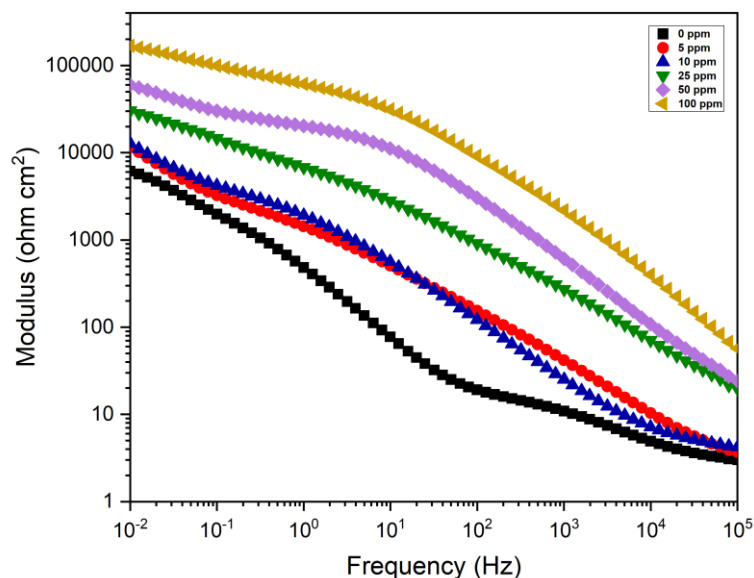


Figura 43. Diagrama de Bode (Modulo) del acero 316L en LiCl/H₂O a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 45°C.

En la Figura 44, se puede observar que el máximo ángulo de fase aumenta con la concentración de inhibidor, en una concentración de 0 ppm se presentan dos picos en el intervalo de bajas y altas frecuencias; los cuales pueden ser atribuidos al proceso activacional o transferencia de carga y a la formación de una capa protectora de productos de corrosión respectivamente. En 5 ppm se observa dos picos, uno en intermedias frecuencias y el otro en altas frecuencias, el caso de intermedias frecuencias se puede atribuir a la transferencia de carga, mientras que el de altas frecuencias se puede atribuir al proceso de formación de la película de productos de corrosión sobre la superficie del metal. En el caso de 10 ppm presenta un pico en frecuencias intermedias, atribuido al proceso de transferencia de cargas.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Por último, en 25 ppm, 50 ppm y 100 ppm se pueden observar dos picos, en intermedias y altas frecuencias respectivamente, el de intermedias frecuencias se atribuye a la transferencia de carga, mientras que el de altas frecuencias se debe a la formación de la película protectora en la superficie del metal.

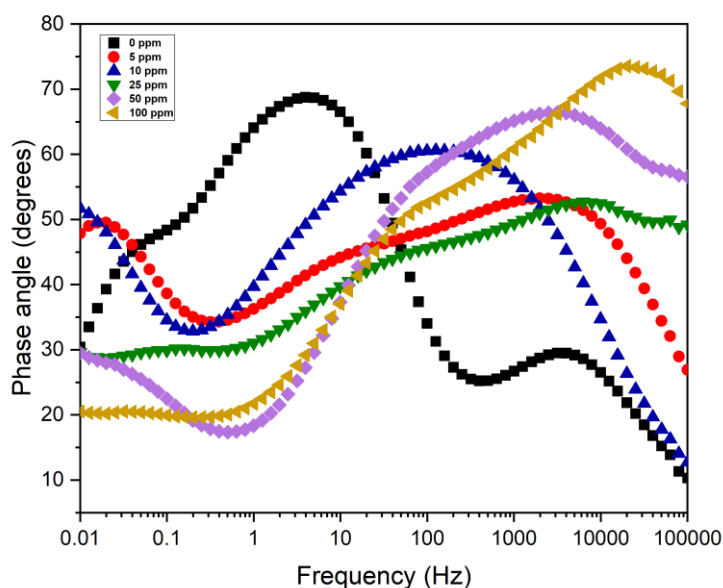


Figura 44. Diagrama de Bode (Angulo de fase) del acero 316L en LiCl/H₂O a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 45°C.

En la Figura 45, se observa que tanto la solución testigo como en las que contienen inhibidor presentan una impedancia similar, es decir, que no hay una mayor eficiencia por el uso del extracto de *Phalaris canariensis*. Asimismo, se nota la presencia de dos diferentes pendientes en estas gráficas, una de 1000 a 1 Hz aproximadamente, y otra entre 1 y 0.1 Hz, asociadas a los procesos electroquímicos que ocurren en la capa de productos de corrosión y otros en la doble capa electroquímica.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

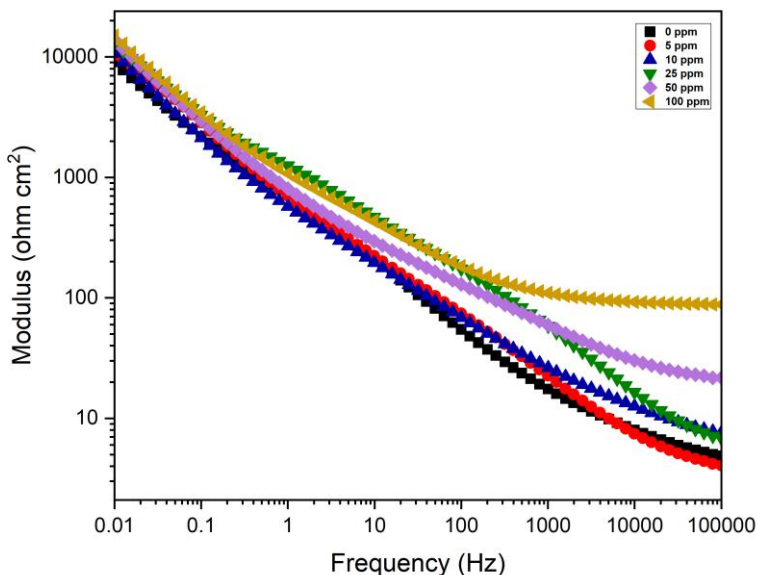


Figura 45. Diagrama de Bode (Modulo) del acero 316L en $\text{LiCl}/\text{H}_2\text{O}$ a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 70°C .

El espectro de impedancia de 0 ppm en la Figura 46, presenta un pico en frecuencias intermedias, atribuido al proceso de transferencia de carga, mientras que 5 ppm, 10 ppm y 100 ppm se presentan dos picos, cada uno en intermedias y bajas frecuencias, atribuido a la transferencia de cargas y al proceso de difusión, respectivamente. En 25 ppm se observan 2 picos, en altas e intermedias frecuencias, esto es atribuido a la formación de una capa de protección sobre la superficie del metal y a la transferencia de carga. Adicionalmente, se puede observar que los picos se han desfasado hacia valores de menores frecuencias, a diferencia de la figura 42 y figura 44, en donde se anejaron temperaturas menores en las pruebas, esto puede ser atribuido al crecimiento de la picadura.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

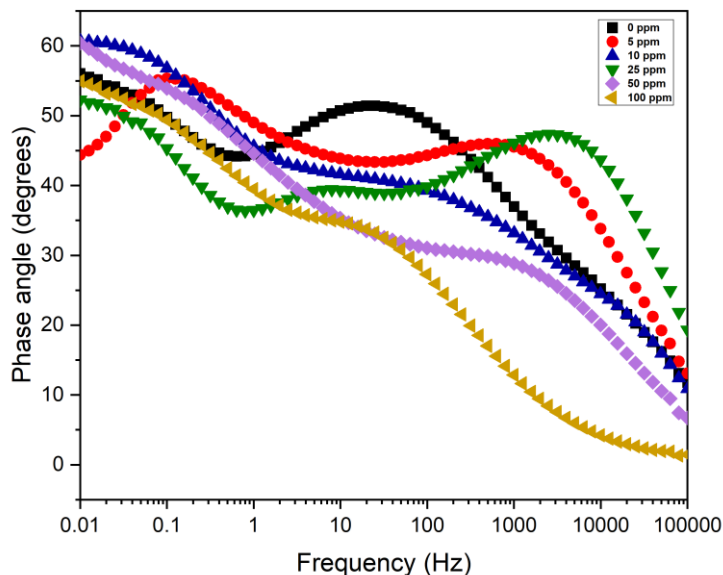


Figura 46. Diagrama de Bode (Angulo de fase) del acero 316L en LiCl/H₂O a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 70°C.

5.4.5. Ruido electroquímico.

El análisis de los datos obtenidos de las mediciones de ruido electroquímico (NE), se realizó para cada una de las concentraciones del inhibidor a diferentes temperaturas (25, 45 y 70°C) en dos tiempos, a las 0 h y a las 24 h, respectivamente.

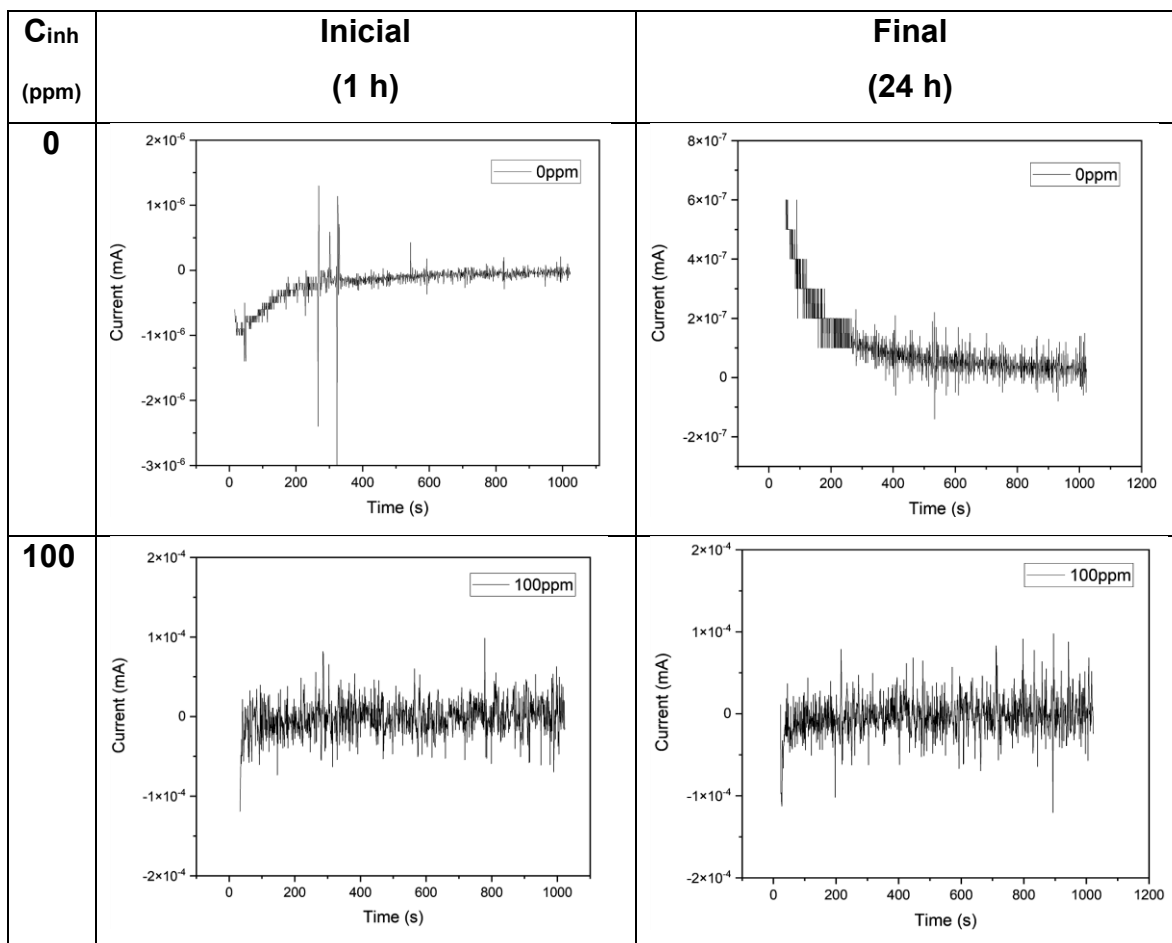
5.4.5.1. Corriente vs tiempo.

De acuerdo con la Figura 47, se puede observar transitorios de corriente frecuentes, pero de poca amplitud, esto puede estar relacionado con la formación de la película protectora del metal en su superficie, aunque en algunos casos se puede observar transitorios grandes, lo cuales se pueden atribuir a la corrosión localizada por un ataque de picadura, estos transitorios se dan principalmente en la muestra testigo y cuando la temperatura se aumenta.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

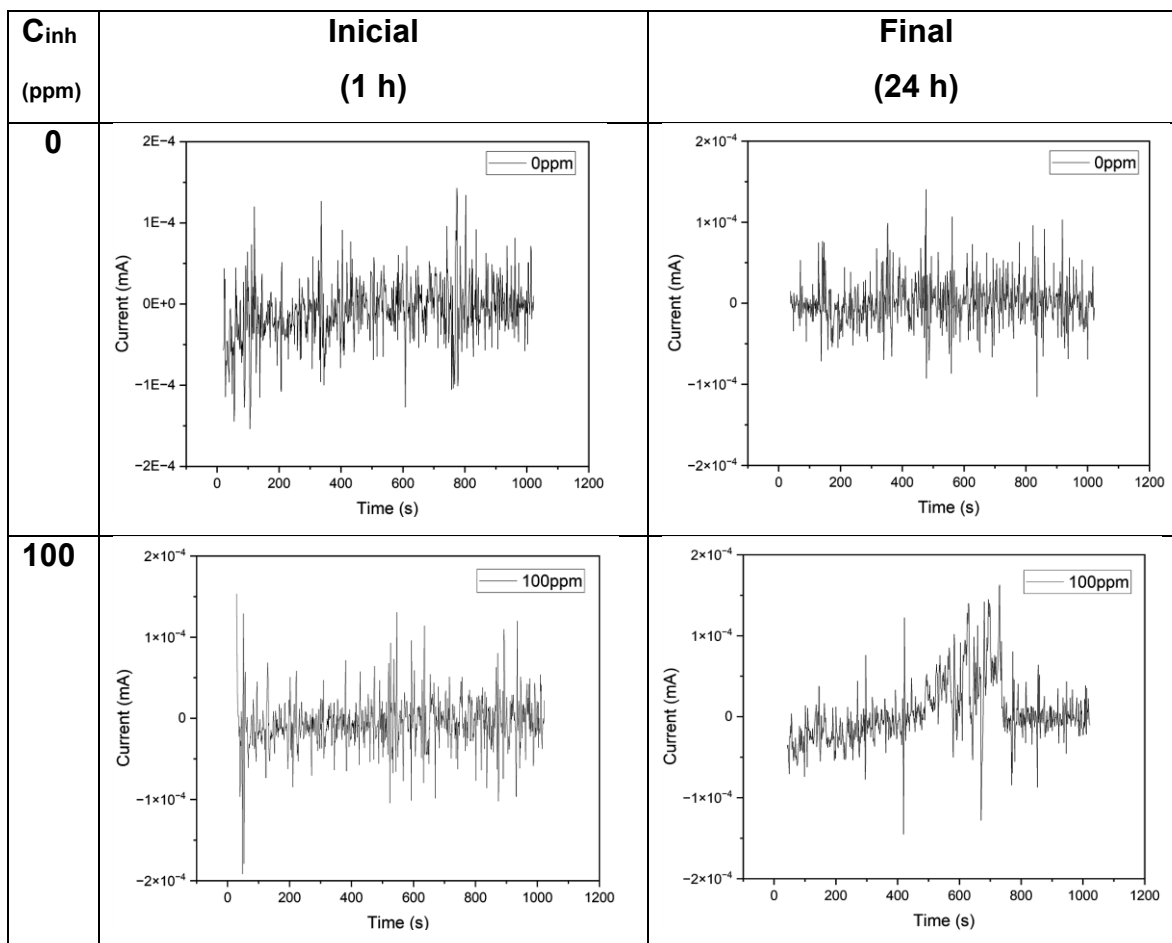
a) Temperatura 25°C





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

b) Temperatura 45°C.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

c) Temperatura 70°C.

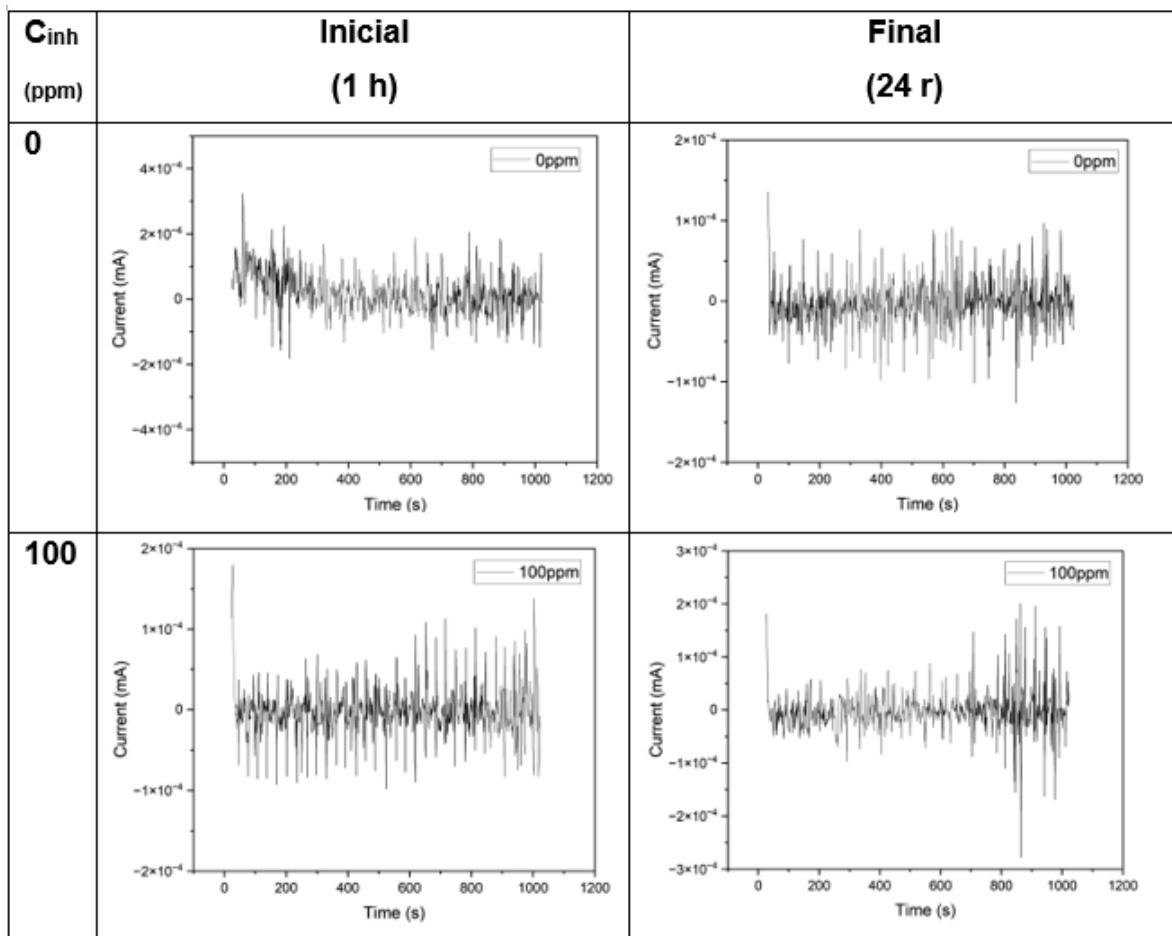


Figura 47. Series de tiempo para la corriente del acero 316L a 0 y 100 ppm de inhibidor a) 25, b) 45 y c) 70°C, en 0 y 24 h de prueba.



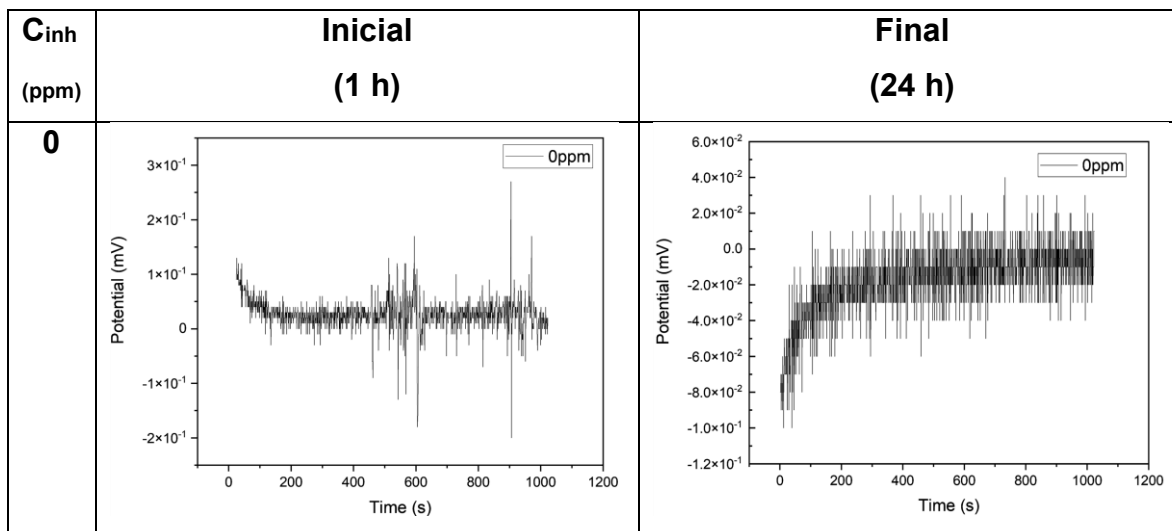
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

5.4.5.2. *Potencial Vs tiempo.*

Asimismo, se puede observar en la Figura 48 con respecto al potencial, que a medida que se aumenta la concentración del inhibidor tiende a disminuir el potencial de corrosión, esto se debe a la formación de una capa protectora del acero 316L haciéndolo menos susceptible a la corrosión.

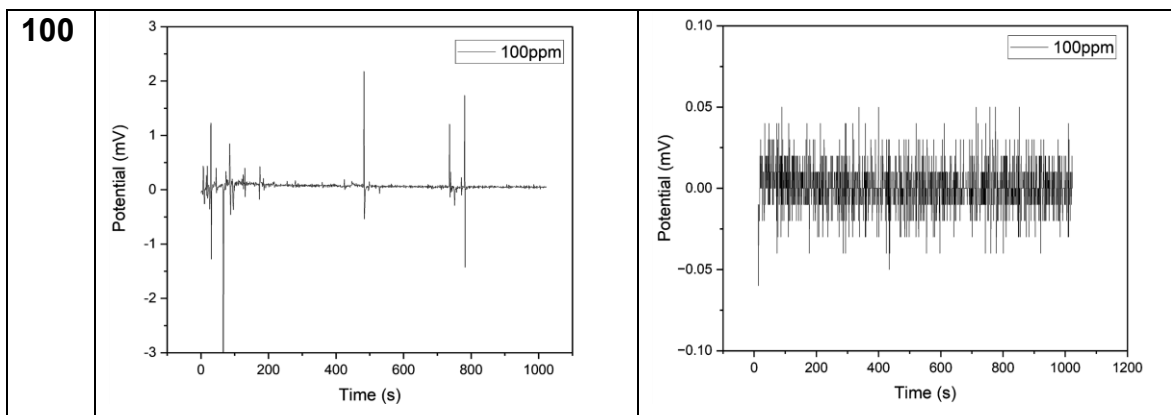
En un tiempo inicial el acero 316L muestra mayores transitorios debido a una heterogeneidad en la superficie, mientras que después de 24 h, se observa una menor presencia de transitorios, lo que se relaciona con una capa protectora más homogéneo.

a) Temperatura a 25°C

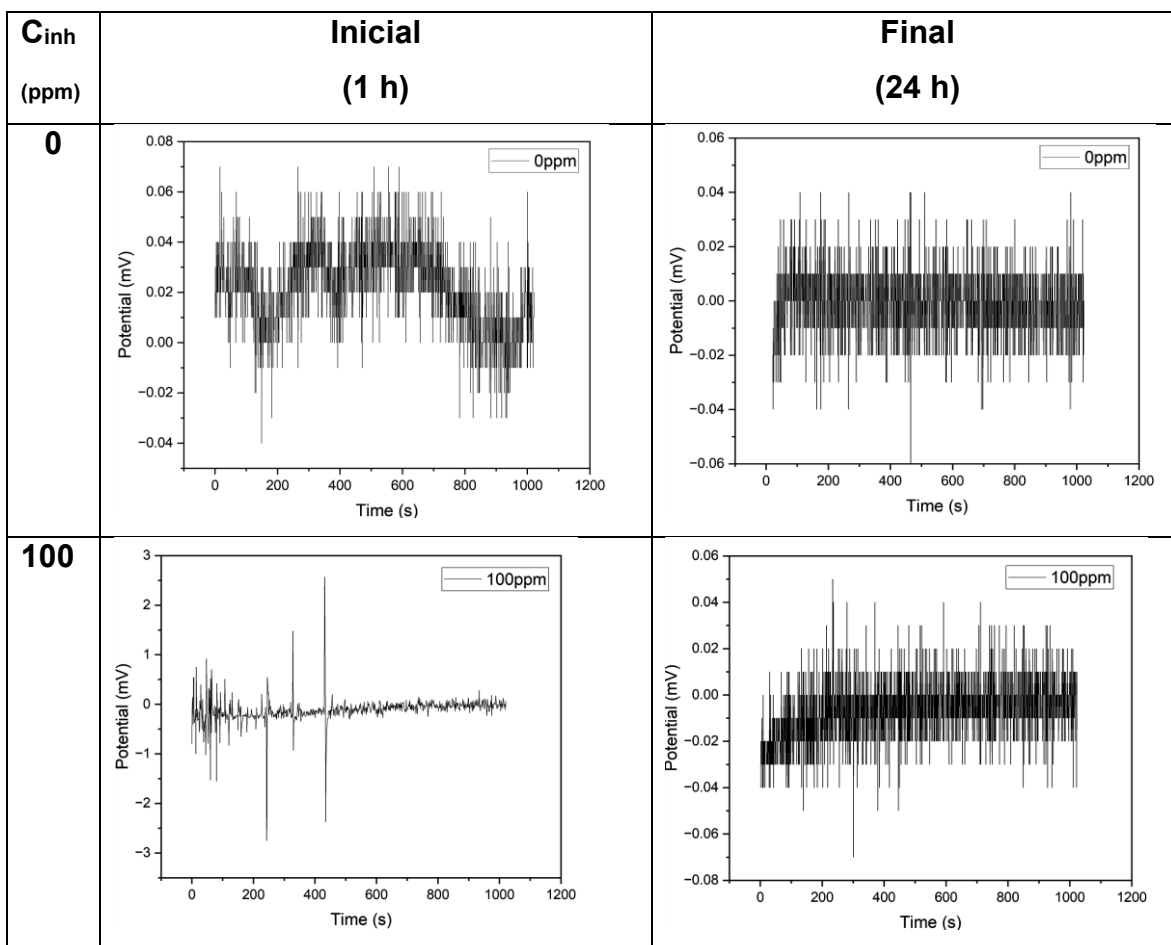




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



b) Temperatura a 45°C.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

c) Temperatura a 70°C.

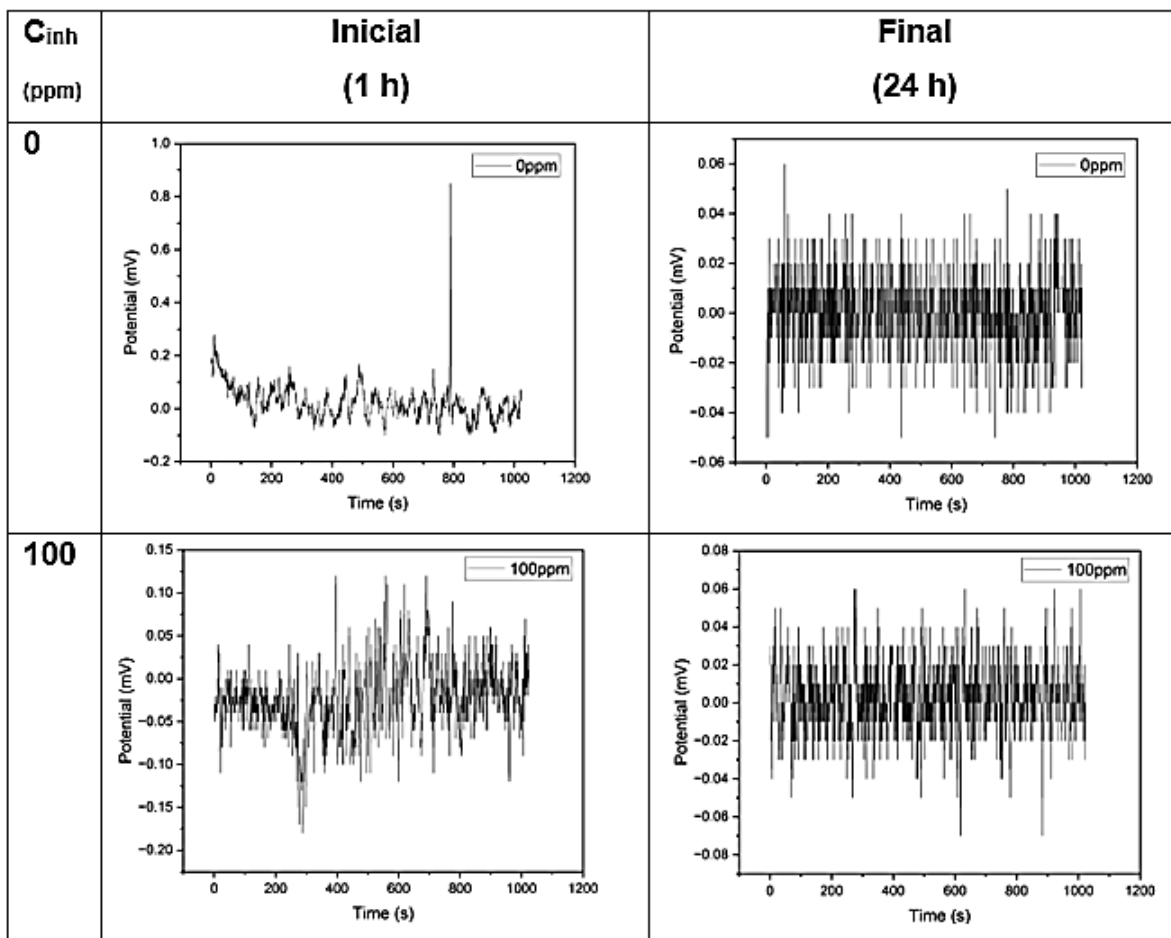


Figura 48. Series de tiempo en potencial del acero 316L a 0 y 100 ppm de inhibidor con respecto a la concentración de inhibidor a a) 25, b) 45 y c) 70°C, en 0 y 24 h de prueba.

5.4.5.3. Índice de localización.

En las tablas 13-15, se presentan los índices de localización calculados a partir de la ecuación (6), para el acero 316L con diferentes concentraciones de extracto de *Phalaris canariensis* a diferentes temperaturas.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

De acuerdo con la Tabla 3, los valores cercanos a 1 indican que el proceso de corrosión es dominado por corrosión localizada, por lo tanto, en los resultados obtenidos en cada una de las tablas se observa que los índices de localización corresponden a una corrosión localizada.

Tabla 13. Parámetros de Ruido electroquímico a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 25°C.

25°C						
C _{inh} (ppm)	0 h			24 h		
	R _n (ohm cm ²)	IL	Tipo de corrosión	R _n (ohm cm ²)	IL	Tipo de corrosión
0	86825	0.94	Localizada	160362	0.99	Localizada
5	67673	0.83	Localizada	41	0.99	Localizada
10	442	1.0	Localizada	185	0.99	Localizada
25	506	1.0	Localizada	24	0.99	Localizada
50	489	1.0	Localizada	305	0.99	Localizada
100	125	0.99	Localizada	69	0.99	Localizada

Tabla 14. Parámetros de Ruido electroquímico a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 45°C.

45°C						
C _{inh} (ppm)	0 h			24 h		
	R _n (ohm cm ²)	IL	Tipo de corrosión	R _n (ohm cm ²)	IL	Tipo de corrosión
0	202	1.0	Localizada	256	1.0	Localizada
5	347	1.0	Localizada	40	1.0	Localizada
10	703	1.0	Localizada	16	1.0	Localizada
25	534	1.0	Localizada	75	0.99	Localizada
50	957	0.99	Localizada	199	0.99	Localizada
100	3275	0.99	Localizada	156	1.0	Localizada



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Tabla 15. Parámetros de Ruido electroquímico a diferentes concentraciones de inhibidor a una temperatura de 70°C.

70°C						
C_{inh} (ppm)	0 h			24 h		
	Rn (ohm cm²)	IL	Tipo de corrosión	Rn (ohm cm²)	IL	Tipo de corrosión
0	159	1.0	Localizada	18	1.0	Localizada
5	737	1.0	Localizada	19	1.0	Localizada
10	15	1.0	Localizada	200	0.99	Localizada
25	516	0.99	Localizada	406	0.97	Localizada
50	525	1.0	Localizada	68870	0.9	Localizada
100	2056	0.99	Localizada	191	0.99	Localizada



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

6. CONCLUSIONES.

De acuerdo con el estudio realizado al acero 316L en un sistema de LiCl/H₂O en presencia de diferentes concentraciones de inhibidor de extracto de *Phalaris canariensis* (5, 10, 25, 50 y 100 ppm) y a diferentes temperaturas (25, 45 y 70°C), es posible obtener las siguientes conclusiones para este trabajo de investigación:

- El análisis de FT-IR demostró la presencia de bandas características del grupo carbonilo C=O, principalmente la presencia de ácidos grasos. Mientras que la GC-MS permitió identificar algunos de los compuestos mayoritarios del extracto de *Phalaris canariensis*, los ácidos grasos como ácido oleico, linoleico y palmítico. Estos compuestos son los principales responsables de dar el efecto inhibidor del acero 316L.
- En los resultados de OCP alcanzó estabilidad a partir de los 3600 s en cada una de las temperaturas utilizadas. Por otro lado, se puede observar que a medida que se aumenta la concentración del inhibidor de *Phalaris canariensis*, valor de OCP se vuelve más electropositivo, lo que indica una mayor resistencia a la corrosión. Sin embargo, al mismo tiempo que se aumenta la temperatura valor de OCP disminuye respecto a la temperatura ambiente (25°C), es decir que la temperatura es un factor que acelera la corrosión del metal.
- Los resultados mostrados en LPR mostraron un aumento en el valor de R_p cuando se aumentó la concentración del inhibidor de *Phalaris canariensis*. Los mayores efectos de inhibición se observaron al utilizar una concentración de 100 ppm.
- Mediante la técnica CP, se observan modificaciones en las pendientes anódicas y catódicas, generando un mecanismo de tipo mixto, siendo la concentración de 100 ppm la que presentó mejores propiedades anticorrosivas. Logrando eficiencias de hasta 98.91 % a una temperatura de 25°C y del 99.18% a 45°C. Sin embargo, a una temperatura de 70°C la



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

eficiencia disminuye por debajo de la muestra testigo, esto debido a una afectación a los componentes químicos del extracto por la temperatura.

- De acuerdo con EIS, los semicírculos formados en los análisis de Nyquist se atribuyen principalmente a la transferencia de carga y a la formación de una película protectora. El aumento de la R_{tc} y el decremento de la C_{dl} confirman la formación de una capa protectora sobre la superficie del acero 316L al aumentar la concentración del inhibidor del extracto de *Phalaris canariensis*.
- Se correlacionaron los resultados de CP, EIS y Pérdida de masa, conforme se aumenta la concentración del extracto de *Phalaris canariensis*, aumenta la eficiencia. Cabe mencionar que la temperatura tiende afectar esta eficiencia, a medida que aumenta la temperatura, disminuye la eficiencia del inhibidor.
- El extracto de *Phalaris canariensis*, ajusta el cambio en la energía libre de Gibbs a valores negativos, alrededor de los -20 kJ/mol, esto indica que, el proceso de adsorción es espontáneo, llevándose a cabo una adsorción física (fisisorción) en la superficie del acero 316L, siguiendo una isoterma de adsorción de Temkin.
- En las imágenes que se obtuvieron por SEM, se observa daños en la superficie del metal, principalmente cuando la solución no tiene inhibidor y cuando la temperatura aumenta. Sin embargo, cabe mencionar que se observa una mayor protección del metal cuando se añade una concentración de inhibidor de 100 ppm a una temperatura de 25°C:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

7. REFERENCIAS.

- [1]. Landolfo, R., Cascini, L., & Portioli, F. (2010). Modeling of metal structure corrosion damage: A state of the art report. *Sustainability*, 2(7), 2163-2175. <https://doi.org/10.3390/su2072163>
- [2]. NACE International. (2002). *Glossary of corrosion related terms*. Houston, TX, USA.
- [3]. Uhlig, H. H. (1971). *Corrosion and corrosion control* (2nd ed.). John Wiley and Sons, Inc.
- [4]. Koch, G. H., Brongers, M. H. P., & Yoon, J. H. P. (2002). Corrosion costs and preventive strategies in the United States. *Summ. Shute. Inst.*
- [5]. Videla, H. A., & Salvarezza, R. C. (1984). *Introducción a la corrosión microbiana* (Biblioteca Mosaico). Librería Agropecuaria.
- [6]. Oguzie, E. E. (2008). Evaluation of the inhibitive effect of some plant extracts on the acid corrosion of mild steel. *Corrosion Science*, 50, 2993–2998.
- [7]. Suarez Quintero, J. A. (2018). Evaluación de inhibidores de corrosión aplicados en la industria mediante pruebas electroquímicas. *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*.
- [8]. Cogliatti, M., Bodega, J., & Dalfonso, C. (2014). *El cultivo de alpiste (Phalaris canariensis L.)*. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
https://digital.cic.gba.gob.ar/bitstream/handle/11746/6343/11746_6343.pdfPDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [9]. De Bernardi, L. (2020). *Desarrollo productivo y comercial del alpiste*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Argentina.
- [10]. Canaryseed Development Commission of Saskatchewan. (2016). *Canaryseed (Phalaris canariensis) nutrient composition*.
<https://www.canaryseed.ca/documents/NutritionFacts-CanaryseedGroats-May2016.pdf>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

- [11].Mason, E., L'Hocine, L., Achouri, A., & Karboune, S. (2018). Hairless canaryseed: A novel cereal with health promoting potential. *Nutrients*, 10(9), 1327. <https://doi.org/10.3390/nu10091327>
- [12].Adrian, J., Lunven, P., & Carnovale, E. (1969). Phalaris. 1. Canary grass (Phalaris canariensis L.), an exceptional source of tryptophan. *Annales de la Nutrition et de l'Alimentation*, 23, 299-312.
- [13].Fundación Red de Energía BUN-CA. (2011). *Manual técnico: Refrigeración comercial* (1st ed.). Biomass Users Network (BUN-CA).
- [14].Gürel, A. E., Yıldız, G., Ergün, A., & Ceylan, İ. (2021). Exergetic, economic and environmental analysis of temperature controlled solar air heater system. *Clean Engineering and Technology*.
- [15].Sateesh, C., Nandakishora, Y., Sahoo, R. K., & Murugan, S. (2021). Study of cryogenic CO₂ capture with solar-assisted VAR system. *Clean Engineering and Technology*, 5.
- [16].Meraj, M., Azhar, M., Khan, M. Z., Anjum, M. S., Ahmad, M. S. F., Rasheed, M. F. A., Ahmed, S. I. I., & Alam, M. N. M. (2021). Thermal modelling of PVT-CPC integrated vapour absorption refrigeration system. *Materials Today: Proceedings*, 38.
- [17].Kumar, A., & Rakshit, D. (2021). A critical review on waste heat recovery utilization with special focus on Organic Rankine Cycle applications. *Clean Engineering and Technology*, 5.
- [18].Zhou, S., Zhao, X., Cai, D., Deng, J., Gao, Y., & He, G. (2020). Experimental evaluation on flow boiling heat transfer of R290/POE-oil working fluid for absorption refrigeration in smooth horizontal tubes. *International Journal of Thermal Sciences*, 106641.
- [19].Chen, P., He, G., Gao, Y., Zhao, X., & Cai, D. (2020). Conventional and advanced exergy analysis of an air-cooled type of absorption-ejection refrigeration cycle with R290-mineral oil as the working pair. *Energy Conversion and Management*, 112703.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

- [20]. Mohtaram, S., Omid, M., Lin, J., Sun, H., & Chen, W. (2019). Exergy analysis of a multi-mixture working fluid absorption refrigeration cycle. *Case Studies in Thermal Engineering*, 100540.
- [21]. Finšgar, M., & Jackson, J. (2014). Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry. *Corrosion Science*.
- [22]. Priharti, S. T., Nizar, U. K., Etika, S. B., Oktavia, B., & Putra, A. (2021). Watermelon peel extract as green corrosion inhibitor for ST-37 carbon steel in seawater. *International Journal of Innovation in Mechanical Engineering & Advanced Materials*, 3, 2477-541X.
<https://doi.org/10.22441/ijimeam.v3i3.13759>
- [23]. Ihamdane, R., Tiskar, M., Chaouch, A., Outemsa, B., Zelmat, L., & Dagdag, O. (2023). Essential oil of *Origanum vulgare* as a green corrosion inhibitor for carbon steel in acidic medium. *Arabian Journal for Science and Engineering*.
- [24]. Mu'azu, K., Aliyu, M. M., Mohammed, A. T., Lasisi, S., Dahiru, R., & Suleiman, I. Y. (2022). Ethanol extract of avocado leaf as corrosion inhibitor for the protection of mild steel in acidic environment. *Journal of Materials and Environmental Science*, 13. 10.6084/m9.figshare.21699587
- [25]. Bhardwaj, N., Prasad, D., & Haldhar, R. (2018). Study of the *Aegle marmelos* as a green corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium: Experimental and theoretical approach. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 4(61).
<https://doi.org/10.1007/s40735-018-0178-4>
- [26]. Nikitasari, S., Sundjono, G., & Priyotomo, A. (2021). Sargassum seaweed extract as a novel green corrosion inhibitor for API-5L carbon steel. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*.
- [27]. Avilés, M. (2024). *Diseño, ensamble y evaluación de la corrosión de un sistema de enfriamiento por absorción de vapor de simple efecto utilizando la mezcla de trabajo H₂O-LiCl con disipación térmica natural y forzada*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

- [28]. When, T., et al. (2020). Experimental study on the corrosion behavior and regeneration performance of KCOOH aqueous solution. *Solar Energy*, 201, 638-648.
- [29]. Li, N., et al. (2017). A working pair of $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ and its application in a single-stage solar-driven absorption refrigeration cycle. *International Journal of Refrigeration*, 83, 99-110.
- [30]. Kaneko, M., et al. (2000). Pitting of stainless steel in bromide, chloride, and bromide-chloride solutions. *Corrosion Science*, 42, 67-78.
- [31]. A. Igual Muñoz, A., et al. (2004). Corrosion studies of austenitic and duplex stainless steels in aqueous lithium bromide solution at different temperatures. *Corrosion Science*, 46, 2955-2974.
- [32]. Mariano, D., et al. (2019). Localized corrosion and stress corrosion cracking of stainless steels in halides other than chlorides solutions: A review. *Corrosion Reviews*, 38(1), 43-75.
- [33]. Alter, B. L., Mestres, L. F., & Laco, I. I. J. (2003). *Corrosion y protección*. Ediciones UPC.
- [34]. Fernández, G. A. J. (1984). *Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas.
- [35]. Lemus, A. R. N. (2015). *Análisis electroquímico del proceso de corrosión del compósito de TiC/Alx-Cuy*. Universidad Veracruzana, Instituto de Ingeniería.
- [36]. Roberge, P. R. (2008). *Corrosion engineering: Principles and practice*. McGraw-Hill.
- [37]. Schweitzer, P. A. (2005). Corrosion Engineering Handbook: Fundamentals of metallic corrosion, atmospheric and media corrosion of metals. In *ASM Handbook, Vol. 13* (pp. 550-551). American Society of Metals International.
- [38]. Sastri, V. S. (2011). *Green corrosion inhibitors*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

- [39]. Cramer, D. Stephen, & Covino, S. Bernard. (2005). Corrosion: Materials, environments, and industries. In *ASM Handbook, Vol. 13* (pp. 210-213). American Society of Metals International.
- [40]. Yang, L. (2008). *Techniques for corrosion monitoring*. Woodhead Publishing.
- [41]. Feliu, S., & Andrade, M. C. (Eds.). *Corrosión y protección metálica*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- [42]. Fon Fay, M., & Zumbado, H. (2019). *Análisis proximal en alimentos, fundamentos teóricos y técnicas experimentales*. Colloquium, Centro de Formación, Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
- [43]. Lugo, G. (2015). *Evaluación electroquímica de recubrimientos anticorrosivos en condiciones de alta presión*. Universidad Veracruzana, Boca del Río.
- [44]. Orozco, R. *Recubrimientos anticorrosivos*. Unidad de Corrosión, Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana.
- [45]. Ávila, J. G. J. (1996). *Más allá de la herrumbe*. Fondo de Cultura Económica, S.A. de C.V.
- [46]. Peabody, A. W. (2001). *Peabody's Control of Pipeline Corrosion* (2nd ed., R. L. Bianchetti, Ed.). NACE International. Houston, TX, USA.
- [47]. Morgan, J. H. (1959). *Cathodic Protection: Its Theory and Practice in the Prevention of Corrosion*. Barnicotts. London, p. 3.
- [48]. Montoya, R., Aperador, W., & Bastidas, D. M. (2009). Influences of conductivity on cathodic protection of reinforced alkali-activated slag mortar using the finite element method. *Corrosion Science*, 51, 2857-2862.
- [49]. Pedferri, P. (1996). Cathodic protection and cathodic prevention. *Construction and Building Materials*, 10, 391-402.
- [50]. Pourbaix, M. (1987). *Lecciones de Corrosión Electroquímica*. Instituto Español de Corrosión y Protección. Madrid, pp. 96, 137, 173, 190, 243.
- [51]. von Bechamann, W., & Schwenk, W. (1975). *Handbook of Cathodic Protection*. Portcullis. Surrey, England, pp. 37-38, 58-59, 153-173, 185-198, 208-217.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

- [52]. Núñez, L., & Cepero, A. (1983). Protección anódica del acero CT-3 en ácido sulfúrico. *Revista de Ciencias Químicas*, 14(1).
- [53]. González Fernández, J. A. (1989). *Control de la Corrosión: Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas*. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- [54]. Florian, M. (1987). *Corrosion Mechanisms*. Los Angeles, California.
- [55]. Palmer, J. W., Hedges, W., & Dawson, J. L. (2004). *A Working Party Report on the Use of Corrosion Inhibitors in Oil and Gas Production* (Vol. 840). CRC Press.
- [56]. Lowmunkhong, P., Ungthararak, D., & Sutthivaiyakit, P. (2010). Tryptamine as a corrosion inhibitor of mild steel in hydrochloric acid solution. *Corrosion Science*, 52(1), 30-36.
- [57]. Sastri, V. S. (1998). *Corrosion Inhibitors: Principles and Applications*. Wiley. New York.
- [58]. Ramachandran, S. (2017). Corrosion inhibitors-advancements in testing. In S. Ramachandran (Ed.), *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies* (pp. 455-469). Woodhead Publishing.
- [59]. Gómez, F., & Alcaraz, D. (2004). *Manual básico de corrosión para ingenieros*. Universidad de Murcia.
- [60]. Bazaldúa, M. (2013). *Desarrollo de un inhibidor de corrosión verde a base de extracto de nopal para su uso en acero al carbono 1018 expuesto en HCl 1M*. Instituto Tecnológico de Chihuahua. Chihuahua, Chih.
- [61]. García, I. R. (2014). *Inhibidores de corrosión en medios ácidos a partir de extractos naturales*. Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, B. C.
- [62]. Salensky, G. (1987). Organic corrosion inhibitors. In *Handbook of Coatings Additives, Industry: A Review*. *Corrosion Science*, 86, 17-41.
- [63]. Marcus, P. (Ed.). (2012). *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice* (3rd ed., Vol. 2). Taylor and Francis Group, 395-419.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

- [64]. Cabrera, D. (2013). *Efecto del flujo turbulento en la corrosión de soldaduras de aceros de alta resistencia* (Tesis doctoral). Universidad Veracruzana. Veracruz.
- [65]. Gomez, L. (2016). *Eficiencia de un inhibidor verde extraído de cáscara de manzana mediante el sistema Soxhlet en la corrosión del acero 1018 en medio ácido*. Centro de Investigación de Materiales Avanzados, S.C.
- [66]. Flores, P. (2016). *Comportamiento de inhibidores “verdes” en la corrosión de acero 1018 en medios ácidos*. Chihuahua, Chih.
- [67]. Da Rocha, J. C. (2010). Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution by fruit peel aqueous extracts. *Science Direct*, 52(7), 2341-2348.
- [68]. Rana, M., Joshi, S., & Bhattarai, J. (2017). Extract of different plants of Nepalese origin as green corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M NaCl solution. *Asian Journal of Chemistry*, 29(5), 1130-1134.
<https://doi.org/10.14233/ajchem.2017.20449>
- [69]. Paul, S., & Koley, I. (2016). Corrosion inhibition of carbon steel in acidic environment by papaya seed as green inhibitor. *J Bio Tribo Corros*, 2(6).
<https://doi.org/10.1007/s40735-016-0035-2>
- [70]. Gaytán, D. E. (2022). *Efecto de flujo turbulento en la corrosión de un acero X100 inmerso en salmuera NACE con diferentes concentraciones de inhibidor* (Tesis doctoral). Universidad Veracruzana, Instituto de Ingeniería.
- [71]. Radwan, A. B., Sliem, M. H., Okonkwo, P. C., Shibl, M. F., & Abdullah, A. M. (2017). Corrosion inhibition of API X120 steel in a highly aggressive medium using stearamidopropyl dimethylamine. *Journal of Molecular Liquids*, 220, 220-231.
- [72]. Bouklah, M., Lagrenee, B., & Bentiss, F. (2006). Thermodynamic properties of 2,5-bis(4-methoxyphenyl)-1,3,4-oxadiazole as corrosion inhibitor for mild steel in normal sulfuric acid medium. *Corrosion Science*, 48, 2831-2839.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

- [73]. Zhao, J., & Chen, G. (2012). The synergistic inhibition effect of oleic-based imidazoline and sodium benzoate on mild steel corrosion in a CO₂-saturated brine solution. *Electrochimica Acta*, 69, 254-263.
- [74]. Vermeulan, T. H., Vermeulan, K., & Hall, L. C. (1966). Hall Fundamental. *Industrial & Engineering Chemistry*, 5, 183-187.
- [75]. Hutson, N. D., & Yang, R. T. (1997). Theoretical basis for the Dubinin-Radushkevitch (DR) adsorption isotherm equation. *Adsorption*, 3(3), 189-194.
- [76]. Tempkin, M. I., & Pyzhev, V. (1940). Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalyst. *Acta Phys. Chim. USSR*, 12(1), 327.
- [77]. Chun, J. H. (2012). *Developments in electrochemistry*. BoD-Books on Demand.
- [78]. Kuroda, D., Hiromoto, S., Hanawa, T., & Katada, Y. (2002). Corrosion behaviour of nickel-free high nitrogen austenitic stainless steel in simulated biological environments. *Corrosion Science*, 43(12), 3100-3104.
- [79]. Stern, M., & Geary, A. L. (1957). Electrochemical polarization. I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves. *Journal of the Electrochemical Society*.
- [80]. Jüttner, K. (1990). Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of corrosion processes on inhomogeneous surfaces. *Electrochimica Acta*, 35(10).
- [81]. Galván Martínez, R. (2004). *Estudio de la influencia del flujo turbulento sobre la corrosión de un acero al carbono en medios acuosos que contienen H₂S disueltos (amargos)* (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. México.
- [82]. Gamry Instruments. (n.d.). *Electrochemical impedance spectroscopy primer*. Retrieved from www.gamry.com.
- [83]. Macdonald, J. R., & Johnson, W. B. (2005). Fundamentals of impedance spectroscopy. In E. Barsoukov & J. R. Macdonald (Eds.), *Impedance spectroscopy: Theory, experiment and applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

- [84]. Mansfeld, F., Shih, H., & Tsai, C. H. (1993). Analysis of EIS data for common corrosion processes. In J. R. Scully, D. C. Silverman, & M. W. Kendig (Eds.), *Electrochemical impedance: Analysis and interpretation*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia.
- [85]. Cottis, R., & Turgoose, S. (1999). *Electrochemical impedance and noise*.
- [86]. Genescá, J. (2002). *Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. México.
- [87]. Álvarez-Lemus, N. R. (2015). *Análisis electroquímico del proceso de corrosión del compuesto TiC-Alx-Cuy* (Tesis de Maestría). Universidad Veracruzana, Boca del Río, Veracruz, México.
- [88]. ASTM G199-09. (2009). *Standard guide for electrochemical noise measurement*.
- [89]. Chávez Gómez, L. E. (2008). *Medición de la velocidad de corrosión mediante la técnica de ruido electroquímico en aceros inoxidables 304 y 316L*.
- [90]. Ebenso, E. E., Eddy, N. O., & Odiongenyi, A. O. (2008). Corrosion inhibitive properties and adsorption behaviour of ethanol extract of *Piper guineensis* as a green corrosion inhibitor for mild steel in H₂SO₄. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, 2(11), 107-115.
- [91]. Esquivel, A. R. (2020). *Inhibición ecológica de la corrosión de materiales metálicos en agua de mar sintética* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, CIICAp.
- [92]. Eddy, N. O., Odiongenyi, A. O., Ameh, P. O., & Ebenso, E. E. (2012). Corrosion inhibition potential of *Daniella oliverri* gum exudate for mild steel in acidic medium. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 7425–7439. Recuperado de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00986445.2013.809000>.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

- [93]. El-Etre, A. Y. (2007). Inhibition of acid corrosion of carbon steel using aqueous extract of olive leaves. *Journal of Colloid and Interface Science*, 314, 578–583.
- [94]. Martínez, J. J., Flores, A. M., & González, R. J. G. (2023). Green corrosion and DFT studies of *Ustilago maydis* extract for carbon steel in sulfuric acid. *Journal of Molecular Structure*, 136509. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.136509>
- [95]. Bahramipناه, N. D., Moradi, S., & Nikmanesh, S. (2016). Impedance spectroscopy studies on corrosion inhibition behavior of synthesized N,N'-bis(2,4-dihydroxyhydroxybenzaldehyde)-1,3-propandiimine for API-5L-X65 steel in HCl solution. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 7(2), 153-160. <https://doi.org/10.5229/JECST.2016.7.2.153>
- [96]. Okafor, P. C., Ebenso, E. E., & IORWOR, C. O. (2008). Inhibitory action of *Phyllanthus amarus* extracts on the corrosion of mild steel in acidic media. *Corrosion Science*, 50(8), 2310–2317.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Maestría en Sustentabilidad Energética.

Cuernavaca, Morelos, a 14 de octubre de 2024.

DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO
COORDINADOR DEL POSGRADO EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: Uso del Extracto de *Phalaris canariensis* como inhibidor de la corrosión del acero 316L en el sistema LiCl/H₂O., que presenta el alumno **Earvin Galván**, para obtener el título de la **Maestría en Sustentabilidad Energética**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**:

Atentamente

Por una humanidad culta

NOMBRE
DR. ISAÍ ROSALES CADENA
DR. ULISES LEÓN SILVA
DRA. DAYSI ELUSAÍ MILLÁN OCAMPO
DRA. ANA KAREN GÁLVEZ LARIOS
DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

JAMS*MLGE/nmc.



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Edificio 65.
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 6212 / mse_ciicap@uaem.mx

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JOSE GONZALO GONZALEZ RODRIGUEZ | Fecha:2024-10-17 10:44:57 | FIRMANTE

mbz8IBJwo1w1F7Rv/FPqWtCTJhcq0AW20AbnfaekMIDySBE+ZriZu0Rlpao9/U+7vp945HOCKlPoF8aoylVwZH45IpYc9VvPaHW+HvYiO1bC11C4YEpiCQBNi9IzFDUsLuFdlXm8G6TiAumclmhfxml0TnBDS1BB5FE+B9LPq7HxTfQXfYJNqfDbfEUfD5wkDgEFi3MrLve3Gb6aghN3s2Iip1RLicsJ/LDj3NXGOkE3UVCP8KQHURj3NH0zzFXFMmbz8IVQTpgUTKCT4QIZTijG+wzzo7LjZgKdM5VxQcQyqmZpaulcAupxYn19lyRktnFW3MA4H7tYw+tz2RBmw==

ISAI ROSALES CADENA | Fecha:2024-10-18 07:58:37 | FIRMANTE

NFQq7K7izReLUt0aD0FEDlpwnWajMk/U6m+quKGigAoJPe2N+DCOk5xOit1EDpgnfq3+TmRSfChYSq4NQMRcbCFX3Mwq1VVhlyLlyObTwAUHUFBPPT64izVycMP6l0Of7/wVso4rZpYvJSBcQnJUqp2kfy/v71k2pno3ab3A8hXdH/5TolfdArwsQn6YbS//m88JmLNEBdFq+YG3I538RPXFmGCWYRAROUx4O5Bt86kr1hPakEq+NBTLw5Z6iYJTiLGqWyE2B/13GfQRlZ2Qu39T5RjglvNmGSEsSC83yRIPR8gO4soSVwN6CGeUs90zQVDjDDb2BP0GpYyoRqRQ==

ANA KAREN GALVEZ LARIOS | Fecha:2024-10-22 08:21:21 | FIRMANTE

zZisqVmsztm/pDymzu+5RABpN1iD8U/hxyL1xgOADagCfZyauubip/BIR42VRo6+jLZgrlfvdfLL6ysewFFcKKoBIBYg78yXMEI58ygvixlGEfdax4+YVplC7wku3o6xJjh+U6ACsQPLcUEden1hxvt4ypQqN8pSNkbtAay/G/yEWQ9TN8ja8cRB1cBF8E8xOMP0l1YOTNjilkWcaB8nu3xYz4KXtQ1n3k7VB6qlwGTPe4M+CJQ1D9HYrc9PvMHtaFDzxUSw8O0cgCwvPHdGs3HM+swR+poRBLEuyxBtHGQjGkwoNk6ohNiueN34uaToy7QPNCqHJP0fovUYk3A==

ULISES LEON SILVA | Fecha:2024-10-22 20:27:25 | FIRMANTE

CccmEEcsQYbZyum7MdSVDA9g+XPrGna2IRX3usooskXYoACgy7RRegAD7GLT3GtYsQkpfdduX/ydFIMG5mQTGHJCJAxdNlu6bqJokz2LajLydeHDVAacQAKqc2kSE+r5fhEDq9coRmEMoWtQVz/SmupicVCpBDQYZ+IRR77fNR21DsPs8J87ZiRDAZZ0aMazAzyzInziJStKnfT3KtwG6ZsNmVriWCUwoJFFBDDC+Naws6cGYa1o5WhU2oQayz45LYhmDeHS4CAZflgpDygrfrrZ5fXWJmGxS3odMwPka7bdX50e4ccLCT/zvL+X7xmbLwUQU/UOSyTDSjfrQC+fw==

DAYSÍ ELUSÁI MILLÁN OCAMPO | Fecha:2024-10-28 16:12:44 | FIRMANTE

p58MbAlqrbGIElrPz81mxWnbljJqkeW3xVR8txvhF8SDJ5hjLYHw6NTn0grwCoxNEGcfWrKwR+N0ARXPuX8V5CPafj3K0V03rSWdVxZAUOoMx3hJ4Q7oA3Yrb/VyGdk0kDOsjDxZdB0mSprlnzkdurQ97eKSp8pzD0xENA+OXdmYOhh87TktkRGEWfnoM1SLfxjV1tTjxz85XD974/tXDPCTJPed/sF/ccvQReTO8UDCPibqLKJ1zYqSjLqjOktrN00IQ/anr/fUMMJJo+16AZgy4ldepfNpSas7ss9x40AFOcylOB12K8Slzwmnz2SKPI7GpvMnnqoNtVa87YEw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



78P42cloR

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/RNwg0pUo7Hz1f86jXvht7yoHw6fkgx8>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029