



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM VALLE DE MÉXICO

***EVALUACIÓN DE LA INHIBICIÓN DE CORROSIÓN
EN ACEROS INDUSTRIALES CON MOLÉCULAS
ORGÁNICAS DE NOPAL***

TESIS

Que para obtener el Título de

INGENIERO INDUSTRIAL

Presenta

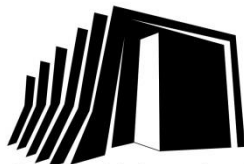
C. Luis Enrique Corona Almazán

Asesor: Dr. Héctor Herrera Hernández

(Centro Universitario UAEM Valle de México)

Co-asesor: Dr. Jorge Morales Hernández

(Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Querétaro)



Centro Universitario
UAEM Valle de México

Atizapán de Zaragoza, Estado de México Octubre 2017

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a mis padres:

Gregorio Corona Rosas e **Irma Almazán Hernández**, por quererme tanto e impulsarme a cumplir los propósitos de vida y profesional, además de enseñarme el camino con sabiduría para ver las cosas desde una manera diferente, eh aprendido que día con día puedo superarme y ser una mejor persona. Es por esto que agradezco enormemente su apoyo incondicional para alcanzar este gran logro que tanto esperaban, seguiré aprendiendo de ustedes. Solo me resta decirles que los amo.

También dedico este trabajo profesional a mis hermanas **Irma Paola Corona Almazán** y **Mariana Estefanía Corona Almazán**, por tanta motivación y cariño que se hacía notable a cada hora, permitiéndome seguir adelante y no darme por vencido. Con cariño.

AGRADECIMIENTOS

A la **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**, por darme la oportunidad de ser parte de ella, y darme los conocimientos y herramientas adecuadas dentro del aula de clases para concluir mi carrera profesional, y así iniciar un camino venturoso en la Ingeniería Industrial.

Al **Dr. Héctor Herrera Hernández (DR.3H)**, por confiar en mí y brindarme su apoyo lleno de conocimientos y valores.

Al **Dr. Jorge Morales Hernández**, por su apoyo, atención y confianza durante la residencia profesional y como asesor externo del CIDETEQ. Mil gracias.

A la Maestra en Ciencias, **Aracely Mandujano Ruíz (CIDETEQ)**, por impulsarme con todos sus conocimientos y actitudes, dedicándome de su tiempo, ya que gracias a ella logré alcanzar esta meta de mi vida.

Al **Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ)** por abrirme las puertas y permitirme culminar mi desarrollo profesional.

PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

Esta tesis es el resultado del Proyecto de investigación UAEM: EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE EXTRACTOS LÍQUIDOS NATURALES COMO POSIBLES INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN DE ACEROS INDUSTRIALES, registro 3018/2014/CID.

Como producto de esta investigación se participó en los siguientes congresos:

- **Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Tabasco 2016**, con la ponencia “Evaluación de la inhibición de corrosión en aceros industriales con sustancias naturales a base de nopal”. Autores: Héctor Herrera Hernández, Enrique Corona Almazán. Villa Hermosa Tabasco (Sede) 9 al 11 Marzo 2016.
- **Sociedad Mexicana de Electroquímica (SMEQ)**, Monterrey Nuevo León 2016 dentro del área de Corrosión y tratamiento de superficies con la ponencia “Moléculas orgánicas de nopal como inhibidor natural de corrosión”. Autores: Héctor Herrera Hernández, Enrique Corona Almazán, J. Morales Hernández, José G. Miranda Hernández. Monterrey, Nuevo León (Sede) 30 de Mayo al 3 de Junio 2016.

PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS

- **Memorias del Congreso de Investigación Academia Journals Vol. 8, No.1, pag. 1625-1629 (ISSN: 1946-5351) Tabasco 2016.** EVALUACIÓN DE LA INHIBICIÓN DE CORROSIÓN EN ACEROS INDUSTRIALES CON SUSTANCIAS NATURALES A BASE DE NOPAL. AUTORES: Héctor Herrera Hernández, **Enrique Corona Almazán**, J. Morales Hernández, José G. Miranda Hernández.
- **Memorias del Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica Vol. 1, pag. 1252-1264 (ISSN: 2448-6191) Monterrey, Nuevo León 2016.** MOLÉCULAS ORGÁNICAS DE NOPAL COMO INHIBIDOR NATURAL DE CORROSIÓN. Autores: **Enrique Corona Almazán**, A. Mandujano Ruiz, J. Morales Hernández, A. Espinoza Vázquez, Héctor Herrera Hernández.
- **REVISTA DE METALURGIA Vol. 53, Número 4, Octubre-Diciembre 2017, e108 (ISSN-L: 0034-8570).** EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ELECTROQUÍMICO DEL EXTRACTO DE NOPAL (OPUNTIA FICUS-INDICA) COMO POSIBLE INHIBIDOR DE CORROSIÓN. Autores: A. Mandujano Ruiz, J. Morales Hernández, Héctor Herrera Hernández, **Luis E. Corona Almazán**, José M. Juárez García.
- CAPITULO DE LIBRO Intech Open science. OPUNTIA FICUS-INDICA NOPAL EXTRACT AS GREEN INHIBITOR FOR CORROSION PROTECTION IN INDUSTRIAL STEELS. Autores: Araceli Mandujano Ruiz, Luis-Enrique Corona Almazán, Héctor Herrera Hernández Jorge Morales Hernández. EN PROCESO DE PUBLICACIÓN.

RESUMEN

En este trabajo de tesis se sustenta un estudio electroquímico y cinético de un inhibidor ecológico de corrosión con efectos favorables al entorno ambiental de la industria. La eficiencia de un extracto natural proveniente de la planta del NOPAL, EN, (*Nombre científico: Opuntia Ficus Indica*) se estudia como un posible inhibidor potencial de la corrosión de aceros en medio ácido empleando técnicas electroquímicas como la Polarización Lineal-RP y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica-EIS, principalmente. Se utilizaron como muestras de estudio aceros al carbono de uso común en la industria tales como el AISI 1018 (*grado maquinaria y estructural*), AISI 1045 (*grado estructural*) y en un acero micro-aleado del tipo AISI 4140 (*grado maquinaria*). Estos aceros fueron expuestos a un medio agresivo de H_2SO_4 0.6M y a una mezcla ácido-inhibidor al 50% respectivamente. Por otro lado, también se realizaron estudios de pérdida o ganancia de peso donde se expusieron cupones normalizados de acero al carbono, para determinar la velocidad de corrosión en presencia y ausencia del inhibidor natural (extracto de nopal-EN) durante un tiempo pre-determinado, este estudio se complementa con la toma de fotografías que fueron capturadas día con día durante el proceso de exposición. Mediante un análisis de datos se demostró que la adición del extracto de nopal (EN) redujo considerablemente la velocidad de corrosión en H_2SO_4 0.6M para los diferentes aceros estudiados, además de disminuir la corriente de corrosión. Por lo tanto, se obtuvieron porcentajes aceptables de la eficiencia de inhibición para los aceros al carbono, alcanzando valores cercanos al 98%. Por lo tanto, esta investigación indica que bajo las condiciones experimentales de prueba se puede llegar a considerar al nopal como un posible inhibidor alternativo de la corrosión para aceros al carbono en medio ácido. Finalmente, esta investigación sugiere su aplicación con usos variados dentro de la industria de la manufactura de materiales para la prevención y disminución del proceso de corrosión.

Palabras clave: Inhibidor, extracto de nopal, corrosión, bajo carbono, impedancia electroquímica.

ABSTRACT

This dissertation sustains an electrochemical study of corrosion green inhibitor as ecological effects to the industry's environment. A natural liquid extract obtained from Nopal plant, EN (*scientific name: Opuntia Ficus Indica*), has been studied as a possible corrosion inhibitor of carbon steels during acid exposure, by applying electrochemical techniques, such as Linear Polarization Resistance-RP and Electrochemical Impedance Spectroscopy-EIS. Industrial carbon-steels were used as working samples in this research, AISI-1018 (structural & machinery application), AISI-1045 (structural steel grade) and the steel type AISI 4140 (machinery uses). These metals-samples were exposed to an aggressive aqueous solution of H_2SO_4 0.6M or a mixture of inhibitor/acid solution. On the other hand, studies of weight loss or weight gain were also carried out on standard coupons of carbon steel after exposure in order to evaluate the corrosion rate in the presence or absence of natural inhibitor (Nopal liquid-extract) during a pre-determined time, so this study is confirmed by photographs that were taken day by day during the corrosion exposure. Through the analysis of EIS data it was demonstrated that some additions of the Nopal extract (EN) decreases significantly the corrosion rate (V_{corr}) in 0.6M H_2SO_4 for the different studied steels, also the corrosion current (i_{corr}) resulted lower. Therefore, an acceptable results of the corrosion inhibition efficiency (%IE) were obtained, reaching values of about 98%. Then, this dissertation indicates that under the experimental conditions of the corrosion test it can be considered the nopal plant as an alternative of corrosion inhibitor for steel in acid exposure. Finally, this research suggests that EN-inhibitor must be applied in the industry of materials manufacturing as many uses for the prevention and control of corrosion damage during storage.

Keywords: Inhibitor, Nopal extract, corrosion, low carbon steels, electrochemical impedance.

Contenido

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
III. OBJETIVO GENERAL.....	5
IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
V. HIPÓTESIS.....	6
Capítulo I. Marco Teórico.....	7
1.1 Antecedentes.....	8
1.2 Definición de corrosión.....	8
1.3 El impacto económico generado por la corrosión.....	10
1.4 Clasificación de los mecanismos de corrosión.....	12
1.4.1 Corrosión según su forma.....	13
1.4.2 Corrosión según su medio.....	14
1.5 Termodinámica de la corrosión.....	15
1.5.1 Potencial electroquímico y potencial del electrodo.....	16
1.5.2 Ecuación de Nernst.....	16
1.6 Cinética de la corrosión.....	17
1.6.1 Leyes de Faraday.....	17
1.6.2 Ley de Tafel.....	18
1.7 Técnicas Electroquímicas.....	19
1.7.1 Polarización Potenciodinámica.....	20
1.7.2 Curvas de Polarización Potenciodinámica.....	20
1.7.3 Resistencia a la Polarización Lineal (LPR).....	21
1.7.4 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).....	22
1.8 Métodos de control de la corrosión.....	25
1.9 Inhibidor de corrosión.....	25
1.9.1 Clasificación de los inhibidores de corrosión.....	26
1.9.2 Métodos de estudio de los inhibidores.....	27
1.9.3 Inhibidores y extractos líquidos.....	28
1.10 Generalidades de Opuntia Ficus-Indica como inhibidor de corrosión.....	29
Capítulo II. Desarrollo experimental.....	32
2.1 Equipos y materiales.....	33

2.2 Selección de materiales.....	34
2.3 Descripción y características de los aceros seleccionados.....	35
2.4 Obtención del extracto líquido de nopal EN.....	37
2.5 Preparación de las muestras metálicas.....	41
2.6 Preparación de las soluciones de trabajo.....	42
2.7 Evaluaciones Electroquímicas.....	42
Capítulo III. Análisis de resultados.....	45
3.1 Obtención del extracto.....	46
3.2 Evaluaciones Electroquímicas.....	47
3.2.1 Evaluación electroquímica del acero AISI 1018.....	47
3.2.2 Evaluación electroquímica del acero AISI 1045.....	53
3.2.3 Evaluación electroquímica del acero AISI 4140.....	58
3.3 Microscopia Óptica.....	65
3.4 Evaluación de cupones normalizados de acero al carbono expuestos a la intemperie.....	68
3.5 Discusiones.....	76
3.5.1 Obtención del extracto.....	76
3.5.2 Evaluación Electroquímica del extracto.....	76
3.5.3 Microscopia Óptica.....	78
3.5.4 Evaluación de cupones normalizados de acero al carbono expuestos a la intemperie.....	78
4 Conclusiones.....	79
5 Recomendaciones.....	81
6 Bibliografía.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metalurgia inversa (Trejo-Rosales, 2006).....	9
Figura 2. Costos anuales por corrosión y prevención en Estados Unidos de América en el año de 1998 (Monroy-Barreto, 2016).....	11
Figura 3. Clasificación de los mecanismos de corrosión.....	12
Figura 4. Ilustración de los diferentes tipos de corrosión según su forma, modificada por (Otero-Huerta, 1997).....	14
Figura 5. Rectas o pendientes de Tafel (Meas, Y 2012).....	19
Figura 6. Curva de polarización potenciodinámica (Monroy-Barreto, 2016).....	21
Figura 7. Diagrama de Nyquist, componentes real (Z') e imaginario (Z'') de la impedancia total (Z) para un circuito en paralelo resistencia (R) – capacitancia (C), que considera a la solución (R_{sol}), a diferentes frecuencias ($r= 1 \text{ ohm}$, $c=0.0001 \text{ f/cm}^2$, $f \text{ máxima}= 105 \text{ hz}$, $f \text{ mínima}= 10^{-2} \text{ hz}$ (Mendoza et al, 2003).....	23
Figura 8. Gráfico de Bode $ Z $ vs f , correspondiente a la impedancia de circuito serie-paralelo a diferentes frecuencias, que considera r_{tc} , c_{dl} , y r_{sol} (Mendoza et al, 2003).....	24
Figura 9. Gráfico de Bode, ángulo de fase (ϕ) vs f , correspondiente a la impedancia de circuito de serie-paralelo a diferentes frecuencias, que consideran r_{tc} , c_{dl} , y r_{sol} (Mendoza et al, 2003).....	24
Figura 10. Clasificación de los métodos de control de corrosión (Franco, 2014).....	25
Figura 11. Representación típica de la planta del nopal.....	30
Figura 12. Zona de recolección de las pencas.....	37
Figura 13. (a) Colección de pencas, (b) limpieza/desespinado.....	38
Figura 14. (a) Lavado y desinfectado de las pencas, (b) verificación del peso.....	38
Figura 15. (a) Corte de las pencas, (b) triturado de las pencas, (c) pulpa del nopal.....	39
Figura 16. Calentamiento de la pupa de nopal durante una hora.....	40
Figura 17. (a) Filtrado del extracto de nopal con tamiz del no. 80, (b) obtención del extracto de nopal.....	41
Figura 18. Pulidora de disco Buehler Ecomet 5, (b) probetas de acero sin desbaste, (c) probetas de acero con acabado final.....	41
Figura 19. Celda electroquímica montada con sus respectivos electrodos.....	43

Figura 20. Bipotenciostato/galvanostato biologic®.....	43
Figura 21. Secuencia para la experimentación electroquímica.....	44
Figura 22. Extracto de nopal.....	46
Figura 23. Comportamiento de potencial de corrosión (E_{corr}) vs tiempo de exposición. Acero al carbono AISI 1018 inmerso en la mezcla ácido-inhibidor a temperatura ambiente durante 24 horas.....	48
Figura 24. Curvas de polarización potenciodinámicas obtenidas con y sin presencia del agente inhibidor (EN) evaluando el acero AISI 1018.....	49
Figura 25. Curvas de polarización lineal con y sin presencia del agente inhibidor (EN) evaluando el acero AISI 1018.....	49
Figura 26. Gráficos de Nyquist para el acero AISI 1018 inmersas en las soluciones de trabajo durante 24 horas.....	50
Figura 27. Ajuste, circuito de Randles, con y sin presencia del agente inhibidor del acero AISI 1018.....	51
Figura 28. Diagrama de bode-fase con y sin presencia del agente inhibidor del acero AISI 1018.....	52
Figura 29. Comportamiento de potencial de corrosión (E_{corr}) vs tiempo de exposición. Acero al carbono AISI 1045 inmerso en la mezcla ácido-inhibidor a temperatura ambiente durante 24 horas.....	53
Figura 30. Curvas de polarización potenciodinámicas obtenidas con y sin presencia del agente inhibidor (EN) evaluando el acero AISI 1045.....	54
Figura 31. Curvas de polarización lineal con y sin presencia del agente inhibidor (EN) evaluando el acero AISI 1045.....	55
Figura 32. Gráfico de Nyquist para el acero AISI 1045 inmerso en las soluciones de trabajo durante 24 horas.....	56
Figura 33. Ajuste, circuito de Randles, con y sin presencia del agente inhibidor del acero AISI 1045.....	56
Figura 34. Diagrama de bode-fase con y sin presencia del agente inhibidor del acero AISI 1045.....	57
Figura 35. Comportamiento de potencial de corrosión (E_{corr}) vs tiempo de exposición. Acero al carbono AISI 4140 inmerso en la mezcla ácido-inhibidor a temperatura ambiente durante 24 horas.....	59
Figura 36. Curvas de polarización potenciodinámicas obtenidas con y sin presencia del agente inhibidor (EN) evaluando el acero AISI 4140.....	60

Figura 37. Curvas de polarización lineal con y sin presencia del agente inhibidor (<i>EN</i>) evaluando el acero AISI 4140.....	60
Figura 38. Gráfico de Nyquist para el acero AISI 4140 inmerso en las soluciones de trabajo durante 24 horas.....	61
Figura 39. Ajuste, circuito de Randles, con y sin presencia del agente inhibidor del acero AISI 4140.....	62
Figura 40. Diagrama de bode-fase con y sin presencia del agente inhibidor del acero AISI 4140.....	62
Figura 41. Gráfico de porcentaje de la eficiencia de inhibición (<i>EI</i>) para el extracto líquido de nopal (<i>EN</i>).....	65
Figura 42. Fotografías, acero AISI 1018. (a) 1018 en H ₂ SO ₄ , (b) 1018 en 50% H ₂ SO ₄ +50% <i>EN</i>	65
Figura 43. Micrografías (50x), acero AISI 1018. (c) 1018 en H ₂ SO ₄ . (d) 1018 50% H ₂ SO ₄ + 50% <i>EN</i>	66
Figura 44. Fotografías, acero AISI 4140. (a) 4140 en H ₂ SO ₄ . (b) 4140 en 50% H ₂ SO ₄ +50% <i>EN</i>	66
Figura 45. Micrografías (50x), acero AISI 4140. (c) 4140 en H ₂ SO ₄ . (d) 4140 50% H ₂ SO ₄ +50% <i>EN</i>	67
Figura 46. Fotografías, acero AISI 1045. (a) 1045 en H ₂ SO ₄ . (b) 1045 en 50% H ₂ SO ₄ +50% <i>EN</i>	67
Figura 47. Micrografías (50x), acero AISI 1045. (c) 1045 en H ₂ SO ₄ . (d) 1045 50% H ₂ SO ₄ +50% <i>EN</i>	68
Figura 48. Preparación de cupones normalizados de acero al carbono.....	68
Figura 49. Pulido de cupones normalizados de acero al carbono.....	69
Figura 50. Inmersión de los cupones normalizados en (<i>EN</i>).....	70
Figura 51. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) placa con <i>EN</i> . Primer día de exposición 21/04/16.....	71
Figura 52. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) placa con <i>EN</i> . Segundo día de exposición 22/04/16.....	71
Figura 53. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) placa con <i>EN</i> . Quinto día de exposición 25/04/16.....	72
Figura 54. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) placa con <i>EN</i> . Sexto día de exposición 26/04/16.....	72

Figura 55. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) placa con <i>EN</i> . Séptimo día de exposición 27/04/16.....	73
Figura 56. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) placa con <i>EN</i> . Octavo día de exposición 28/04/16.....	73
Figura 57. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) placa con <i>EN</i> . Noveno día de exposición 29/04/16.....	74
Figura 58. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) placa con <i>EN</i> . Décimo día de exposición 02/05/16.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Costos de corrosión por año (Avila y Genescá, 1996).....	11
Tabla 2. Composición química del acero AISI 1018.....	35
Tabla 3. Composición química del acero AISI 4140.....	36
Tabla 4. Composición química del acero AISI 1045.....	36
Tabla 5. Parámetros termodinámicos y eficiencia de inhibición del nopal en acero AISI 1018 a diferentes tiempos de exposición.....	52
Tabla 6. Parámetros termodinámicos y eficiencia de inhibición del nopal en acero AISI 1045 a diferentes tiempos de exposición.....	58
Tabla 7. Parámetros termodinámicos y eficiencia de inhibición del nopal en acero AISI 4140 a diferentes tiempos de exposición.....	63
Tabla 8. Resultados de las técnicas electroquímicas de los aceros evaluados.....	64
Tabla 9. Peso de los cupones normalizados posterior a la inmersión y secado.....	69
Tabla 10. Peso de los cupones normalizados posterior a la exposición del ambiente.....	75
Tabla 11. Comparación del peso de los cupones normalizados, previo y posterior a la exposición del ambiente.....	75

TÉRMINOS Y SÍMBOLOS

- AISI Instituto americano del hierro y el acero
- AISI-1018 Acero grado maquinaria y estructural
- AISI-1045 Acero grado estructural
- AISI-4140 Acero grado maquinaria
- ASTM American society for testing and materials
- Ba Pendiente de tafel anódica
- Bc Pendiente de tafel catódica
- CA Corriente alterna
- C_{dl} Capacitancia de la doble capa electroquímica
- CE Contra electrodo
- DC Corriente directa
- ΔG Energía libre de Gibbs
- E Potencial en volts
- E_{corr} Potencial de corrosión
- E_{pit} Potencial de picaduras
- EIS Espectroscopia de impedancia electroquímica
- EN Extracto de nopal
- H_2SO_4 Ácido sulfúrico
- HCl Ácido clorhídrico
- I Corriente en amperes
- I_{corr} Corriente de corrosión
- PIB Producto interno bruto
- PNB Producto nacional bruto
- R Resistencia eléctrica
- RE Electrodo de referencia
- RP Resistencia a la polarización lineal
- R_s Resistencia a la solución
- R_{tc} Resistencia a la transferencia de carga
- SAE Sociedad americana de ingenieros automotores
- V_{corr} Velocidad de corrosión

- WE Electrodo de trabajo
- Z Impedancia
- Z_{real} Parte real de la función de transferencia
- Z_{imag} Parte imaginaria de la función de transferencia

INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

El acero es una aleación sólida intersticial de carbono (C) en hierro (Fe- α), que tiene gran aplicación industrial por su excelente resistencia mecánica en estructuras para la construcción y últimamente en herramientas y maquinaria de alto rendimiento. Sin embargo, por la gran variedad de elementos de aleación que se le agrega para desempeñar cualquier actividad dentro de la industria, lo hace muy susceptible a un fenómeno de intercambio de electrones con el entorno en el que se encuentra realizando su servicio de trabajo. Este fenómeno al cual se refiere es conocido como corrosión electroquímica. Algunos de los problemas ocasionados por la corrosión y que están presentes en diversos sectores industriales, tales como la industria petrolera, minera, eléctrica, metal-mecánica, construcción, entre otros; ya que la materia prima más empleada son los aceros y por lo tanto se utilizan en todas las ramas productivas de la sociedad. Sin embargo, con el paso del tiempo los componentes para maquinaria, herramientas, materiales y productos finales son propensos a deteriorarse debido al entorno de exposición y por desgaste; generando así fallas de energía, el colapso de puentes y edificios, fisuras en tuberías de transporte de líquidos o gases peligrosos, paros repentinos de producción, entre otros, además de la pérdida humana y costos económicos. La corrosión puede causar severos daños al medio ambiente, daños mecánicos, desgaste de herramientas y maquinaria y un alto costo por mantenimiento industrial; debido a que los métodos para su prevención resultan poco eficaces para conseguir un control de la degradación de los materiales por corrosión (H- Hernández, 2015).

A su vez, este tipo de problemáticas se ven reflejadas en pérdidas directas e indirectas, debido a que los aceros son los que experimentan un ataque mucho más intenso al ser sometidos a jornadas más extensas de trabajo y al tipo de ambiente al cual se encuentran expuestos. Es por esto que se han intensificado los esfuerzos de investigación con la necesidad de emplear materiales metálicos mucho más resistentes que a su vez puedan prolongar el tiempo de vida útil y resistan este tipo de adversidades.

Por lo tanto a la corrosión se le puede definir como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico con su entorno en el que se encuentra expuesto. Es un fenómeno natural en el cual el material sufre un ataque químico o electroquímico, en degradación de sus propiedades físicas y químicas, hasta mecánicas (Berrocal y Altamiranda Percy, 2013). En otras palabras, es un fenómeno electroquímico natural por medio del cual los sistemas químicos tienden a su estado de equilibrio estable (oxidación) (Reyes-Castillo, 2011).

Existen diferentes alternativas para combatir el deterioro por corrosión como, es el uso de resinas epóxicas, uso de polímeros avanzados y el uso de nuevas aleaciones más resistentes por mencionar algunos; además del uso de sustancias químicas (orgánicas o inorgánicas) como los inhibidores de corrosión que se usan con mayor frecuencia en la industria. Un inhibidor de corrosión se puede definir como una sustancia que al ser agregada en pequeñas concentraciones en el medio corrosivo disminuyen o previenen la reacción óxido-reducción entre el metal y el medio de interacción (L. Tejeda-Benítez et al., 2014). En concentraciones adecuadas reducen la velocidad de corrosión adsorbiéndose a la superficie metálica, protegiéndola por la formación de una película orgánica, solo que tienen la desventaja de ser muy costosos y producen efectos tóxicos debido a los compuestos que poseen, es por eso que se han generado estrictas normas de regulación para el uso de estos inhibidores del tipo orgánico.

Los peligros de la mayoría de los inhibidores orgánicos sintéticos que se conocen comúnmente y las nuevas legislaciones ambientales, como la Ley de Control de Sustancias Tóxicas de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos y la Directiva de Restricción de Sustancias Peligrosas de la Unión Europea, generan la necesidad de desarrollar inhibidores de corrosión ambientalmente amigables, que no contengan metales pesados como el cromo y plomo o compuestos orgánicos. Debido a esta razón se ha sugerido el uso de extractos naturales derivados de plantas como inhibidores de corrosión. La ventaja de los inhibidores naturales es que no son tóxicos, pero son biodegradables y son abundantes en la naturaleza. Hasta el momento, ya se han utilizado algunos extractos a partir de semillas, frutas, hojas, flores (L. Tejeda-Benítez et al., 2014), (H. Herrera et al., 2015).

En los extractos de plantas, están presentes un gran número de compuestos químicos, especialmente heterocíclicos, que inhiben la corrosión de manera eficiente. El efecto inhibitor se atribuye a la adsorción molecular de estas sustancias orgánicas sobre la superficie del metal, que bloquea los sitios activos mediante la adsorción de moléculas que forman una capa superficial protectora (L. Tejeda et al., 2014).

De acuerdo con investigaciones recientes (Flores de los Ríos, 2016), se encontró que el nopal (*Opuntia ficus-indica*), puede ser utilizado como un posible inhibidor de corrosión debido a sus propiedades. En la investigación se reporta que al evaluar el acero 1018 en un medio ácido (HCl) mezclado con un extracto de nopal presentó un mecanismo de inhibición del tipo mixto. Por ser un recurso renovable el extracto de esta planta presenta ventajas como: bajo costo, fácil acceso debido a la región, fácil extracción entre otras.

Por lo que, en el presente trabajo de investigación se preparó un concentrado líquido-extracto de nopal que fue empleado como inhibidor de la corrosión, por ser una planta muy abundante en el territorio mexicano, muy fibrosa y que tiene la capacidad de retener el agua por lo que ha sido de interés como posible candidato a ser un inhibidor de corrosión en acero al carbono en medio ácido. Para esto se realizaron pruebas experimentales empleando técnicas electroquímicas como Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) y Resistencia a la Polarización (RP), en aceros al carbono de tipo industrial con especificación AISI-SAE (1045, 1018 y 4140) inmersas en medio ácido (H_2SO_4) y con una mezcla ácido-inhibidor. Estas técnicas permitieron determinar la eficiencia de inhibición (*EI*) del extracto derivado de esta planta para ser utilizada para la producción de un inhibidor de la corrosión, dando paso al desarrollo de nuevas tecnologías amigables para el debido mantenimiento de materiales metálicos que intervienen en procesos industriales.

II. PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN

Actualmente la globalización ha inducido a un crecimiento tecnológico de las industrias, en donde los componentes para maquinaria, herramientas de acero y materiales metálicos son los más empleados alrededor de todo el mundo para la construcción de todo tipo de infraestructura para un mejor desarrollo industrial, esto es debido a las propiedades mecánicas que ofrecen este tipo de materiales. Sin embargo, el problema causado por la corrosión sigue presente y no deja de ser una situación delicada incluso cuando los componentes en proceso de fabricación y los componentes ya terminados tienen que almacenarse y/o transportarse con el cliente final; presentando corrosión por su exposición prolongada al medio ambiente que los rodea.

Por lo que, la maniobra de este tipo de materiales al momento de almacenarlos y/o transportarlos, dado su exposición al medio ambiente, deben ser protegidos mediante la aplicación de diversos métodos para la prevención de la corrosión. Algunos de los métodos más comunes consisten en la aplicación de recubrimientos u otra opción más costosa consta del uso de aleaciones especiales o los inhibidores de corrosión. Actualmente el uso de moléculas orgánicas como inhibidores de corrosión ha proporcionado una solución a los daños ocasionados por este fenómeno, existen inhibidores derivados del imidazol, mercaptobenzimidazol, mercaptoimidazol (R. Álvarez-Bustamante et al., 2009) triazol y thidiazol (M. Palomar-Pardavé, et al., 2014) por mencionar algunos, los cuales son demasiado costosos aparte de ser perjudiciales para la salud y para el medio ambiente.

A través de la obtención de un extracto líquido derivado de la planta del **Nopal “Opuntia Ficus-Indica”**, y por ser una sustancia natural BIODEGRADABLE, en esta investigación se considera este extracto-líquido para su estudio como inhibidor del deterioro por corrosión, pues al mismo tiempo disminuye el impacto ambiental y es un producto benéfico económico-social e industrial.

Dentro de este estudio se propuso el uso de un extracto líquido, derivado del **NOPAL (EN) “Opuntia Ficus-Indica”** como posible candidato a inhibidor de la corrosión en aceros industriales del tipo AISI 1045 (grado estructural), 4140 (grado maquinaria) y 1018 (grado maquinaria y estructural) cuando se exponen a un medio ácido.

Para esto se emplearon técnicas electroquímicas (Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, EIS y polarización potenciodinámica (curvas de Tafel) para determinar el nivel de efectividad de inhibición del extracto natural *EN*, en un medio ácido de (H_2SO_4 0.6M). Pruebas de pérdida de peso por inmersión también se llevaron a cabo para determinar la velocidad de corrosión.

III. OBJETIVO GENERAL

En este trabajo de investigación el objetivo general que se logró fue, producir y caracterizar electroquímicamente un extracto-líquido a base de nopal como posible inhibidor de corrosión ambiental en aceros al carbono grado AISI 1018, 1045 y 4140 expuestos a un medio ácido (H_2SO_4 0.6M), empleando la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) y Polarización Potenciodinámica (curvas de Tafel).

IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener un concentrado de nopal (EN) mediante métodos fisicoquímicos establecidos.
- Evaluar la capacidad de inhibición a la corrosión del concentrado de Nopal de los diferentes aceros al carbono, al exponerlos a una mezcla ácido/inhibidor preparada con el 50% en volumen del inhibidor concentrado, más el 50% en volumen de una solución al 0.6M de ácido sulfúrico mediante las técnicas electroquímicas de Curvas de Polarización y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).
- Construir gráficos característicos de las curvas de polarización y espectroscopia de impedancia electroquímica.
- Caracterizar física y química del mecanismo de corrosión presente en los diferentes aceros, al ser expuestos a la mezcla ácido/inhibidor.

- Evaluar la velocidad de corrosión ambiental de cupones normalizados de acero al carbono inmersos en el extracto-líquido a base del concentrado de Nopal.
- Determinar el mecanismo de corrosión presente en los cupones normalizados impregnados con el inhibidor a base del concentrado de nopal.

V. HIPÓTESIS

El extracto-líquido del nopal (*Opuntia Ficus-Indica*) puede ser usado como un inhibidor biodegradable de la corrosión, de corto alcance, de fácil remoción y de protección al ambiente en componentes industriales fabricados con aceros AISI 1018, 1045 y 4140, al formar una película transparente que incrementa la resistividad de la superficie, reduciendo la velocidad de corrosión en el acero para su protección durante su almacenamiento o traslado (vía terrestre o marítima).

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

Desde hace mucho tiempo el hombre se ha encontrado con la necesidad de depender de los materiales metálicos para lograr un mejor estilo de vida para su progreso. Lamentablemente los daños ocasionados por el fenómeno de la corrosión son muy variados y perjudiciales ya que los materiales empleados en las industrias están expuestos constantemente, ya sea por una reacción química o electroquímica de acuerdo al medio al que sean inmersos. En base al ingenio del hombre es necesario emplear tratamientos anticorrosivos adecuados que disminuyan la degradación de los materiales metálicos, como los inhibidores de corrosión.

Los inhibidores de corrosión son sustancias químicas orgánicas e inorgánicas que, al adicionarse al medio corrosivo en pequeñas cantidades (del orden de 20 ppm), actúan sobre la superficie metálica ocasionando que el fenómeno de la corrosión disminuya notablemente (Trejo-Rosales, 2006). Sin embargo, el uso de sustancias para inhibir la corrosión con alto impacto ambiental es un claro ejemplo, del efecto de la corrosión sobre el medio ambiente. A pesar de diversos estudios e investigaciones realizadas, todavía se siguen buscando mejores alternativas mediante el uso de sustancias completamente biodegradables y de bajo impacto ambiental (Castillo-Rendón, 2011).

En los últimos años han surgido nuevas propuestas de protección a los materiales metálicos, investigando la manera de reducir el efecto de corrosión por medio de soluciones naturales en diferentes tipos de materiales como el acero inoxidable, acero al carbono, entre otros. Más adelante se cita un apartado referente a los extractos naturales que han sido evaluados como inhibidores de corrosión.

1.2 Definición de corrosión

La destrucción de los materiales metálicos por efecto de la corrosión es un problema tecnológico de gran importancia ya que tiene asociado pérdidas económicas y humanas que afectan la economía de cualquier país. Debido a esto son muchos los esfuerzos de investigación para el entendimiento y control de este fenómeno (Trejo-Rosales, 2006).

Se le llama corrosión electroquímica tanto a la causa como al efecto de interacción química de un metal con el medio que lo rodea. A excepción del oro, platino, plata, cobre, mercurio, y algunos otros, que pueden encontrarse en estado libre, los metales son especies inestables que se encuentran en la naturaleza formando distintos minerales, es decir, sólidos estructuralmente homogéneos y de composición química definida (óxidos, sulfuros, carbonatos, otras sales complejas, tanto solubles como insolubles), los cuales se originan por procesos naturales (generalmente inorgánicos), la mayoría de los metales utilizados por el hombre se obtienen a partir de sus minerales, mediante procedimientos metalúrgicos que requieren gastos energéticos considerables. Con base a lo anterior, la corrosión también puede definirse como el proceso inverso a la metalurgia extractiva mediante el cual el metal libre pasa a su forma más estable, similar a las que se encuentran en la naturaleza, tal como se ilustra en la Figura 1 (J. Morales-Marina, et al., 2011).

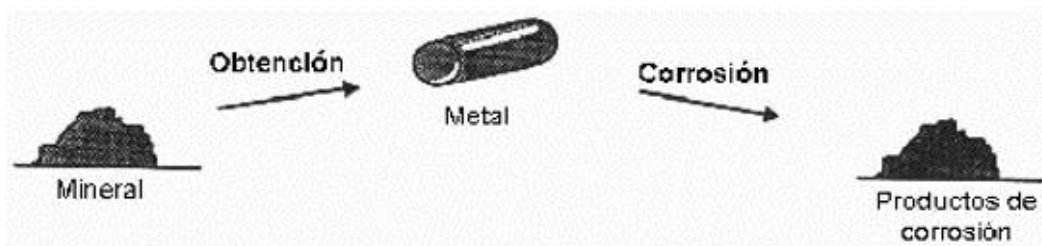


Figura 1. Metalurgia inversa (Trejo-Rosales, 2006).

Los materiales metálicos suelen estar sometidos a condiciones severas o grandes esfuerzos mecánicos constantes, además de estar expuestos al ataque por corrosión, y lamentablemente van perdiendo poco a poco su funcionalidad e integridad; por lo que las industrias deben aplicar métodos para evitar este tipo de desgaste por corrosión, dándole mayor tiempo de vida y de servicio, a las aleaciones empleadas, sin perder sus propiedades físicas y mecánicas.

Para combatir la problemática causada por este fenómeno, se emplean diversos métodos de protección tales como, la modificación superficial de los metales, que consiste en crear o provocar la formación de una barrera protectora, como es el caso del anodizado, en este proceso el metal a proteger se oxida electrolíticamente, es decir, se les somete a condiciones tales, que produce una película superficial de óxido del mismo metal que posteriormente lo protegerá del medio agresivo. Otra forma de protección, consiste en aislar físicamente el metal del medio en que se encuentra expuesto, a través de recubrimientos como lo son las pinturas anticorrosivas y el metalizado, entre otros (Berrocal y Altamiranda Percy, 2013).

Cabe mencionar que los procesos de corrosión en su gran mayoría son electroquímicos, por lo tanto, se puede alterar la velocidad de corrosión del metal, al modificar las diferencias de potencial eléctrico existentes E_{corr} . Las técnicas que tratan acerca de este sistema de protección metálica, se les conoce como protección anódica y catódica (Gómez & Alcaraz, 2004). Por otro lado, se pueden utilizar diferentes tipos de aleaciones con el fin de obtener un material metálico con mayor resistencia al desgaste por corrosión. Por lo que concierne con esta tesis, existe otro método alternativo de protección conocido como inhibidores de corrosión.

1.3 El impacto económico generado por la corrosión

A pesar del gran avance a la civilización moderna por el uso de materiales metálicos, uno de los problemas más serios lo construye la corrosión, produciendo daños por miles de millones de dólares al año, convirtiéndolo en un problema complejo, a cerca del cual se conoce mucho, sin embargo, a pesar de la extensa investigación y experimentación, todavía hay mucho que aprender (Flores de los Ríos, 2016).

A pesar de las dificultades para evaluar esta problemática se han proporcionado datos espectaculares, pero preocupantes, ya que se considera que entre un 25 y un 30% de la producción mundial de hierro es destruido anualmente por la corrosión, dichas estimaciones avanzan aún más y proporcionan el dato de que los costos producidos por la corrosión oscilan cerca del 4% del P.I.B. de los países industrializados, por lo que muchos de estos gastos pudieron haber sido evitados con un mayor uso de los conocimientos y técnicas que hoy en día se encuentran a nuestro alcance. Los sectores de transporte, marina, y construcción son los de mayores costos, debido al fuerte impacto de la intemperie y el agua de mar sobre la corrosión en los metales y definitivamente se requiere brindar protección ante el ataque por corrosión y de esta manera generar un ahorro de grandes cantidades de dinero por la prolongación de la vida útil del equipo, elementos o dispositivos y una mejor seguridad operacional y de servicio. Dando como resultado, la planificación de un sistema de protección concreto, en base a excelentes conocimientos de los fenómenos de corrosión (Castillo y Tiznado Urbina, 2015).

Conforme a lo mencionado, tenemos que los costos del deterioro por corrosión en la economía de los países se dividen en cinco categorías. En la Figura 2 se ilustran los sectores con mayores pérdidas económicas.

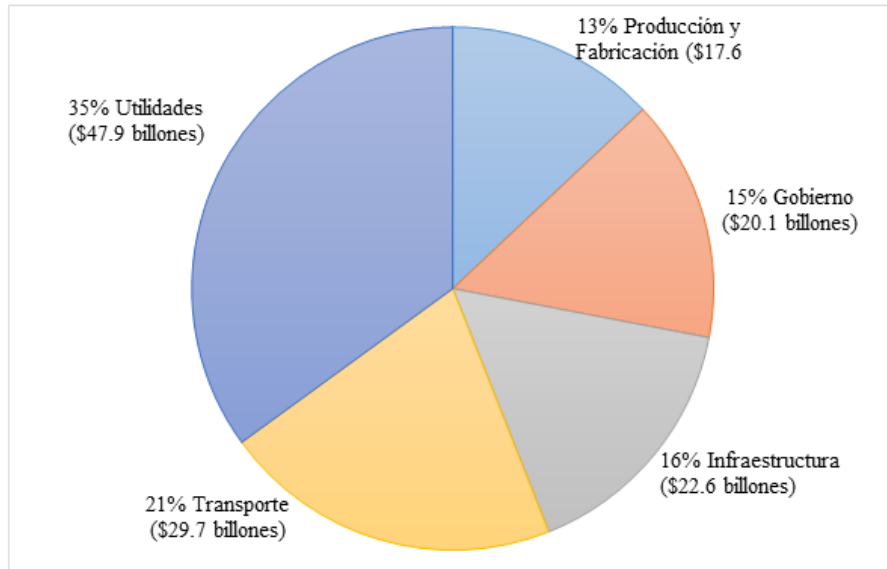


Figura 2. Costos anuales por corrosión y prevención en Estados Unidos de América en el año de 1998 (Monroy-Barreto, 2016).

Sin embargo, no existen muchos datos de cómo se reparten los costos generados por la corrosión. Los estudios que se disponen hasta la fecha han sido realizados entre 1949 y 1979 y provienen básicamente de 9 países. Los resultados globales están reproducidos, con la indicación del costo total de la corrosión expresado en dólares americanos del valor del año de estudio. Así mismo y en aquellos casos donde ha sido posible, se expresa el porcentaje del Producto Nacional Bruto para el año en el que se realizó el estudio representados en la Tabla 1, (Avila y Genescá, 1996).

Tabla 1. Costos de corrosión por año (Avila y Genescá, 1996).

Año	País	En millones de dólares EUA	En % del PNB
1949	EUA	5,500	-
1960-1961	India	320	-
1964	Suecia	58 a 77	-
1965	Finlandia	47 a 62	0.58 a 0.77
1968-69	RFA	6,000	3.0
1969	URSS	6,700	2.0

1969	Gran Bretaña	3,200	3.5
1973	Australia	550	1.5 a 3.0
1974	URSS	18,850	4.1
1975	EUA	70,000	4.2
1976-77	Japón	9,200	1.8
2000	Japón	101,724	3,76
2002	EUA	276,000	3,1

Los datos anteriormente reportados reflejan lo delicado y la atención que se le debe dar al fenómeno de la corrosión. Es por esto que el hombre ya se encuentra mucho más interesado y comprometido por encontrar una mejor solución ante este fenómeno.

1.4 Clasificación de los mecanismos de corrosión

Es posible clasificar los mecanismos de corrosión recurriendo a criterios muy variados. Ya sea por la morfología del ataque, por el medio que lo produce y por las condiciones físicas que lo generan. De forma general y desde el punto de vista científico se clasifican de la siguiente manera de acuerdo a (Otero-Huerta, 2000), ilustrado en la Figura 3.

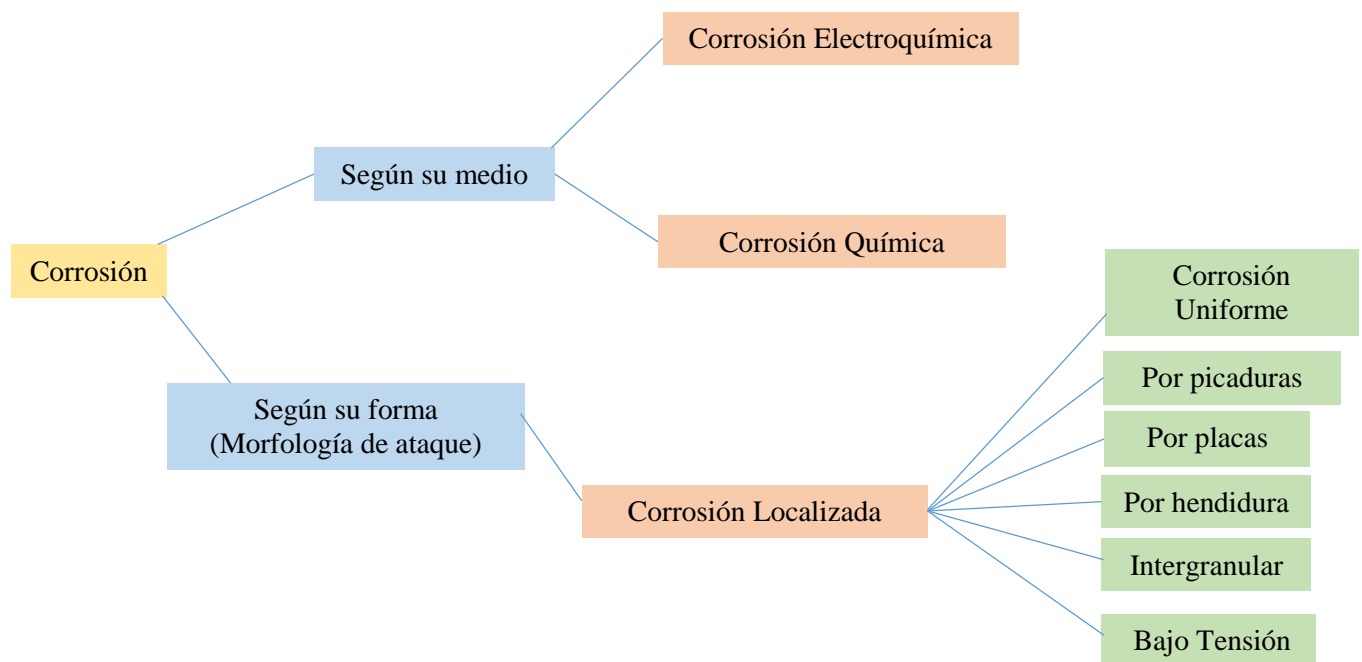


Figura 3. Clasificación de los mecanismos de corrosión.

1.4.1 Corrosión según su forma

- a) Corrosión uniforme. Es la más común debido a que el ataque se extiende de forma homogénea sobre toda la superficie metálica, existiendo una relación directa entre la pérdida de material, reducción de espesor y magnitud o gravedad del fenómeno y por consiguiente, es relativamente fácil estimar la vida útil en servicio de los materiales metálicos que lo sufren, una vez conocida la evolución del fenómeno en las primeras etapas (Otero-Huerta, 2000).
- b) Corrosión galvánica o selectiva. El ataque selectivo no se distribuye de forma homogénea, ya que se localiza en zonas determinadas de la superficie metálica. Uno de los casos en los que se da este tipo de corrosión es en aleaciones que presentan distintas fases con diferentes contenidos en los diferentes metales de que están constituidas (Otero-Huerta, 2000).
- c) Corrosión por picaduras. El ataque se localiza en zonas aisladas de la superficie que no suelen superar más de 1 o 2 mm² por cada picadura y se propaga hacia el interior del metal formando pequeños túneles que avanzan habitualmente con bastante rapidez, ya que en las zonas afectadas la velocidad de corrosión suele ser alta. La pérdida del material es pequeña debido a lo reducido de la superficie afectada, pero los inconvenientes que puede causar a menudo son importantes (Otero-Huerta, 2000).
- d) Corrosión por hendidura. Se presenta en uniones, intersticios, zonas de solape, zonas roscadas y en general en aquellas regiones mal aireadas o en las cuales la renovación del medio corrosivo está condicionada por mecanismos de difusión y es, en general, difícil (Otero-Huerta, 2000).
- e) Corrosión intergranular. Se habla de corrosión intergranular cuando el ataque se localiza en los límites de grano del material metálico. Como consecuencia de ello se pierde la coherencia entre granos y el material reduce significativamente los valores de sus características mecánicas habituales (Otero-Huerta, 2000).
- f) Corrosión bajo esfuerzo (tensión). Se conoce también como corrosión fisurante y se da cuando la aleación (es muy poco habitual en metales puros), está sometida a tensión mecánica de tracción bien sea aplicada o residual, y se encuentra en contacto con un medio agresivo que suele ser específico para cada material (Otero-Huerta, 2000). Se caracteriza por la aparición de grietas o fisuras que avanzan en la dirección normal a la de aplicación de la tensión a velocidades de propagación que pueden alcanzar los 2 o 3 mm/año. El desplazamiento de la grieta puede ser a través del grano (transgranular) o a lo largo del límite de grano (intergranular), circunstancia que depende fundamentalmente de las características metalúrgicas de la aleación (Otero-Huerta, 2000).

A continuación se ilustran los distintos tipos de corrosión de acuerdo con la morfología de ataque, Figura 4.

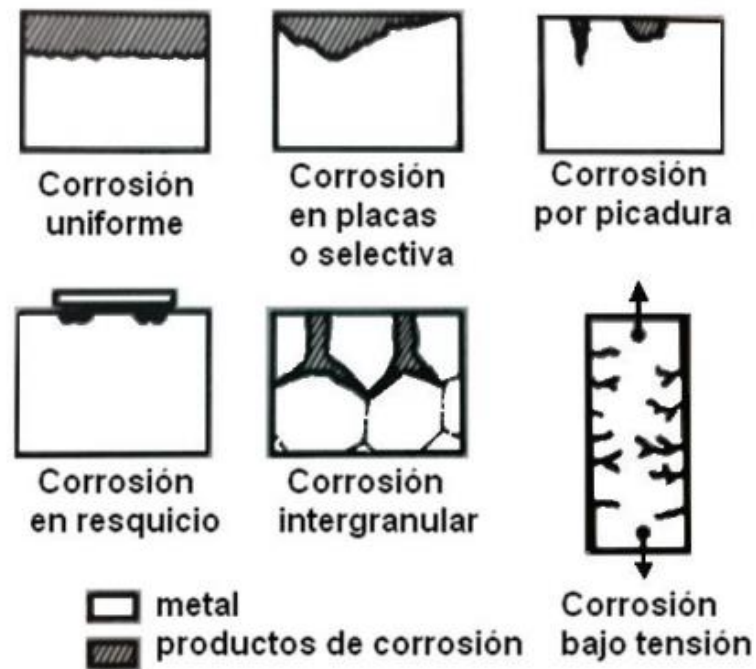


Figura 4. Ilustración de los diferentes tipos de corrosión según su forma, modificada por Otero-Huerta, 2000.

1.4.2 Corrosión según su medio

La clasificación según el medio o mecanismo es de las más importantes ya que cualquier proceso de corrosión transcurre a través de uno de los dos mecanismos que se mencionan a continuación:

a) Corrosión electroquímica. A temperatura ambiente la forma de corrosión más frecuente y más seria es de índole electroquímico. Se debe a la actuación de pilas electroquímicas (corrosión galvánica), en las que el metal sufre disolución en las regiones anódicas.

Por lo que la corrosión electroquímica se da cuando los materiales metálicos se hallan en contacto con medios de conductividad electrolítica, en particular con el agua, soluciones salinas, o la simple humedad de la atmósfera ambiental y de los suelos. De acuerdo con esto, la presencia de moléculas del agua sobre la superficie es la condición necesaria para que ocurra corrosión electroquímica (Otero-Huerta, 2000).

b) Corrosión química. Bajo esta denominación se estudian aquellos casos en que el metal reacciona con un medio no iónico. Por lo tanto, se da en ausencia de un electrolito.

1.5 Termodinámica de la corrosión

Para poder estudiar y entender el proceso de corrosión se debe de tomar en cuenta la Termodinámica de la corrosión, la cual indica si una reacción se puede llevar a cabo o no, por medio de un proceso espontáneo. La termodinámica permite realizar balances de energía, que, en el caso de los metales puros colocados en una situación determinada, es posible predecir su comportamiento, es decir, la termodinámica indica si aparece o no en ellos la tendencia de corrosión (Cruz-Islas, 2002).

La corrosión en soluciones acuosas involucra al electrón y la transferencia de cargas. Un cambio en el potencial electroquímico, en la actividad del electrón o en la disponibilidad de una superficie de metal tiene un efecto profundo en las proporciones de reacciones de corrosión. Así, se dice que las reacciones de corrosión son electroquímicas. La termodinámica se encarga de explicar los cambios de energía involucrados en las reacciones electroquímicas de corrosión, los cuales proporcionan la fuerza y controlan la dirección espontánea para una reacción química. Por lo tanto, mediante el uso de la termodinámica es posible ajustar las condiciones para ejercer control sobre el proceso de corrosión. Cuando la corrosión ocurre, la termodinámica no puede predecir la velocidad; la corrosión puede ocurrir en una fase lenta o rápida ya que la magnitud real de la corrosión son gobernadas por leyes cinéticas (Lugo-Islas, 2010).

Dicho esto, podemos decir que la termodinámica se divide en dos partes: la parte electroquímica y la parte química. Donde en la parte química se toman en cuenta variables como la temperatura absoluta, presión aplicada por otro medio externo y el número de moles en relación con la energía libre de Gibbs (ΔG°).

Lo cual se puede asociar con el potencial de corrosión, E_{corr} medido entre el metal y el electrolito (transferencia de electrones), el cual se puede presentar en tres casos:

- El cambio de la energía libre (ΔG°) es negativa, indica que el metal es activo y puede existir corrosión. Es el caso más frecuente entre los metales de uso común, los aceros al carbono sin protección.
- Puede ocurrir aun cuando (ΔG°) sea mayor que cero, el metal en lugar de presentar corrosión permanece aparentemente sin ser atacado, se dice que el metal está en estado pasivo.
- Si el cambio de la energía libre (ΔG°) es cero o muy positiva, el metal es indiferente a los agentes agresivos habituales, no siendo posible ninguna reacción de corrosión.

La termodinámica es capaz de indicar una posibilidad de reacción, pero jamás podrá decir acerca de la velocidad de reacción con que se llevará a cabo, si es que la reacción es posible. Esto se debe por

otros factores ajenos a la termodinámica, factores propios de lo que conocemos como cinética de la corrosión (García-Inzunza, 2014).

1.5.1 Potencial electroquímico y potencial de electrodo

Se denomina potencial electroquímico del metal a la derivada parcial de la energía libre total electroquímica (ΔG°) de una especie, con respecto al número de moles con los que participa, cuando otros factores como Temperatura (T) y Presión (P) son constantes. Este potencial es análogo del potencial químico de una especie, pero en este caso están incluidas las contribuciones químicas y electroquímicas de Gibbs (Monroy-Barreto, 2016).

$$\mu_x = \left(\frac{\partial G}{\partial n_x} \right)_{T, P} \quad (1)$$

Dónde:

- G= Energía libre de Gibbs
- n_x = Moles de x
- T =Temperatura
- P = Presión

Por otra parte, se denomina potencial de electrodo cuando un metal es sumergido a un medio electrolito, una serie de fenómenos electrostáticos provocan que los iones presentes en el electrolito sean rodeados por moléculas de agua u otros iones, esta acción se define como solvatación. Los iones solvatados se ordenan sobre la superficie del metal, luego entonces el electrodo se estimulará debido al campo eléctrico producido por el medio electrolito más cercano a la frontera con una carga de signo opuesto en la superficie del mismo (Franco-Tronco, 2014).

1.5.2 Ecuación de Nernst

Al cambiar la concentración de las especies, se presenta un ordenamiento de cargas por lo que la energía del sistema sufre una variación al igual que el potencial, esta variación del potencial fue ampliamente estudiado por Nernst, quien pudo determinar una relación entre la carga de la interfase y el valor en voltios de esta (Franco-Tronco, 2014).

$$EM = E^{\circ}M + \frac{RT}{nF} \ln \frac{\alpha(Mz^+)}{\alpha(M^{\circ})} \quad (2)$$

Donde:

- $a^{M^{\circ}}$ = Actividad del metal, tiene el valor a 1.
- a^{Mz^+} = Actividad del ion metálico.
- E°_M = Potencial eléctrico en la interface en condiciones estándar (Voltios).
- E_M = Potencial eléctrico en la interface (Voltios).
- F = Constante de Faraday (Aprox. 96.500 Culombios).
- R = Constante universal de los gases (8.31 J/mol-°K).
- T = Temperatura (°K).
- η = Número de electrones transferidos en los procesos de óxido/reducción.

1.6 Cinética de la corrosión

Para predecir la velocidad a la cual el metal se va a corroer es necesario incluir factores cinéticos. (Cruz-Islas, 2002). Hay muchos más factores que se pueden considerar, que obstaculizan o facilitan el proceso mismo, haciéndolo más o menos difícil. Así pasa con la cinética de una reacción electroquímica como lo es el caso de la corrosión, en donde siempre habrá una dificultad dada a vencer para que el proceso ocurra, a pesar de que la termodinámica dice que la reacción es espontánea y que ocurrirá desde un punto de vista energético (Castillo-Rendón). La cinética indica la cantidad de metal por unidad de tiempo que se disuelve en un medio dado, cuando un sistema este desplazado de una situación de equilibrio (Cruz-Islas, 2002).

1.6.1 Leyes de Faraday

Las leyes de Faraday de la electrolisis, como se conocen hoy en día, fueron formuladas entre los años 1833 y 1834, cuando Michael Faraday publicó los resultados de una amplia serie de investigaciones acerca de las relaciones entre la cantidad de electricidad que se transfiere a una disolución y la cantidad de material que se libera en los electrodos (Lugo-Islas 2010). Pueden enunciarse de la siguiente manera:

- a) La masa de un elemento depositada en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de la disolución del electrolito.
- b) Las masas de los elementos que se depositan en los electrodos son proporcionales a los equivalentes químicos.

Establece la relación entre la masa transformada en un proceso electroquímico y la cantidad de carga suministrada (Franco-Tronco, 2014).

$$P = q * \frac{Peq}{F} \quad (3)$$

Donde:

- F = 96500 Cb/eq (Constante de Faraday).
- p = Masa transformada.
- p_{eq} = Peso equivalente.

En otras palabras, la proporcionalidad entre la corriente y la cantidad de metal corroído está relacionada por la ley de Faraday (Genescá, 2002).

$$m = \frac{ItPA}{nF} \quad (4)$$

Dividiendo la ecuación anterior entre el tiempo (t), y el área (A), siendo $i_{corr}=I/A$, entonces:

$$V_{corr} = \frac{PAicorr}{nF} \quad (5)$$

1.6.2 Ley de Tafel.

Fue en el año de 1905 donde Tafel dedujo de manera teórica que, para la reacción de reducción del protón, la ecuación (6) de polarización de un electrodo es reversiblemente polarizable, en el cual se desarrolla un sistema casi reversible (Meas, 2012).

Ecuación de tafel:

$$n = a + b[\log it] \quad (6)$$

Esta ley de Tafel tiene un papel importante en electroquímica y es en la búsqueda de su justificación teórica que se han podido encontrar las hipótesis correctas para el mecanismo de una reacción electroquímica (Monroy-Barreto, 2016).

En base a lo mencionado, se representan las siguientes rectas de la Figura 5:

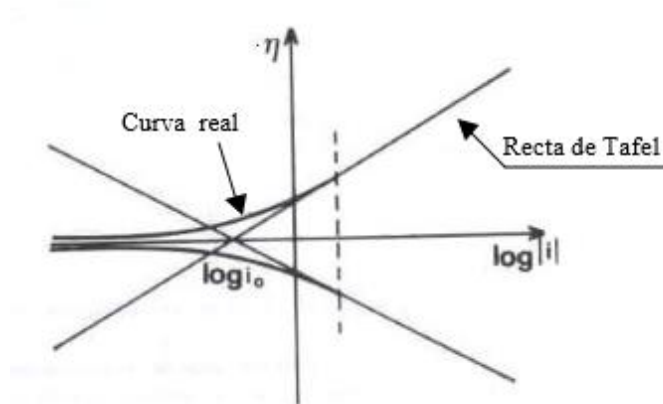


Figura 5. Rectas o pendientes de Tafel (Meas, 2012).

1.7 Técnicas electroquímicas

El proceso de corrosión se compone de dos reacciones electroquímicas que ocurren al mismo tiempo cuando un metal se expone al ambiente en un electrolito, por esta razón las técnicas electroquímicas constituyen una herramienta muy valiosa para hacer mediciones y estudios del proceso de corrosión e incluso a nivel interfase entre el sustrato metálico y capas de productos de corrosión formados (Ramírez-Reyes, 2007). La mayor parte de los métodos electroquímicos para el estudio de la corrosión están basados en la perturbación controlada de una de las dos variables eléctricas fundamentales, potencial o corriente, y en la medida del valor que adquiere la otra variable como consecuencia de la alteración introducida en el sistema. Gracias al uso de este tipo de técnicas o métodos es posible estudiar los mecanismos de interacción, velocidades de corrosión, medir el poder oxidante del medio electrolítico además de extraer información adicional de las características del sistema, las cuales no se pueden obtener mediante el uso de otras técnicas (Berrocal y Altamiranda Percy, 2013).

El monitoreo de la corrosión en planta y en campo implica el uso de diferentes técnicas electroquímicas o inserción de probetas (cupones). Estas se clasifican en técnicas de corriente directa como Resistencia a la Polarización Lineal (RP) y de corriente alterna como Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés, Electrochemical Impedance Spectroscopy). Las técnicas mencionadas fueron empleadas en este trabajo de investigación, las cuales se describen a continuación.

1.7.1 Polarización Potenciodinámica

La técnica de polarización potenciodinámica fueron introducidas por Evans en 1929 para predecir el comportamiento corrosivo, aunque actualmente son fundamentales para evaluar los fenómenos básicos como corrosión localizada y pasividad, y los efectos sobre aleantes y el uso de inhibidores sobre la cinética de las reacciones electroquímicas que determinan el comportamiento electroquímico. En el caso de la corrosión por picaduras las curvas de polarización potenciodinámica deben ser corridas dentro de un rango de potencial para localizar dos parámetros críticos E_{prot} (potencial de corrosión) y E_{pit} (potencial de picaduras), (Monroy-Barreto 2016).

1.7.2 Curvas de polarización potenciodinámica

Las curvas de polarización potenciodinámicas (Figura 6), son aquellos diagramas que representan de manera gráfica las reacciones anódicas y catódicas de un sistema en proceso de corrosión, estableciendo un determinado intervalo en la señal de amplitud, mediante estos diagramas se puede estimar cuando el material es más susceptible a presentar el proceso de corrosión uniforme y en otro caso al proceso de corrosión por ataque localizado (picaduras). En este proceso la desviación del equilibrio provoca una diferencia de potencial eléctrica entre el polarizado y el electrodo (no polarizado) conocida como sobre potencial (Monroy-Barreto 2016). Por lo tanto, son herramientas útiles para estudiar la cinética y los mecanismos de reacción del proceso de corrosión.

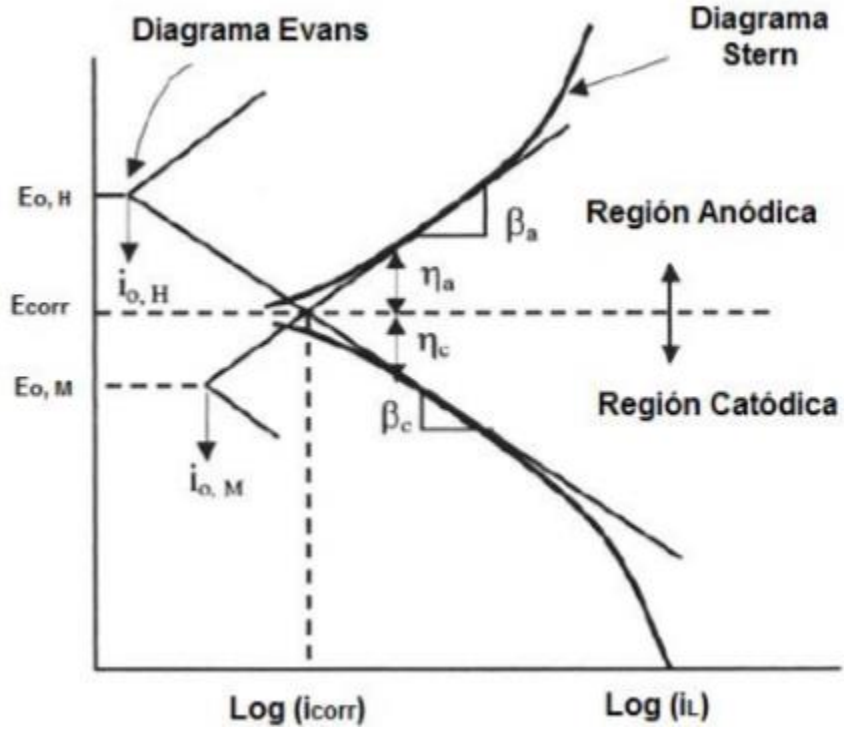


Figura 6. Curva de Polarización Potenciodinámica (Monroy-Barreto, 2016).

1.7.3 Resistencia a la Polarización Lineal (LPR)

Es una técnica electroquímica para medir la resistencia que opone el metal a ser polarizado la cual fue desarrollada en el año de 1957 por Stern y Geary (Mendoza, Duran & Genescá, 2014). Consiste en desplazar ligeramente el sistema (proceso de corrosión) de su potencial de equilibrio E_{corr} a otro valor de potencial en un intervalo que incluye las direcciones anódicas y catódicas de una reacción redox, mediante la aplicación de un barrido potencial registrándose las variaciones de potencial ΔE y de corriente ΔI en el sistema (Castillo-Rendón, 2011). Esta técnica es empleada para el monitoreo de la corrosión, es decir que a través de esta polarización y de las pendientes de TAFEL podemos medir velocidades de corrosión las cuales se expresan en unidades de mm/año o en unidades similares.

La ecuación desarrollada por los investigadores se muestra a continuación:

$$i_{corr} = B/R_p \quad (7)$$

$$B = (babc)/[2.303(ba + bc)] \quad (8)$$

Donde ba y bc son las pendientes de Tafel anódica y catódica respectivamente.

La ecuación (7) establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), es decir, la velocidad de corrosión, con la resistencia a la polarización, mientras que la constante B en la ecuación (8) sirve para pasar de la proporcionalidad a la igualdad y presenta una relación existente entre las pendientes de Tafel. A partir de esto es necesario que exista el comportamiento tafeliano en el sistema electroquímico, para que la ecuación de Stern y Geary pueda ser aplicable (Rodríguez-Gómez, 2002).

1.7.4 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)

La técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS por sus siglas en inglés) es un método utilizado para realizar estudios de corrosión y la caracterización de sistemas electroquímicos, que se fundamenta en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo de trabajo (metal en corrosión) y registrando la respuesta correspondiente. En el procedimiento experimental más comúnmente usado, se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias (Mendoza et al, 2003). En otras palabras, la impedancia electroquímica, es la aplicación de una señal sinusoidal de baja amplitud, con características de baja frecuencia, para obtener el resultado de la resistencia o impedancia (Z), al paso de la corriente a través de un potencial aplicado, con la obtención de un diagrama característico a la aplicación del potencial E y corriente i .

Esta técnica es muy utilizada debido a que proporciona buenos resultados en cuanto a la caracterización superficial de los metales, es decir mediante el uso de esta técnica es posible obtener información acerca de las propiedades del sistema tales como difusión electrónica, mecanismos de corrosión, formación de productos de oxidación, reacción de generación de hidrógeno y evaluación de recubrimientos pasivos (Reyes-Castillo, 2011). Gracias a esta técnica, es más factible conocer el comportamiento de la corrosión de los materiales metálicos dentro de un medio de inhibición y determinar la efectividad del inhibidor como el que se presenta en este trabajo de tesis.

En ingeniería de corrosión, un arreglo de un circuito eléctrico sencillo como el de la Figura 7, donde la resistencia R_s se encuentra relacionada con la resistencia del electrolito o solución y para las capas superficiales de los productos de corrosión R_{tc} , es la resistencia de transferencia de carga, (es decir, resistencia al paso de electrones) y está relacionada con las reacciones electroquímicas de corrosión (García-Inzunza, 2014). Mientras que, C_{dl} es un capacitor y se relaciona a la carga eléctrica sobre la interfase del metal debido a las reacciones electroquímicas que ocurren en el sistema metal/electrolito.

La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (R), utilizado en circuitos de corriente alterna (CA), dada en la siguiente ecuación, (Mendoza et al, 2003).

$$Z = \frac{E(V)}{I(A)} \quad (9)$$

Por otra parte cabe mencionar que se utilizan con más frecuencia dos tipos de representaciones de la frecuencia en un sistema lineal, los cuales se mencionan a continuación.

Diagrama de Nyquist

El diagrama de Nyquist es la representación gráfica de la Z_{real} vs Z_{imag} , tendrá una parte de baja frecuencia que se encuentra por debajo del eje real (Baboian, 1986), por lo que muestra los componentes real e imaginario de la impedancia total, de una combinación en paralelo de una resistencia y un capacitor (Figura 7). A bajas frecuencias la impedancia es puramente resistiva, debido a que la reactancia del capacitor es muy grande.

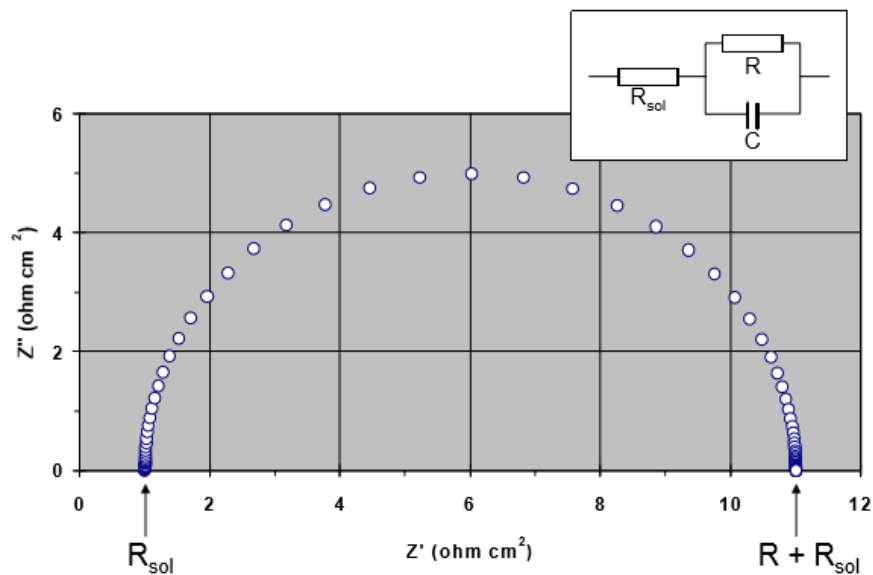


Figura 7. Diagrama de Nyquist, componentes real (Z') e imaginario (Z'') de la impedancia total (Z) para un circuito en paralelo resistencia (R) – capacitancia (C), que considera a la solución (R_{sol}), a diferentes frecuencias ($R= 1$ ohm, $C=0.0001$ F/ cm^2 , f máxima= 105 Hz, f mínima= 10⁻² Hz. (Mendoza et al, 2003).

Diagrama de Bode

Este tipo de diagrama representa los diferentes parámetros de la impedancia contra la frecuencia. Dentro de los diagramas de bode están el diagrama de $\log |Z|$ y ángulo de fase (ϕ) vs el logaritmo de la frecuencia (Figura 8). Los diagramas de bode representan la variación de la impedancia real contra la frecuencia graficada en coordenadas log-log (Reyes-Castillo, 2011).

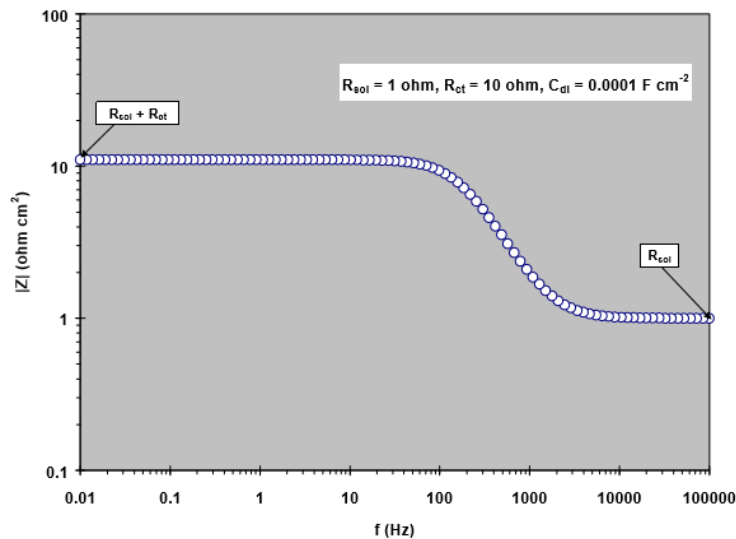


Figura 8. Gráfico de Bode $|Z|$ vs f , correspondiente a la impedancia de circuito serie-paralelo a diferentes frecuencias, que considera R_{ct} , C_{dl} , y R_{sol} (Mendoza et al, 2003).

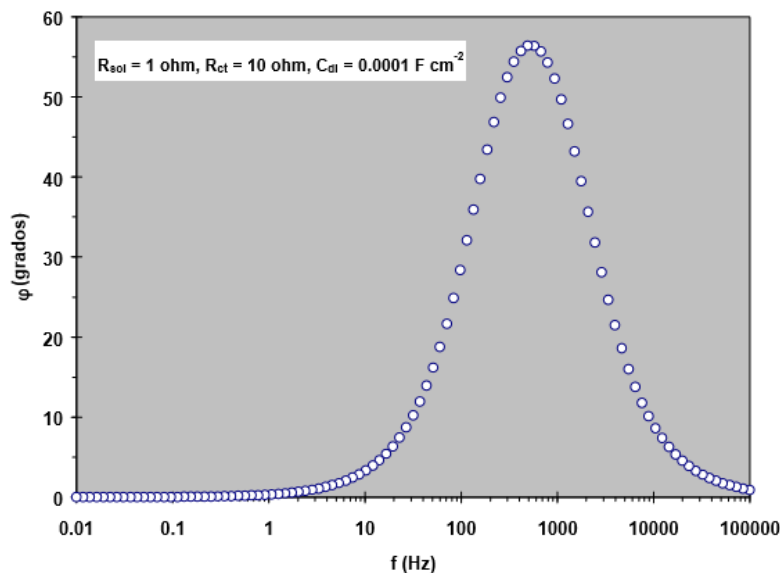


Figura 9. Gráfico de Bode, ángulo de fase (ϕ) vs f , correspondiente a la impedancia de circuito de serie-paralelo a diferentes frecuencias, que considera R_{ct} , C_{dl} , y R_{sol} (Mendoza et al, 2003).

1.8 Métodos de control de la corrosión

Debido a los daños que son producidos por el fenómeno de la corrosión, existen diferentes alternativas y/o métodos de protección que pueden emplearse para disminuir y prevenir la corrosión metálica. Sin embargo, no todos los métodos son totalmente efectivos, los cuales se ilustran en la Figura 10.

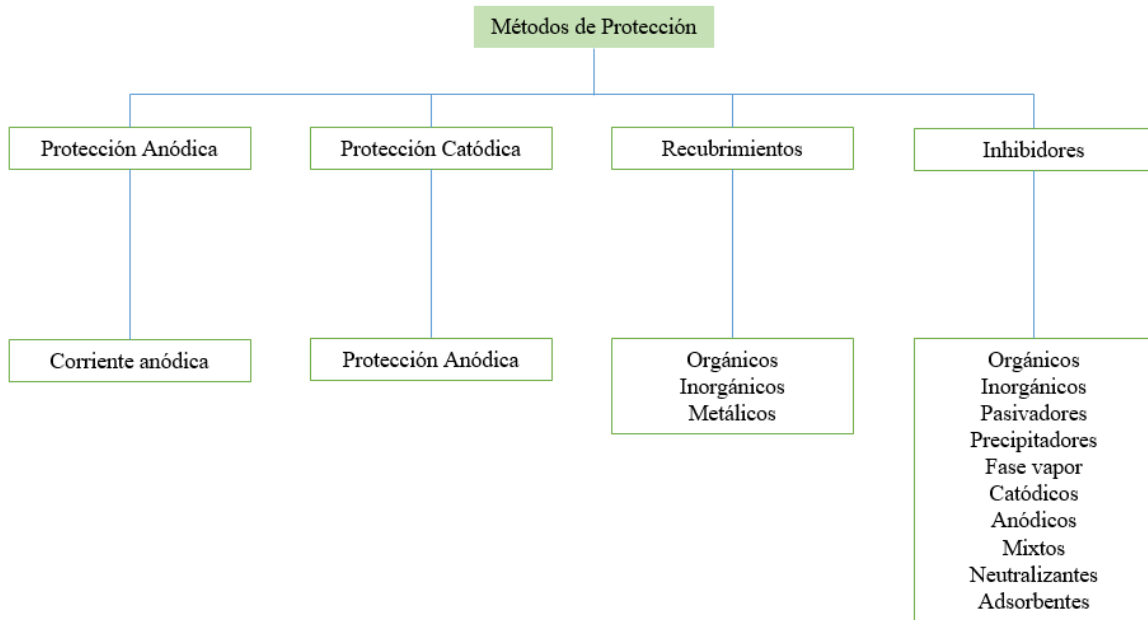


Figura 10. Clasificación de los métodos de control de corrosión (Franco, 2014).

1.9 Inhibidor de corrosión

El uso de inhibidores de corrosión es de uso común y muy popular dentro de los diferentes métodos de protección existentes. Por definición, un inhibidor de corrosión es cualquier sustancia de una fase cuya presencia no es esencial para que suceda un proceso electroquímico, pero que produce un retardo del mismo, al modificar el estado superficial del metal, (que cuando se añade en pequeñas concentraciones a un medio, disminuye eficazmente la velocidad de corrosión) (Buralla-Montal, 2012) reaccionando con la superficie metálica o con el ambiente al que está expuesta esta superficie, dándole un cierto nivel de protección. Algunos inhibidores se adsorben, protegiendo la superficie metálica mediante la formación de una película, retardando el proceso de corrosión, incrementando 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

(Satri, 2011), además de que tenga alta afinidad o polarización hacia el metal, esto quiere decir que se va adherir, y que tenga fácil adsorción y que sea soluble o polar. A continuación se describe la clasificación de los distintos tipos de inhibidores.

1.9.1 Clasificación de los Inhibidores de Corrosión

Existen diversas clases de inhibidores, los cuales se mencionarán a continuación:

Existen inhibidores que actúan debido a su composición, como los inorgánicos que consisten usualmente en sales cristalinas como cromato de sodio, fosfato y molibdatos (Fernández-Guerrero, 2011), también los inhibidores orgánicos, los cuales se utilizan en sistemas de enfriamiento y comúnmente son de tipo aniónico como el mercaptobenzoatiazol (MBT), sulfatos de sodio y fosfanatos (Berrocal y Altamiranda Percy, 2013), con lo que estos protegen al metal mediante una película hidrofóbica en la superficie del metal, al ser fijados por adsorción, según la carga iónica del inhibidor y la carga en la superficie (Alvarado-Cortés, 2006). Los inhibidores orgánicos forman una barrera molecular capaz de bloquear las reacciones anódicas y catódicas que se originan por la existencia de micro celdas electroquímicas sobre el metal debidas al medio acuoso (Monroy-Barreto, 2016).

Existen otros tipos de inhibidores, que actúan de acuerdo a su mecanismo de acción. Por esta razón los inhibidores se pueden clasificar en anódicos, catódicos o mixtos, utilizados para el control del deterioro por corrosión, los cuales se describen generalmente de la siguiente manera:

- ***Inhibidores anódicos:*** Son aquellos que se utilizan generalmente en soluciones casi neutras en productos de corrosión poco solubles, tales como, óxidos, hidróxidos, o sales que se forman. Facilitando la formación de películas pasivadoras que inhiben la reacción anódica del metal (Franco-Tronco, 2014). Son aquellos que incrementan la polarización anódica desplazando el potencial de corrosión hacia valores más positivos, con lo que la superficie del metal se vuelve más noble.
- ***Inhibidores catódicos:*** Este tipo de inhibidor es menos eficaz y actúa de manera contraria, ya que produce un desplazamiento de manera negativa, con lo que la superficie del metal se vuelve mucho más activa formando películas protectoras de alta resistencia eléctrica actuando como una barrera para la corriente de corrosión. Algunos inhibidores catódicos, son iones tales como calcio, cinc o magnesio, se pueden precipitar como óxidos para formar una capa protectora en el metal (Alvarado-Cortés, 2006).

- **Inhibidores mixtos:** Alrededor del 80% de los inhibidores son compuestos orgánicos que no se pueden designar específicamente como anódicos o catódicos los cuales se denominan como inhibidores mixtos. La eficiencia orgánica de los inhibidores se relaciona con el grado en que se adsorben y cubren la superficie del metal. Los compuestos orgánicos se adsorben en la superficie del metal formando una barrera a la disolución ánodo y una barrera a la reducción del oxígeno en los sitios catódicos. La adsorción depende de la estructura del inhibidor, en la carga de la superficie del metal, y en el tipo de electrolito (Franco-Tronco, 2014).

1.9.2 Métodos de Estudio de los Inhibidores

El estudio de inhibición puede afrontarse esencialmente con dos finalidades diferentes: el contenido de su eficacia protectora, o el de su mecanismo de acción (González-Fernández, 1989). Mientras que los estudios utilizados para el estudio de los mecanismos pueden ser muy variados y de diferente función, muchas veces, de la imaginación de los investigadores, los métodos utilizados para comprobar la eficacia de los inhibidores son todos los usuales para la evaluación de los fenómenos de corrosión, estimándola a partir de la ecuación siguiente:

$$IE\% = \frac{V_{corr}^{\circ} - V_{corr}}{V_{corr}^{\circ}} \times 100 \quad (10)$$

Donde:

- IE= Eficiencia de Inhibición
- V_{corr}° y V_{corr} = Velocidades de corrosión en ausencia y presencia del inhibidor.

La prueba gravimétrica es una prueba confiable y muy precisa para determinar las velocidades de corrosión, sometiendo al material en un estudio a un ataque del agente corrosivo durante un tiempo determinado. Una vez finalizado el ataque, se determina la pérdida de peso que el material experimenta con el fin de obtener la velocidad de corrosión en miligramos de material perdido por año transcurrido y dm^2 de área de material expuesto (García-Inzunza, 2014).

Gracias al desarrollo de estas técnicas, es más factible determinar la eficiencia inhibitoria, es por esto que en el presente trabajo se utilizaron dos técnicas electroquímicas para determinar la eficiencia del inhibidor ecológico.

1.9.3 Inhibidores y extractos líquidos

En el presente trabajo de investigación se estudia un extracto de la planta de NOPAL como posible uso de inhibidor de la corrosión, con la finalidad de utilizar mejores alternativas para la obtención de estos, disminuyendo los costos e incrementar el porcentaje de inhibición, optimizando recursos, que la naturaleza nos ha brindado.

Como se mencionó anteriormente, el uso de extractos naturales se ha aplicado con más frecuencia, al poseer grupos funcionales de la química orgánica ya que tienen propiedades anticorrosivas para diversas aleaciones, procurando no contribuir a la pérdida de especies a pesar de la gran variedad vegetal. Dichas sustancias se obtienen de hojas, tallos, flores o semillas, según sea la parte que contiene el ingrediente activo que actúa contra el fin deseado. Para obtenerla, en algunos casos se macera (muele o machaca) la parte seleccionada, pero lo más común es la cocción o la infusión (como hacer un té), al que se le agrega generalmente alcohol o algún otro disolvente más o menos polar según sea los componentes que se desea extraer (García-Inzunza, 2014).

En el presente proyecto de investigación se utilizó un extracto vegetal-natural para encontrar propiedades anticorrosivas, tomando en consideración las propiedades y beneficios que proporciona, además de la abundancia de la zona y fácil acceso como es el caso del Nopal (*Opuntia Ficus-Indica*), siendo una planta perteneciente a la familia Cactáceae, siendo las cactáceas especies endémicas del continente Americano que se desarrollan principalmente en las regiones áridas y semiáridas (García-Favela, 2013).

Existen otros extractos que ya se han estudiado como inhibidores de corrosión. Recientemente se ha reportado la evaluación de extractos como la *Morinda Citrifolia* como inhibidores de corrosión en diferentes concentraciones en un medio ácido (H_2SO_4 1M) de un acero X60, solo que no se demostró un mecanismo de inhibición sobre la superficie del acero (Franco-Tronco, 2014). Más tarde (Monroy-Barreto, 2016) evaluó la efectividad del extracto etanólico de *morinda citrifolia* como inhibidor de la corrosión en HCl 1M en diferentes aceros de uso comercial como el AISI 8620, 1045 y 4140, encontrando que las moléculas se adsorben físicamente sobre la superficie del metal retrasando la velocidad de corrosión hasta un 90%. En el mismo sentido, H. Herrera-Hernández y colaboradores en 2015, reportaron en la *revista de Avances en Ciencias e Ingeniería* que el extracto-líquido (GEL)

proveniente del ALOE-VERA inhibe la corrosión en aceros que se utilizan para reforzar estructuras de concreto. Algunos otros como el extracto de *Opuntia Ficus-Indica* (Nopal) y el extracto de *Agavoideae* (Agave) como inhibidores verdes de la corrosión de un acero 1018 en un medio ácido de HCL 1M, en donde la eficiencia del extracto de nopal incrementa al aumentar la temperatura, caso opuesto al extracto de agave, ya que la eficiencia decrece al incrementar la temperatura (Flores de los Ríos, 2016). Algunos otros extractos como el de *Larrea Tridentata* (La gobernadora) y *Pachycormus discolor* (Árbol del Elefante) (García-Inzunza, 2014), entre otros.

Algunos otros extractos como el de las hojas de *Olea europea* conocida como olivo, fue estudiada como inhibidor de la corrosión para superficies de acero en una solución de salmuera, tal como lo reporta (Abdel- Gaber et al., 2011). El extracto de hojas de *Neem* que se encontró altamente eficiente para inhibir la corrosión del acero al carbono en solución de HCL 1.0M, alcanzando eficiencias alrededor del 87%, con concentración de 3g/L del extracto (Nahle et al., 2010) por considerar algunos más recientes.

Existen otros extractos que ya han sido estudiados, por ejemplo, el árbol del limonero (*Citrus aurantiifolia*), cohahuilote, algas marinas y el tabaco por mencionar algunos (García-Inzunza, 2014). Debido a que este campo de investigación es muy amplio y además de recién aplicación.

1.10 Generalidades de *Opuntia Ficus-Indica* como inhibidor de corrosión

Esta planta es originaria del continente Americano; se distribuye desde Canadá hasta Argentina se le puede encontrar en las zonas áridas y semiáridas (Guzmán y Chávez 2007). Desde tiempos muy remotos esta planta ha desempeñado un rol muy importante en el desarrollo de las culturas del centro de México, siendo el país con mayor abundancia de especies por lo que se puede considerar como centro de origen y diversidad de esta especie. Algunos términos prehispánicos que se utilizaron en relación con el Nopal (Figura 11): son Nochtli para el fruto o Nopalli, para distinguir los tallos achatados (Granados-Sánchez, 2003).



Figura 11. Representación típica de la planta del nopal.

Dadas las características morfológicas y fisiológicas que presenta esta planta, le permite soportar condiciones ambientales desde escasa precipitación, hasta altas y bajas temperaturas (Guzmán y Chávez 2007).

El nopal es endémico de América y existen aproximadamente 258 especies reconocidas, 100 de las cuales se encuentran en México, quien cuenta con una superficie aproximada de 10,000 hectáreas de plantaciones especializadas en nopal para consumo humano (Paredes-Martínez, 2011). El peso y longitud de las hortalizas cosechadas para consumo humano varían dependiendo de la especie. Sin embargo, en general, el rango es de 40-100 gramos y 11-20 cm de longitud (Paredes-Martínez, 2011).

En cuanto a su descripción física *Opuntia Ficus-Indica* casi no tiene espinas. Es un vegetal arborescente de 3 a 5 metros de alto, su tronco es leñoso y mide entre 20 y 50 cm de diámetro. Forma artículos oblongos (pencas o cladodios) de 30 a 60 cm de largo x 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor. Sus ramas están formadas por pencas de color verde opaco con areolas que contienen espinas más o menos numerosas, amarillas y produce flores de 7 a 10 cm de largo (Ríos-Ramos, 2004). La longevidad promedio de las plantaciones de nopal es de 5 a 7 años, alcanzando a llegar hasta los 10 años, con buenos rendimientos (terreno apropiado, prácticas constantes de cultivo, etc.) en cuanto a las plantaciones comerciales de explotaciones intensivas pueden durar hasta 3 años (Ríos-Ramos, 2004).

Entre las cactáceas, la planta del Nopal es la de mayor importancia agronómica, además de tener aplicaciones en diversas áreas dado a su composición química. Como en la agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano (producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas y analcohólicas de tuna y nopalitos). En México y otros países se fabrican, de nopal o de la tuna, cosméticos como: shampoo, acondicionadores, jabones, cremas, lociones, mascarillas, geles, etc. El nopal se utiliza en muchos países para proteger el suelo de la erosión hídrica y eólica. Se emplea como suplemento alimenticio (fibras y harinas de cladodios) (Flores de los Ríos, 2016). También ha

sido de utilidad en la ferretería, ya que desde hace tiempo se conocen sus propiedades adhesivas aprovechándolas en aditivos y pinturas. Estudios recientes han propuesto el uso del polvo de nopal para la construcción, con el fin de aumentar la dureza de estructuras de concreto, logrando resultados sorprendentes, alcanzando una dureza 56% mayor que la del concreto sin mucílago de nopal (Ríos-Ramos, 2004).

Para fines de este estudio, la principal característica de esta planta por evaluar, es debido a que contiene una fibra soluble (mucílago), la cual tiene la capacidad de retener grandes cantidades de agua. También nos brinda propiedades antioxidantes, ya que posee grandes cantidades de aminoácidos y fibras que actúan con efectos antioxidantes, los cuales ayudan a erradicar las moléculas deficientes de oxígeno (Radicales libres), que de no eliminarse causan daños celulares que pueden llevar al desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas (diabetes, cáncer, artritis entre otras) (Reyes-Castillo, 2011). Para el control del colesterol y prevención de algunas enfermedades como la diabetes y obesidad por mencionar algunas (Valdez et al., 2008). También se sabe de aplicaciones más sofisticadas en otros países, como la obtención de biopolímeros para la industria Aero-Espacial (Reyes-Castillo, 2011).

Es por esto que se tuvo un gran interés en esta planta para ser evaluada electroquímicamente como inhibidor de corrosión.

CAPÍTULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO II

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen los procedimientos experimentales empleados para la obtención y evaluación del extracto-líquido de nopal *EN* como un posible inhibidor de corrosión de aceros industriales en medio ácido.

2.1 Equipos y materiales

Para el desarrollo experimental de este proyecto de investigación se requirió de los siguientes equipos y materiales.

Equipos y materiales:

- ❖ Electrodo de trabajo (WE). Probetas de acero al carbono AISI 1045, 1018, 4140.
- ❖ Electrodo de referencia (RE): Electrodo saturado de Calomel (SCE).
- ❖ Electrodo auxiliar (CE): Electrodo o contra-electrodo de Grafito/Malla de platino.
- ❖ Celda electroquímica de tres electrodos de diseño propio (Herrera-Hernández, H).
- ❖ Balanza analítica Adventure Pro®.
- ❖ Pencas de Nopal.
- ❖ Extractor Turmix ® modelo Estándar serie No. E2135116 de 127V.
- ❖ Parrilla eléctrica Thermolyne® THERM-SP modelo SP-131325 Stable Temp.
- ❖ Campana de extracción de gases.
- ❖ Bipotenciostato/Galvanostato modelo VSP-CHAS marca BioLogic®.
- ❖ Microscopio óptico NIKON® EPIP Hot 200.
- ❖ Microscopio estereoscópico LEICA® modelo EZ4D.
- ❖ Pulidora (desbastadora) BUEHLER ECOMET® 5 de disco.
- ❖ Pulidora Dewalt® modelo D26441.
- ❖ Lijadora de muestras metalográficas de la marca BUEHLER® HANDIMET 2.
- ❖ Propela STIR PAK® COLE PALMER replacement mixer head No, 4554-14 (laboratory mixer) 3-250/50-5000 R.P.M.

Material de vidrio/otros:

Matraces Erlenmeyer, embudos, vasos de precipitado, pinzas, cuchillos (objeto punzo cortante), probetas, pipetas, agitadores magnéticos, espátulas, perillas, foil de aluminio, papel filtro, recipientes de plástico, termómetro, tamiz del #80, calibrador Vernier.

Medios acuosos para pruebas de corrosión:

- ❖ Solución de H_2SO_4 al 0.6M de concentración.
- ❖ Solución de H_2SO_4 con adición de extracto líquido de nopal. 50%-50%
- ❖ Extracto-líquido de pencas de nopal (Opuntia-Ficus Indica).

2.2 Selección de materiales

Para llevar a cabo una correcta selección de los materiales es de vital importancia considerar una serie de factores, como las propiedades físicas y mecánicas, facilidad de trabajo mecánico, adaptación, desempeño puesto en servicio, resistencia a la corrosión, durabilidad, fabricación, etc. De esta manera, la selección debería realizarse en base al material más económico, pero que cumpla con los requerimientos necesarios para el uso que se le va a dar. Por otro lado, las consideraciones económicas también son muy importantes, así como el tiempo de vida útil esperado para el equipo e instalación. Tanto el diseño como el mantenimiento planificado deben ser considerados en la selección de un material con intenciones a un buen control de la corrosión. Sin embargo, un camino evidente para evitar la corrosión es el empleo de materiales químicamente resistentes tales como las cerámicas, compósitos, cemento, vidrio, asbesto, plásticos, etc. Sin embargo, en muchos casos estos materiales no reúnen aquellas otras propiedades como para satisfacer los requerimientos de servicio (Castillo-Rendón, 2011). Los materiales metálicos seleccionados para su estudio poseen características y propiedades diferentes. Con base a esta consideración, es por esto que para este trabajo de tesis se estudió el comportamiento de tres materiales metálicos de Fe-C (aceros al carbono), los cuales son de uso común y mayor impacto en la industria. Los materiales seleccionados para el presente estudio son: acero al carbono AISI/SAE 1018, acero de medio carbono 4140 y el acero al carbono 1045.

2.3 Descripción y características de los aceros seleccionados

Decodificación de los aceros

El número de cuatro dígitos es un código que describe el acero al carbono. Para los aceros AISI 1018 y 1045 se describen de la siguiente manera:

- El primer dígito (número 1): indica que es un acero al carbono.
- El segundo dígito (número 0): indica que no hay modificaciones en la aleación.
- Los dígitos finales: están relacionados con la cantidad de carbono. Dependiendo el caso AISI 1018 (0.18%) y acero AISI 1045 (0.45%), determinando la resistencia y ductilidad de la aleación final.

En cuanto al acero AISI 4140, se describe de la siguiente manera:

- El primer dígito (número 4): significa que es un acero aleado.
- El segundo dígito (número 1): indica el contenido del 1.1 % de Cr y 0.2% de Mo.
- Los dígitos finales: indican el contenido de carbono (0.40%) para este caso.

En seguida se mencionan las características generales de cada uno de los materiales empleados en este estudio.

Acero al carbono AISI 1018

Este acero es versátil de bajo-medio carbono, tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria (Moreno et al., 2013), que no están sujetos a grandes esfuerzos (automotriz, línea blanca, equipos de proceso). Los usos más comunes son las cuñas, tornillos, remaches, rodillos, entre otros.

Tabla 2. Composición química del acero AISI 1018.

Acero-AISI	%C	%Mn	%P _{max}	%S _{max}	%Fe
1018	0.15-0.20	0.60-0.90	0.040	0.050	Bal.

Acero al carbono aleado AISI 4140

Entre los aceros de baja aleación y medio carbono es el más extensamente usado. Acero grado maquinaria aleado con cromo y molibdeno. Posee mediana templabilidad, buena maquinabilidad, alta resistencia mecánica, buena tenacidad y baja soldabilidad. Este acero es susceptible al endurecimiento por tratamiento térmico. Es comúnmente utilizado para la fabricación de piezas y partes de maquinaria que requieren alta tenacidad y resistencia. Muy utilizado para piezas de la industria automotriz y maquinaria en general, cigüeñales, rotulas, engranes de transmisión, flechas de transmisión, portamoldes, ejes de leva, bielas, pernos y tuercas, etc.

Tabla 3. Composición química del acero AISI 4140.

Acero-AISI	%C	%Mn	%P _{max}	%S _{max}	%Si	%Cr	%Mo	%Fe
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.035	0.040	0.15-0.35	0.80-1.10	0.15-0.25	Bal.

Acero al carbono AISI 1045

Acero no aleado y de medio contenido de carbono, es considerado como un material de buena calidad por su elevada tenacidad y ductilidad además de buenas características a la forjabilidad, presenta soldabilidad adecuada de acuerdo a prácticas de soldadura adecuada, responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción. Cuando es tratado térmicamente es utilizado para la fabricación de componentes de maquinaria. Apto para fabricaciones de exigencias moderadas. Tiene amplia gama de aplicaciones automotrices y de maquinaria en general, en la elaboración de piezas, como semiejes, tornillos, bielas, pinzas hidráulicas, variedad de rodillos, postes, entre otras piezas de resistencia media.

Tabla 4. Composición química del acero AISI 1045.

Acero-AISI	%C	%Mn	%P _{max}	%S _{max}	%Fe
1045	0.43-0.50	0.60-0.90	0.040	0.050	Bal.

2.4 Obtención del extracto líquido de nopal EN

Para la elaboración del extracto de nopal fue necesario tomar en cuenta la ubicación para recolectar la materia prima.

Recolección, limpieza, desinfección y lavado

Las pencas de nopal fueron recolectadas de un cultivo ubicado en la zona de Sanfandila en Pedro Escobedo Querétaro (Figura 12), tomando en cuenta que fueran pencas tiernas (tamaño pequeño) se decidió cortar pencas con un tamaño de 10cm x 7.5cm x 5mm de espesor aproximadamente, como se ilustra en la Figura 13 inciso (a), hasta obtener un total de 500 gr. Posteriormente se realizó la limpieza de estas, comenzando por el desespinado de cada una de ellas, ilustrado en la Figura 13 inciso (b), con la ayuda de un objeto punzo cortante, seguido de la desinfección en un recipiente plástico agregando agua, cloro y sulfato cúprico en una relación 1L: 2ml: 1gr, respetivamente, durante treinta minutos para garantizar la eliminación de microorganismos y hongos, como se ilustra en la Figura 14 inciso (a) y así evitar la descomposición del extracto líquido. Terminando el tiempo del desinfectado se realiza un lavado/enjuague de las pencas de nopal. Se realizó un enjuague con agua de la tarja (lavamanos) y enseguida otro enjuague con agua destilada. Nuevamente se verificó el peso adecuado de las pencas (Figura 14 (b)).



Figura 12. Zona de recolección de las pencas.

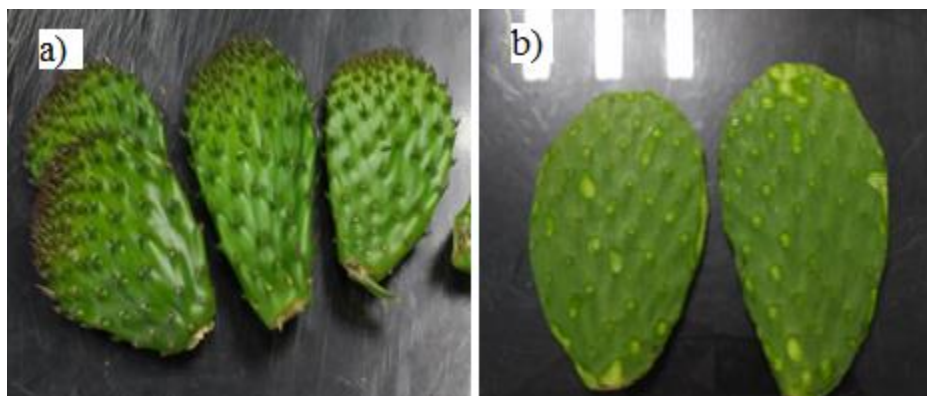


Figura 13. (a) colección de pencas, (b) limpieza/desespinado.

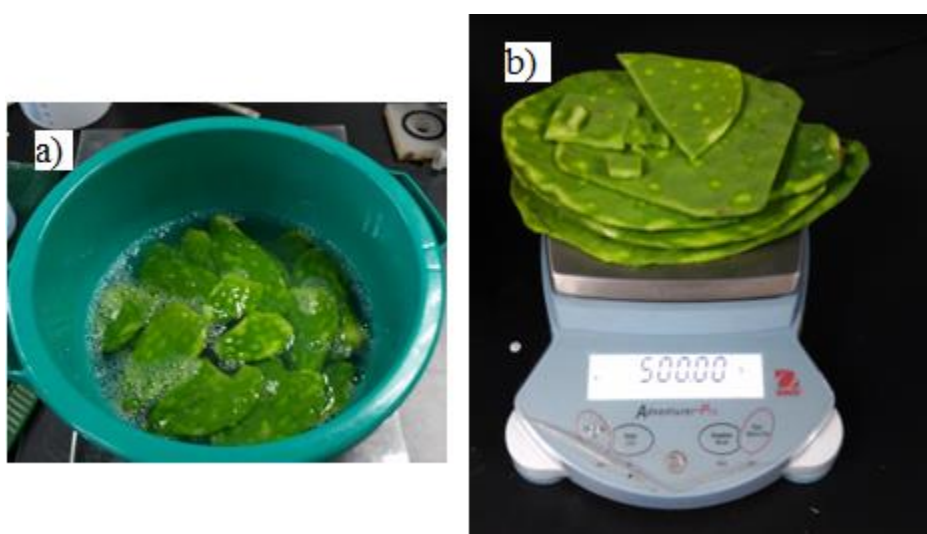


Figura 14. (a) Lavado y desinfectado de las pencas, (b) verificación del peso.

Triturado o molienda mecánica

Se procedió a realizar cortes a las pencas de nopal con una medida 4 x 10 cm figura 15(a), aproximadamente o en cubos pequeños, esto para poder triturarlas de una manera más fácil con un extractor de la marca Túrmix ® modelo Estándar serie No. E2135116 de 127V Figura 15(b). Por lo cual fue posible obtener la pulpa de las pencas de nopal Figura 15(c), haciendo a un lado la parte fibrosa de la materia utilizada.

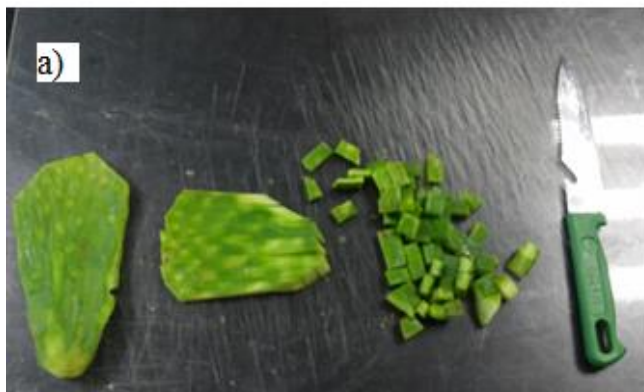


Figura 15. a) Corte de las pencas, b) triturado de las pencas, c) pulpa del nopal.

Fase de calentamiento o de macerado

Una vez obtenida la pulpa de nopal con el extractor, esta se pasó a un vaso de precipitados con mayor volumen y se adicionaron 800 ml de agua destilada. Una vez que al vaso de precipitados se le ha agregado dicho contenido, se colocó sobre una parrilla con agitación y calentamiento de 18 x 18 cm de la marca Thermolyne® THERM-SP modelo SP-131325 Stable Temp y así iniciar el calentamiento de la solución con agitación tomando la temperatura con la ayuda de un termómetro hasta alcanzar

una temperatura entre 78 a 80 °C durante una hora (Figura 16), esto para evitar que las partículas del nopal se destruyan y poder obtener mayor provecho del extracto *EN*.



Figura 16. Calentamiento de la pulpa de nopal durante una hora.

Filtrado

Una vez transcurrido el tiempo de calentamiento de la solución, se dejó reposar por un tiempo aproximado de 20 a 30 minutos permitiendo el enfriamiento de la solución a temperatura ambiente, para poder comenzar con el filtrado.

Nos auxiliamos con un tamiz fino del número #80 para separar la materia sólida (de mayor tamaño) de la líquida Figura 17(a) obteniendo finalmente el *EN* para su posterior uso en las pruebas electroquímicas Figura 17(b).

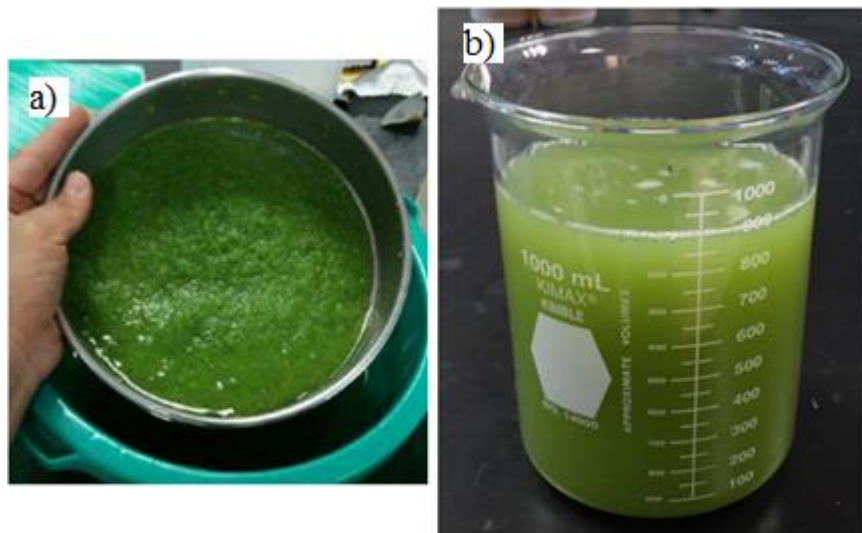


Figura 17. (a) Filtrado del extracto de nopal con Tamiz del No.80, (b) Obtención del extracto de nopal.

2.5. Preparación de las muestras metálicas

Para las pruebas electroquímicas, se necesitaron probetas seccionadas de los diferentes aceros al carbono, AISI 1018, 1045 y 4140 con dimensiones de 2.5 cm de diámetro x 0.8 cm de espesor aproximadamente. Se realizó un desbaste sobre la superficie de las muestras mediante el uso de hojas de carburo de silicio (lijas) con diferentes dimensiones de grano que van desde el número 80, 100, 120, 240, 320, 400, 600, 1200, 1500. Con la ayuda de una pulidora de disco de la marca Buehler® Ecomet 5, ilustrado en la Figura 18 inciso (a), posteriormente se lavaron con agua destilada y fueron desengrasadas con acetona. En la Figura 18 inciso (b) se ilustra una probeta de acero sin desbaste, y también se muestra la misma probeta pero con su acabado final ilustrado en la Figura 18 inciso (c).

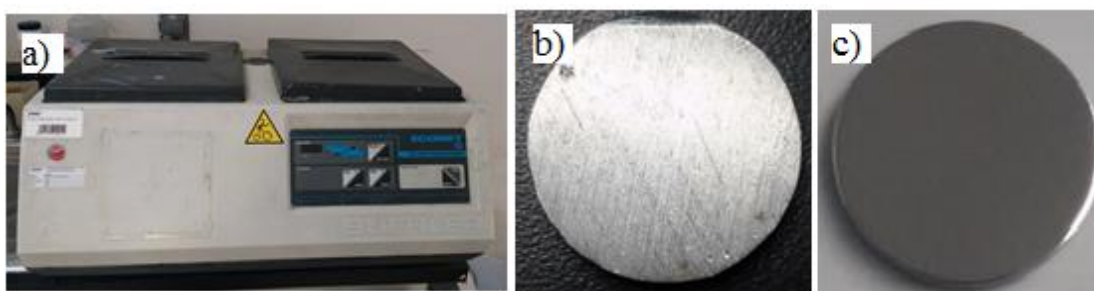


Figura 18. (a) Pulidora de disco Buehler Ecomet 5, (b) Probetas de acero sin desbaste. (c) Probetas de acero con acabado final.

2.6 Preparación de las soluciones de trabajo

Para la experimentación de este trabajo se preparó una solución de ácido sulfúrico H_2SO_4 0.6M y otra solución de HCl 1M para el enjuagado de la malla de platino.

Ácido sulfúrico H_2SO_4 0.6 M y ácido clorhídrico HCl

La preparación del ácido sulfúrico para 100 ml. Se requirió del uso de equipo de protección personal adecuado (guantes de látex, cubre boca) por el hecho de que este tipo de reactivos son altamente corrosivos. De igual manera para el ácido clorhídrico.

2.7 Evaluaciones Electroquímicas

Las evaluaciones electroquímicas se realizaron con un sistema de tres electrodos, conformado por el electrodo de trabajo (WE) representado por las probetas de los diferentes aceros previamente mencionados (AISI 1018, 4140 y 1045) en donde ocurre la reacción de interés (oxidación), el electrodo de referencia (RE) representando por un electrodo saturado de Calomel, el cual se encargó de medir o validar el potencial de la energía entre el electrodo de trabajo y el medio acuoso encargándose de polarizar las reacciones de reducción y oxidación (anódica y catódica), por último se utilizó un alambre de platino, actuando como contra electrodo (CE) el cual se encargó de hacer conexión eléctrica con el electrolito y de esta manera aplicar una corriente sobre el electrodo de trabajo. Todos estos fueron colocados en la celda electroquímica, (Figura 19), la cual fue conectada a un Bipotenciostato/Galvanostato modelo VSP-CHAS marca BioLogic® para las evaluaciones correspondientes (Figura 20).

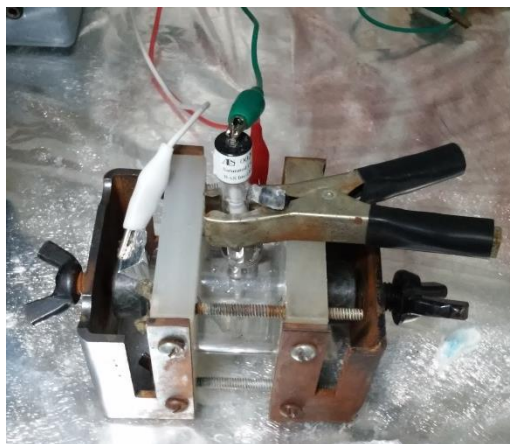


Figura 19. Celda Electroquímica montada con sus respectivos electrodos.



Figura 20. Bipotenciostato/Galvanostato Biologic®

Las evaluaciones electroquímicas se llevaron a cabo de la siguiente manera:

Las pruebas se iniciaron con una base de 35ml de H_2SO_4 0.6M en ausencia y en presencia del agente inhibidor (Extracto de nopal *EN*), de igual manera se emplearon 35 ml del agente inhibidor. Por lo tanto, se empleó una relación del 50-50% v/v de H_2SO_4 0.6M + Extracto de nopal (*EN*). Estas evaluaciones dieron inicio con un seguimiento constante de los valores de potencial de corrosión (E_{corr}) y corriente de corrosión (I_{corr}) a través del tiempo de exposición, seguido de la evaluación de

Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS), en la representación de los diagramas de Nyquist. Por otra parte, se realizó la técnica de extrapolación de Tafel.

Las evaluaciones fueron realizadas a presión atmosférica y temperatura ambiente en el poblado de Sanfandila, Pedro Escobedo, ubicada en el estado de Querétaro, es decir, a condiciones normales de laboratorio.

En cuanto a la secuencia experimental se menciona a continuación:

En primer lugar, se programó el monitoreo de Potencial a Circuito Abierto (OCP/OCV “por sus siglas en inglés”), durante 1 hora, seguido de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS), aplicando un barrido de frecuencias de 100 kHz hasta 10 mHz, con un potencial de amplitud de 10 mV; repitiendo OCP/OCV durante 1 hora y aplicando Resistencia a la Polarización con un rango de Potencial de ± 25 mV con una velocidad de barrido de 1 mV/s; finalmente este ciclo se repite durante 24 horas. Como se mencionó anteriormente, se realizaron inmersiones en H_2SO_4 (0.6M) y posteriormente adicionándole 50% v/v de H_2SO_4 (0.6M) + Extracto de Nopal. La secuencia para la experimentación electroquímica se ilustra en la Figura 21.

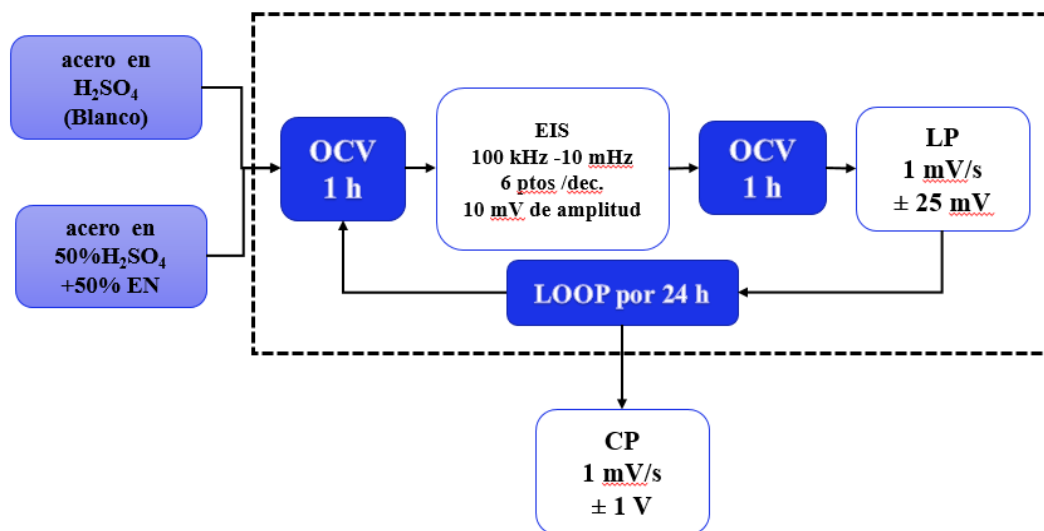


Figura 21. Secuencia para la experimentación Electroquímica.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran y discuten los resultados obtenidos en este trabajo de investigación. Con el extracto de *Opuntia ficus-indica* obtenido se realizaron las evaluaciones electroquímicas en los diferentes aceros. Posteriormente se realizó la toma de fotografías y micrografías con el microscopio estereoscópico para cuantificar el grado de corrosión.

3.1 Obtención del extracto

Mediante una recolección y limpieza de 500 gr de las pencas de *Opuntia ficus-indica* se preparó un total de 900 ml del extracto, a través de la etapa final de filtrado. Dentro de las propiedades organolépticas que presentó este extracto fueron: una sustancia viscosa de color verde claro, con un aroma dulce. Además de presentar una densidad de 0.9 g/ml y un valor de pH de 4.7, se clasificó como una sustancia ligeramente ácida (Figura 22).

Las características de dicho extracto están relacionadas con el tamaño, edad (aproximada), y la zona donde se recolectaron las pencas, debido a que estos pueden llegar a variar de acuerdo a dichos factores.

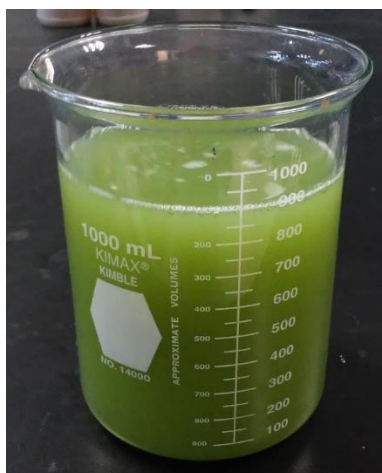


Figura 22. Extracto de nopal.

3.2 Evaluaciones electroquímicas

La primera evaluación electroquímica fue el seguimiento del potencial de Corrosión (E_{corr}) con respecto al tiempo de exposición (24 horas) en presencia y en ausencia del inhibidor, representados por medio de los gráficos como los de la Figura 23, mostrando resultados eficientes con la adición del inhibidor *EN*, los cuales se describen más adelante.

Posteriormente se muestran las Curvas de Polarización Potenciodinámica para cada uno de los aceros inmersos en las soluciones de trabajo, estos se obtuvieron a partir de una polarización en el rango de potencial de ± 25 mV a una velocidad de barrido de 1 mV/s. Pruebas de polarización lineal también fueron obtenidas en el rango de potencial de ± 1 V a una velocidad de barrido de 1 mV/s. En base a estos gráficos o diagramas podemos determinar la eficiencia del inhibidor *EN*.

Finalmente, se muestran los gráficos de Nyquist (Z_{real} vs. Z_{imag}) correspondientes a la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) en el medio ácido (H_2SO_4) y con la adición de la mezcla ácido-inhibidor, acompañados con sus respectivos ajustes experimentales. Mientras que los diagramas de Bode ($\log |Z|$ vs. $\log \text{freq.}$ ángulo de fase vs. $\log \text{freq.}$) se relacionan con los resultados termodinámicos y constantes de tiempo, y así entender el comportamiento de inhibición a la corrosión en la interfase solución/acero. Cabe mencionar que, mediante estas técnicas empleadas, se obtuvieron resultados eficientes para las diferentes muestras de acero evaluados.

Para complementar este estudio, se muestra el registro metalográfico de los materiales metálicos después de las pruebas de corrosión, a 5X de magnificación, por último, se hace un análisis de los cupones normalizados de acero al carbono expuestos a la intemperie.

3.2.1. Evaluación Electroquímica del acero AISI 1018

La Figura 23 muestra el comportamiento del E_{corr} con respecto al tiempo de exposición (24 horas) del acero AISI 1018 en el medio ácido H_2SO_4 o con la adición del extracto de nopal (*EN*). Para la muestra en el medio ácido (prueba en blanco o referencia), el potencial de corrosión E_{corr} reveló una tendencia hacia valores más negativos como resultado de la activación de su superficie con el paso del tiempo. En cuanto a la prueba donde se agregó el inhibidor *EN* al medio ácido (mezcla ácido-inhibidor), se reportaron potenciales más negativos, lo que denota una mayor actividad superficial y a su vez está asociado con la adsorción física de las moléculas del extracto de nopal en la superficie del acero. En base a este comportamiento es posible confirmar que el acero AISI 1018 es vulnerable y propenso a corroerse por picaduras.

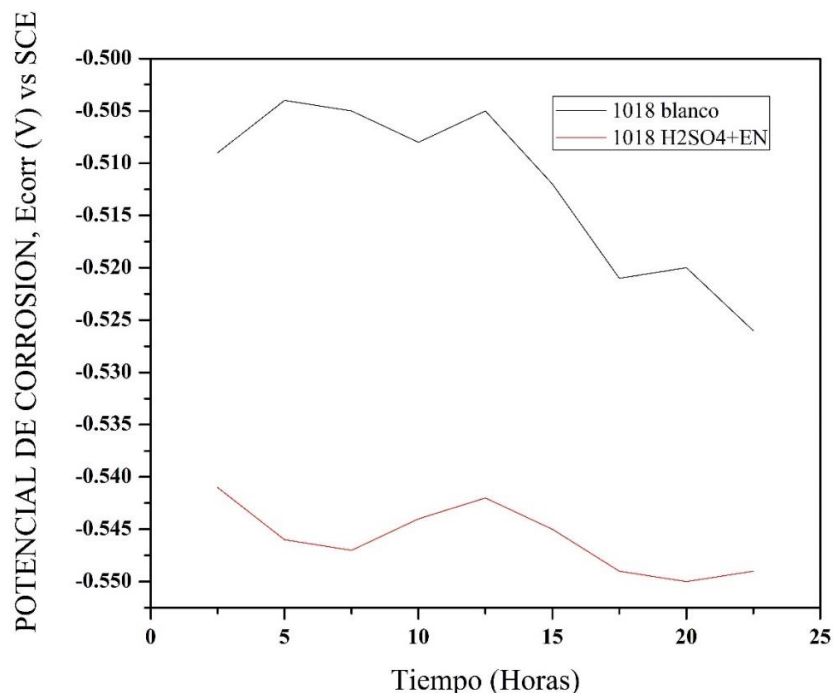


Figura 23. Comportamiento de potencial de corrosión (E_{corr}) vs tiempo de exposición. Acero al carbono AISI 1018 inmerso en la mezcla ácido-inhibidor a temperatura ambiente durante 24 horas.

Enseguida se muestran las curvas de polarización del acero AISI 1018 evaluadas a diferentes períodos de tiempo, hasta por 24 horas de exposición (ver Figura 24). Se observa que las curvas del acero expuesto al medio ácido, (prueba en blanco) presentaron valores de E_{corr} más positivos con respecto a la muestra donde se adicionó el inhibidor *EN*, ya que se observa un desplazamiento hacia una menor densidad de corriente i_{corr} para las muestras con extracto de nopal, lo que denota un comportamiento de inhibición de la corrosión del acero con la adición del *EN*. Las curvas de polarización promedio mostradas en la Figura 24, muestran efectivamente un menor i_{corr} así como un E_{corr} más negativo donde se adicionó el *EN*, es decir, que se tiene un comportamiento de inhibición de la muestra metálica, con respecto a la prueba en blanco. Cabe mencionar, que en base al comportamiento de las curvas donde se adiciono el *EN* es posible clasificar al inhibidor del tipo mixto, ya que el control de la reacción se efectúa sobre ambas reacciones electroquímicas (anódica y catódica). De la misma manera ocurre con las curvas de polarización lineal (Figura 25), ya que se observó un desplazamiento hacia bajas corrientes i_{corr} al adicionar el *EN*, es decir, el acero se corroe en menor proporción o velocidad, además el acero se vuelve más activo y se puede observar una ligera tendencia a pasivarse, seguido de una traspasivación, lo cual indica un mecanismo de corrosión uniforme sobre la superficie metálica al agregar el *EN*.

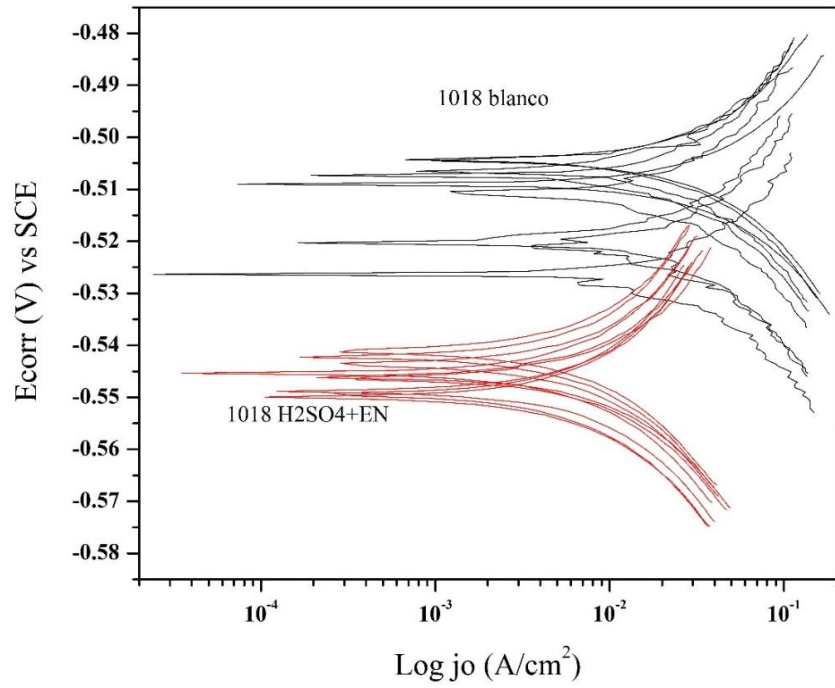


Figura 24. Curvas de polarización potenciodinámicas obtenidas con y sin presencia del agente inhibidor (EN) evaluando el acero AISI 1018.

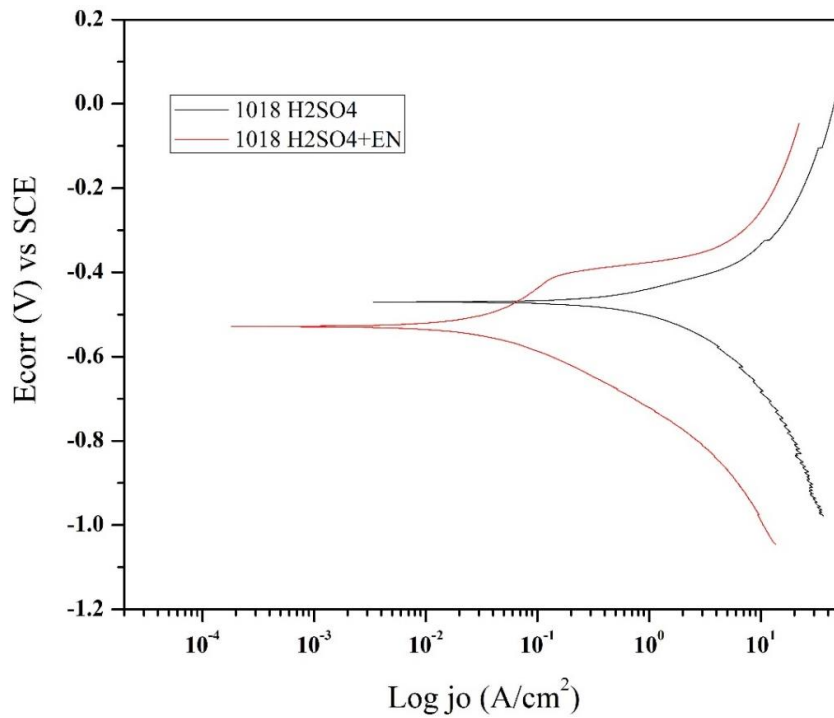


Figura 25. Curvas de polarización lineal con y sin presencia del agente inhibidor (EN) evaluando el acero AISI 1018.

Los gráficos de impedancia en la representación de Nyquist ilustrados en la Figura 26 muestran un incremento en el tamaño de los semicírculos, indicando un incremento de la resistencia a la transferencia de carga R_{tc} con la adición del EN, en comparación con las mediciones en el medio ácido H_2SO_4 , lo que está asociado a una reducción significativa de la velocidad de corrosión en función del tiempo de exposición.

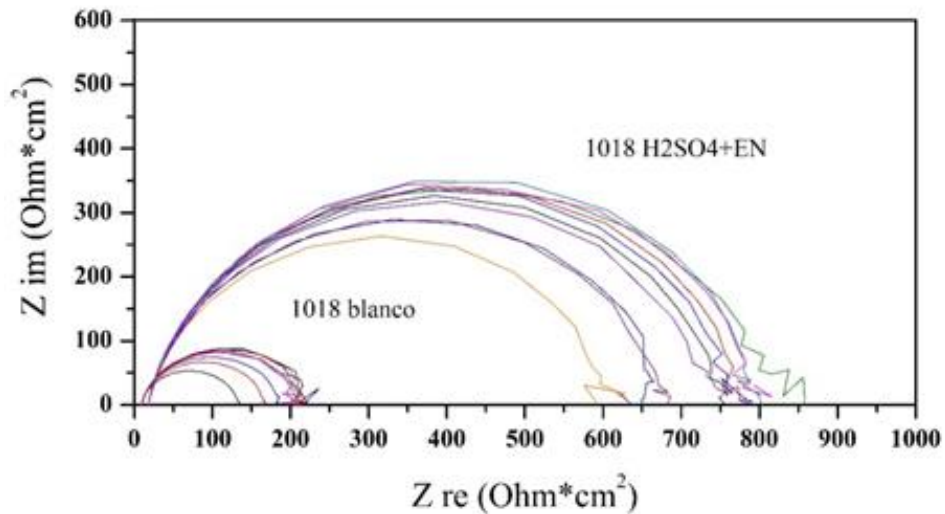


Figura 26. Gráficos de Nyquist para el acero AISI 1018 inmersas en las soluciones de trabajo durante 24 horas.

En la Figura 27 se muestra el comportamiento de los ajustes experimentales, en blanco y con la mezcla ácido-inhibidor, para el acero AISI 1018. En base a los diagramas de impedancia (Nyquist) que se presentaron anteriormente, tenemos que, estos deben ser relacionados con un circuito eléctrico equivalente RCA. Es por eso que se propuso el uso de un circuito eléctrico como el de “RANGLES”, ya que se adapta mucho mejor a las condiciones experimentales, debido a que la formación de este circuito da la forma de un semicírculo con respecto a los diagramas de impedancia (Nyquist), dada esta modulación se pueden obtener parámetros electroquímicos para poder conocer la habilidad a la protección a la corrosión o el comportamiento de la corrosión. Este circuito está compuesto por un elemento capacitivo C_{dl} (capacitancia de la doble capa electroquímica) conectado en paralelo a una resistencia que mide el paso de la corriente R_{tc} , (resistencia del transporte de carga) y estos a su vez conectados en serie a un resistor que indica el paso de los iones a través del electrolito R_{sol} (resistencia a la solución).

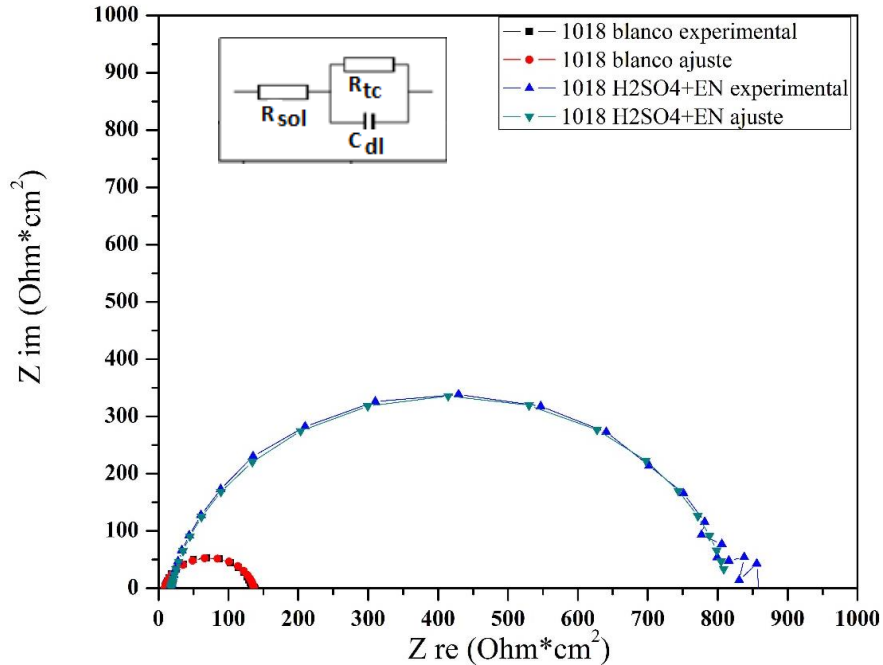


Figura 27. Ajuste, circuito de Randles, con y sin presencia del agente inhibidor del acero AISI 1018.

En la Figura 28 se muestran los diagramas de Bode, del blanco y con la mezcla ácido-inhibidor. Este diagrama es una representación equivalente, de los diagramas de Nyquist solo que en la forma del ángulo de fase vs \log frecuencia, y el $\log |Z|$ vs \log frecuencia. En este diagrama podemos observar un incremento del $\log |Z|$ en varios órdenes de magnitud, que es la magnitud de la resistencia a la transferencia de carga, con la adición del agente inhibidor, con respecto a la prueba en blanco. Además, se puede observar un desplazamiento de la constante de tiempo (curva del ángulo de fase vs. \log freq.) a bajas frecuencias con el inhibidor *EN*, y un aumento en el ángulo de fase en comparación con la prueba en blanco, debido a que hay una menor capacidad de intercambio iónico o transporte de electrones al adicionar el inhibidor. Finalmente, en la Tabla 5 se presentan los datos obtenidos del acero AISI 1018 en función del tiempo de exposición, donde se muestra un análisis comparativo de la resistencia a la transferencia de carga (R_{tc}) para las pruebas en blanco y con la mezcla ácido-inhibidor. Además, se calcula en la eficiencia de inhibición del extracto-liquido *EN*.

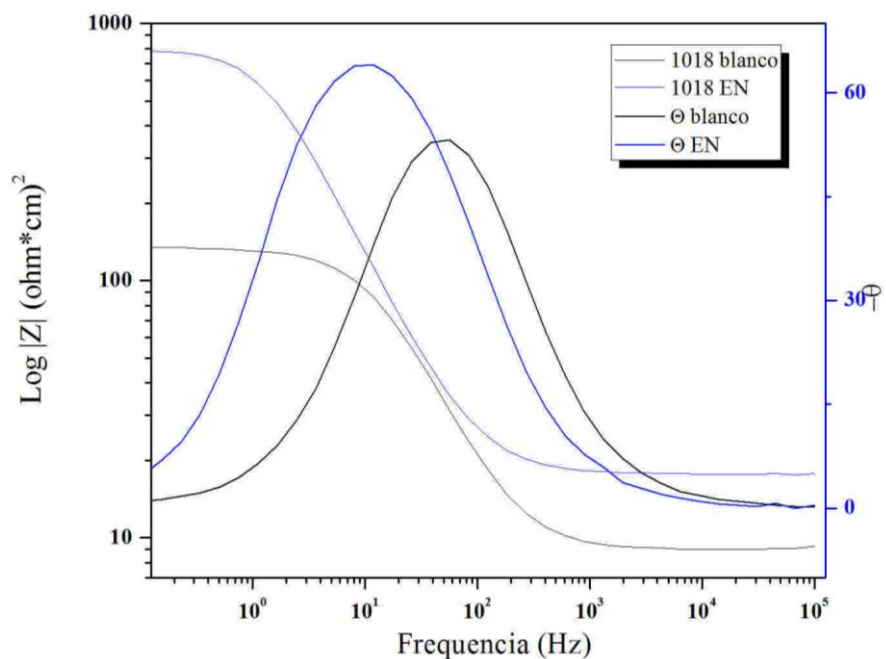


Figura 28. Diagrama de Bode-Fase con y sin presencia del agente inhibidor del acero AISI 1018.

Tabla 5. Parámetros termodinámicos y eficiencia de inhibición del nopal en Acero AISI 1018 a diferentes tiempos de exposición.

Tiempo (hora)	1/R _{tc} (ohm-cm ²) (blanco)	1/R _{tc} (ohm-cm ²) (inhibidor)	Θ	EI %
1.00	0.0063	0.0015	0.758	75.77
2.50	0.0063	0.0015	0.758	75.77
5.00	0.0057	0.0017	0.705	70.50
7.50	0.0050	0.0015	0.704	70.40
10.00	0.0050	0.0013	0.733	73.33
12.50	0.0048	0.0013	0.723	72.29
15.00	0.0047	0.0013	0.719	71.94
17.50	0.0048	0.0013	0.723	72.32
20.00	0.0050	0.0013	0.745	74.48
22.50	0.0080	0.0013	0.843	84.34

Se puede observar el grado de recubrimiento, presentando variación desde las 5h de inmersión, obteniendo así una eficiencia de inhibición del 75.77% desde la 1h de inmersión. Sin embargo, hasta las 22.5h se alcanzó una eficiencia de inhibición del 84.3%.

3.2.2 Evaluación electroquímica del acero AISI 1045

En la Figura 29 se muestra la variación del E_{corr} con respecto al tiempo de exposición del acero AISI 1045 en el medio ácido o con la adición del extracto de nopal (EN). Para la muestra en el medio ácido (prueba en blanco), el E_{corr} presentó de igual manera una tendencia hacia valores más negativos como resultado de la activación de su superficie con el paso del tiempo. En cuanto a la prueba donde se agregó el inhibidor EN al medio ácido (mezcla ácido-inhibidor), se reportaron potenciales mucho más negativos, como una mayor actividad superficial, lo cual está asociado con la adsorción física de las moléculas del extracto de nopal en la superficie del acero. De esta manera podemos estimar que la susceptibilidad del acero a corroerse es de manera natural en el medio ácido H_2SO_4 de acuerdo a la termodinámica.

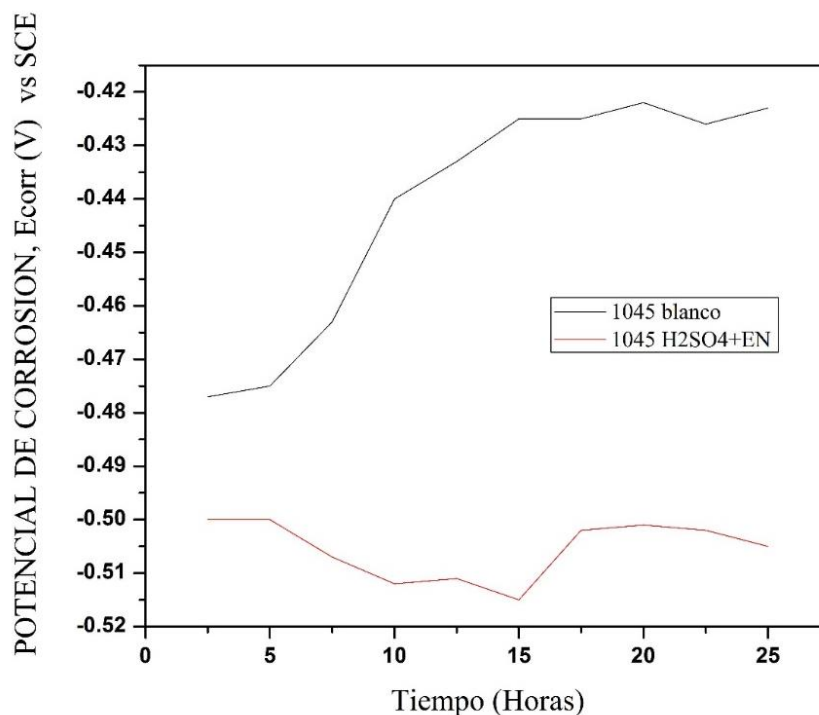


Figura 29. Comportamiento de potencial de corrosión (E_{corr}) vs tiempo de exposición. Acero al carbono AISI 1045 inmerso en la mezcla ácido-inhibidor a temperatura ambiente durante 24 horas.

A continuación, se muestran las curvas de polarización potenciodinámica del acero AISI 1045 a diferentes períodos de exposición hasta por 24 horas, ver Figura 30. Se puede observar que las curvas del acero AISI 1045 expuesto al medio ácido (prueba en blanco), presentaron potenciales de corrosión más positivos con respecto a la muestra donde se le adicionó el inhibidor *EN* ya que se observa un desplazamiento hacia una menor densidad de corriente i_{corr} para las muestras con el extracto de nopal, lo que denota un comportamiento de inhibición de la corrosión con la adición del *EN*.

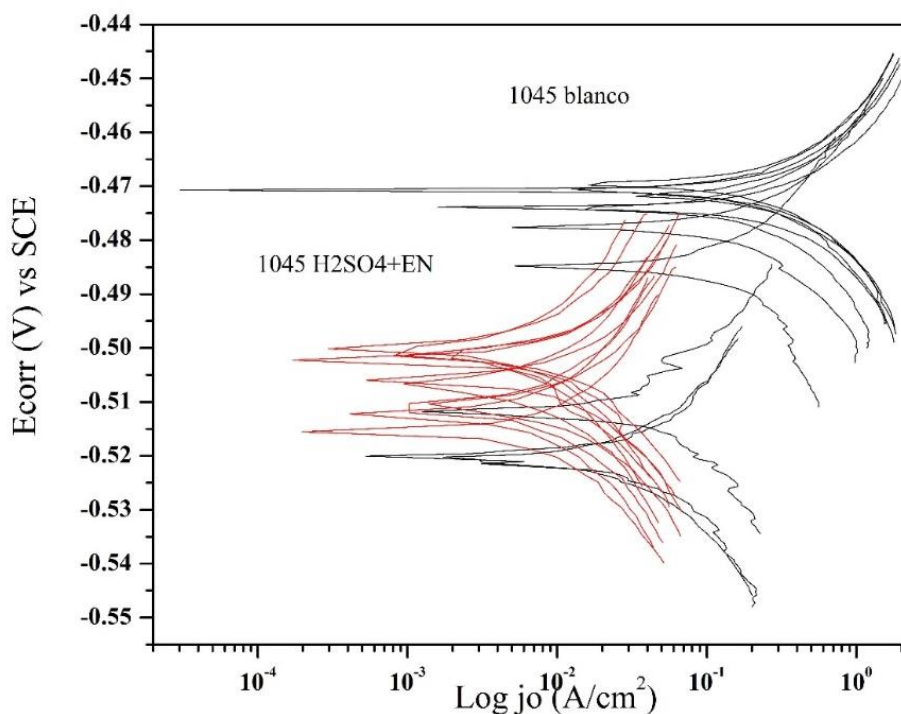


Figura 30. Curvas de polarización potenciodinámicas obtenidas con y sin presencia del agente inhibidor (*EN*) evaluando el acero AISI 1045.

En general, las curvas de polarización de la Figura 30, muestran efectivamente una disminución del i_{corr} así como un E_{corr} más negativo para el caso donde se agrega la sustancia *EN*, es decir que existe un comportamiento de inhibición de la muestra metálica, con respecto a la prueba en blanco. En base a este comportamiento podemos deducir que el inhibidor *EN* es del tipo mixto, ya que es capaz de tener el control de las reacciones que se llevan a cabo sobre la interfase del metal, sean del tipo anódica o catódica).

De la misma manera ocurre con las curvas de polarización lineal (Figura 31), ya que se obtuvo un desplazamiento hacia el lado izquierdo (bajas corrientes) al adicionar el *EN* con respecto a la prueba en blanco, es decir, que el material metálico se corroe en menor proporción (bajas corrientes, menor corrosión-altas corrientes, mayor corrosión). Además, el acero se vuelve más activo y de igual forma se puede observar una ligera tendencia a pasivarse, seguido de una traspasivación, lo cual indica un mecanismo de corrosión uniforme sobre la superficie metálica al agregar el *EN* líquido.

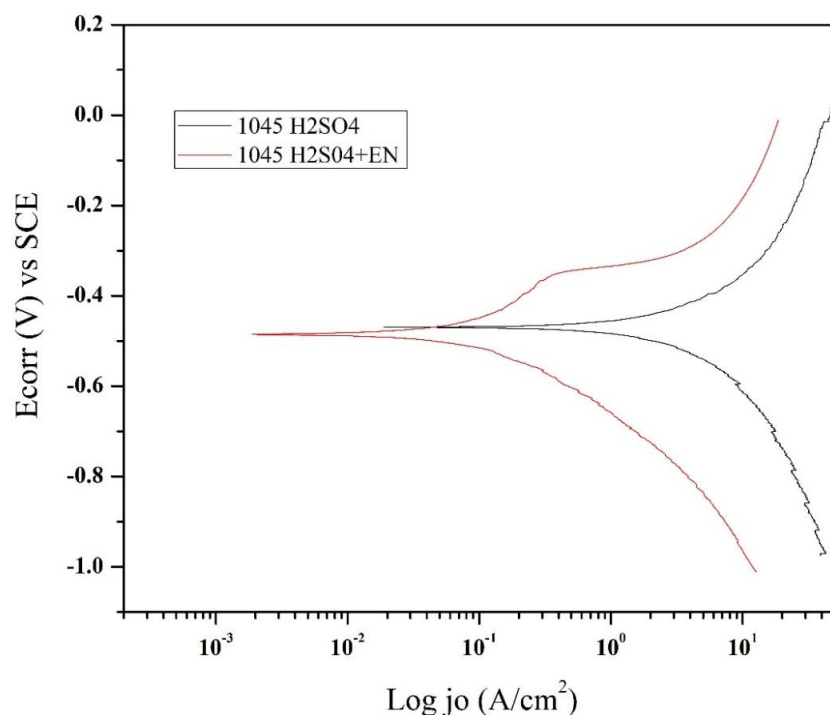


Figura 31. Curvas de polarización lineal con y sin presencia del agente inhibidor (*EN*) evaluando el acero AISI 1045.

Po otro lado, los gráficos de impedancia (diagramas de Nyquist) se ilustran en la Figura 32, donde se observa un incremento en el tamaño de los semicírculos, esto es asociado a un aumento en la resistencia a la transferencia de carga con la adición del inhibidor *EN*, en comparación con las mediciones en el medio ácido. Esto indica que el extracto líquido *EN* reduce la velocidad de corrosión del acero durante el tiempo de exposición evaluado.

En la Figura 33 se muestra el comportamiento del ajuste de los datos experimentales al circuito equivalente de Randles, para el blanco o con la mezcla ácido-inhibidor para el acero AISI 1045 expuesto por 24 horas. En base a los diagramas Nyquist de la Figura 32, se relacionaron con el circuito eléctrico, para determinar los parámetros electroquímicos y cinéticos, para evaluar la habilidad a la

protección a la corrosión del extracto *EN* o determinar el comportamiento de la corrosión en el acero AISI 1045.

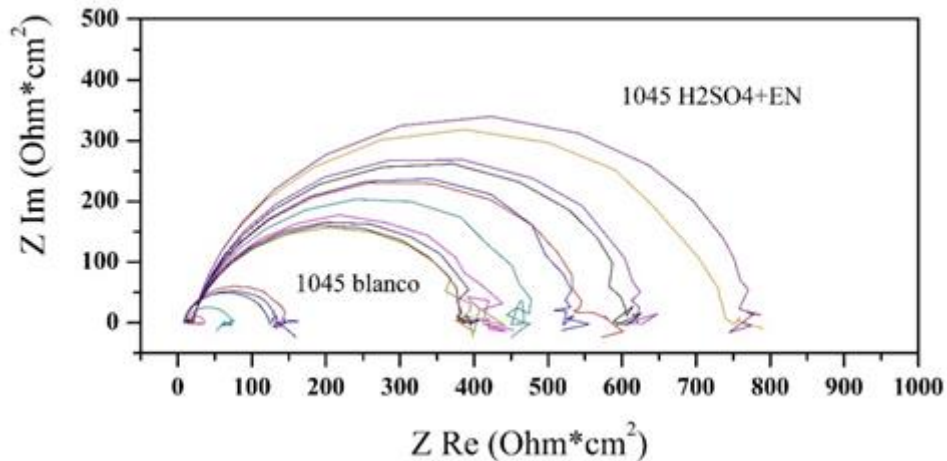


Figura 32. Gráfico de Nyquist para el acero AISI 1045 inmerso en las soluciones de trabajo durante 24 horas.

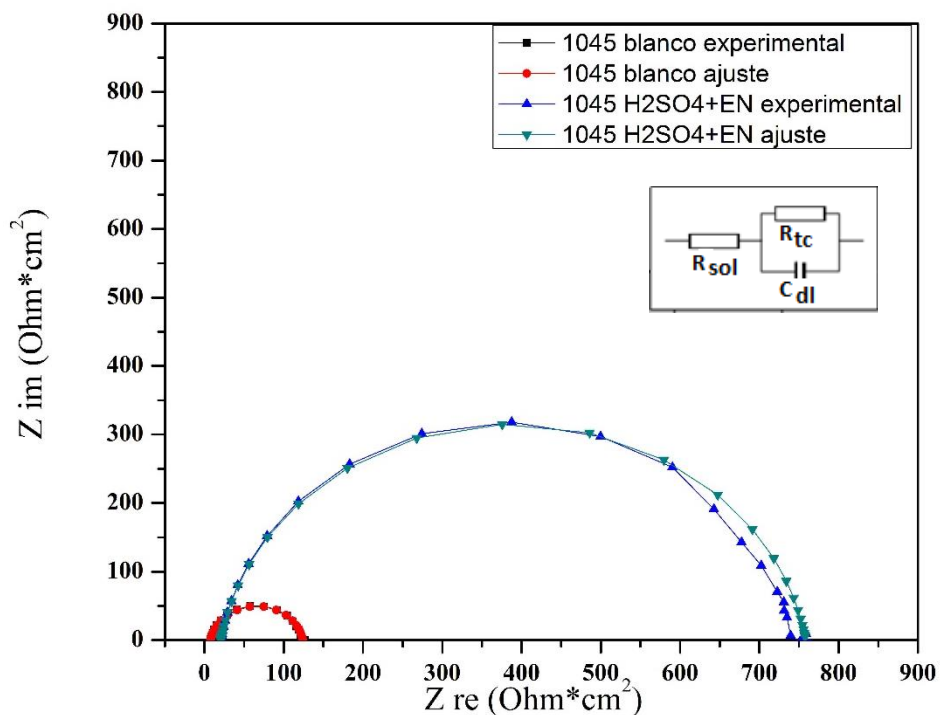


Figura 33. Ajuste, circuito de Randles, con y sin presencia del agente inhibidor del acero AISI 1045.

Mientras que, la Figura 34 muestra los diagramas de Bode-Fase, para blanco o con la mezcla ácido-inhibidor *EN*. Se puede observar una similitud de los diagramas de impedancia (Nyquist) solo que, en el modo de la fase, es posible evaluar las diferentes constantes de tiempo y la variación del ángulo de fase entre la corriente *I* y el voltaje *V*. Cabe mencionar, que se registró un incremento del valor absoluto de la impedancia $|Z|$ que se asocia a la resistencia a la transferencia de carga, este aumenta en presencia del extracto-líquido *EN*, en comparación al material de referencia. Además, se nota claramente un desplazamiento de la curva (constante de tiempo) a bajas frecuencias con la presencia del inhibidor *EN*, con respecto a la prueba en blanco, pero en el mismo ángulo de fase. Esto está asociado a una menor capacidad de carga iónica en la interfaz del acero, o menor transferencia de electrones del medio acuoso, ácido H_2SO_4 + extracto-líquido *EN*.

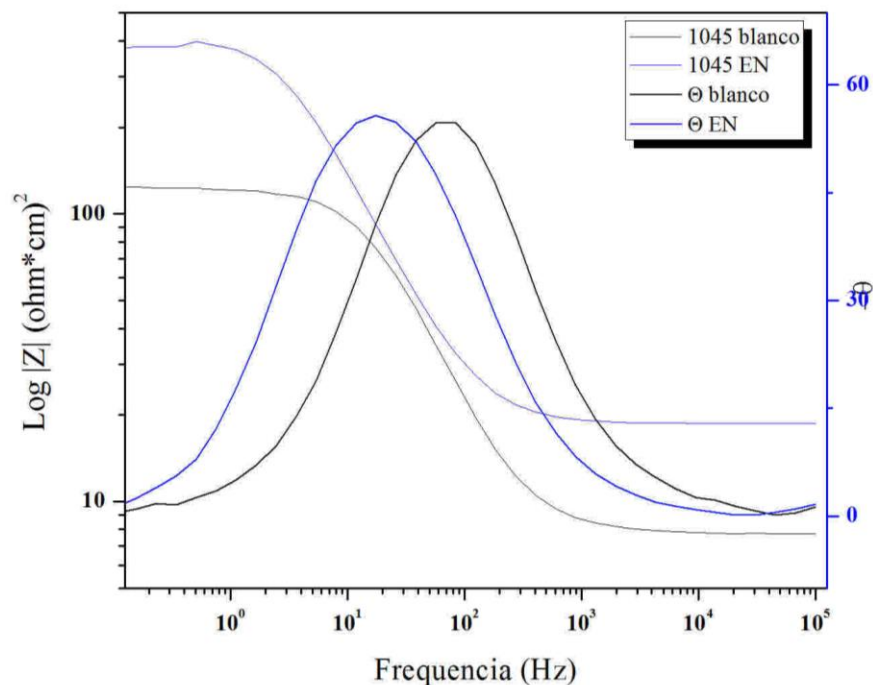


Figura 34. Diagrama de Bode-Fase con y sin presencia del agente inhibidor del acero AISI 1045.

Los datos obtenidos se representan en la Tabla 6, donde se muestra una evaluación comparativa de la resistencia a la transferencia de carga (R_{tc}) del acero AISI 1045 expuesto en ácido (pruebas en blanco) o para la mezcla ácido-inhibidor. Además, se presenta el porcentaje de la eficiencia de inhibición del extracto-líquido *EN*.

Tabla 6. Parámetros termodinámicos y eficiencia de inhibición del nopal en acero AISI 1045 a diferentes tiempos de exposición.

Tiempo (hora)	1/R_{tc} (ohm-cm²) (blanco)	1/R_{tc} (ohm-cm²) (inhibidor)	Θ	EI %
1.00	0.0085	0.0013	0.847	84.70
2.50	0.0071	0.0015	0.788	78.87
5.00	0.0066	0.0014	0.787	78.78
7.50	0.0125	0.0015	0.88	88.00
10.00	0.0386	0.0018	0.953	95.33
12.50	0.0634	0.0022	0.965	96.52
15.00	0.1111	0.0023	0.979	97.92
17.50	0.1470	0.0026	0.982	98.23
20.00	0.1782	0.0026	0.985	98.54
22.50	0.2020	0.0025	0.987	98.76

Además, se muestra el grado de cobertura del recubrimiento, el cual presentó una variación desde las 2.5h de inmersión obteniendo así una eficiencia de inhibición del 84.7%, sin embargo, hasta las 22.5h alcanzó eficiencias de inhibición cercanas a 98.76%.

3.2.3 Evaluación electroquímica del acero AISI 4140

El gráfico del E_{corr} con respecto al tiempo de inmersión del acero AISI 4140 en el medio ácido o con la adición del inhibidor *EN* se muestra en la Figura 35. La muestra de referencia (en medio ácido) presentó un comportamiento del E_{corr} con tendencia hacia valores negativos como resultado de la activación superficial a medida que incrementa el tiempo de exposición, indicando una susceptibilidad a la corrosión por picaduras del acero expuesto al ácido sulfúrico. Mientras que con la adición del extracto *EN* al medio ácido (mezcla ácido-inhibidor), se reportaron potenciales mucho más negativos, lo que denota una mayor actividad superficial, lo cual está asociado al mecanismo de la adsorción de las moléculas del extracto de nopal en la superficie del acero.

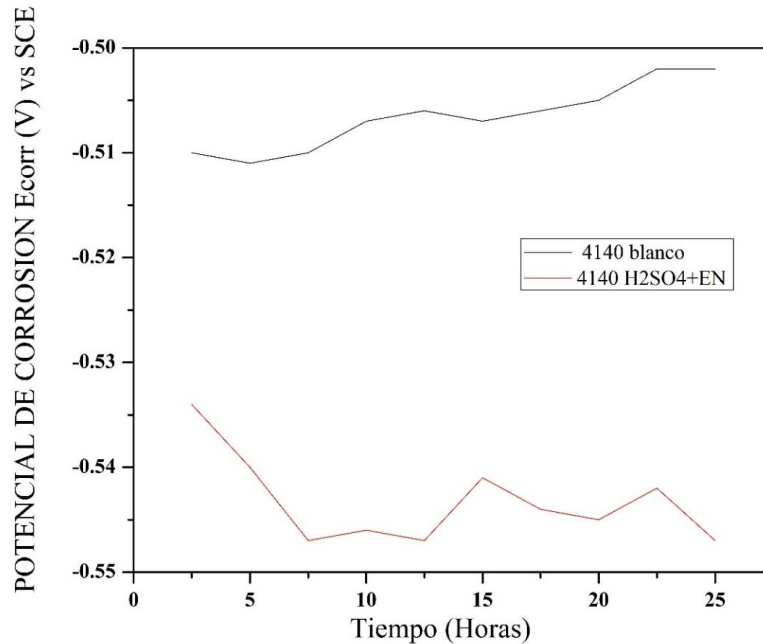


Figura 35. Comportamiento de potencial de corrosión (E_{corr}) vs tiempo de exposición. Acero al carbono AISI 4140 inmerso en la mezcla ácido-inhibidor a temperatura ambiente durante 24 horas.

Por otro lado, en la Figura 36 se muestran las curvas de polarización del acero AISI 4140 a diferentes períodos de tiempo hasta por 24 horas de exposición. Se puede notar que las curvas del acero expuesto al medio ácido (prueba en blanco), presentaron potenciales de corrosión más positivos con respecto a la muestra donde se le adicionó el extracto *EN*, ya que en estas se observa un desplazamiento hacia una menor densidad de corriente para las muestras con *EN*, lo que denota un comportamiento de inhibición de la corrosión con la adición del *EN*. Las curvas de polarización mostradas en la Figura 36, en promedio indican menores valores del i_{corr} así como un E_{corr} más negativo para el caso donde se adicionó el extracto *EN*, es decir que se tiene comportamiento de inhibición sobre la muestra metálica, con respecto a la prueba en blanco. Cabe señalar que en base al comportamiento de las curvas donde se adicionó el extracto *EN*, podemos determinar que el inhibidor es del tipo mixto, ya que tiene control de la reacción anódica y catódica. De la misma manera ocurre con las curvas de polarización lineal (Figura 37), ya que se observó un desplazamiento hacia bajas corrientes al adicionar el inhibidor *EN* con respecto a la prueba en blanco, es decir, que el acero AISI 4140 se corroe en menor proporción, además el material se vuelve más activo y se puede observar una tendencia a pasivarse, lo cual indica un mecanismo de corrosión uniforme sobre la superficie metálica al agregar el inhibidor *EN*.

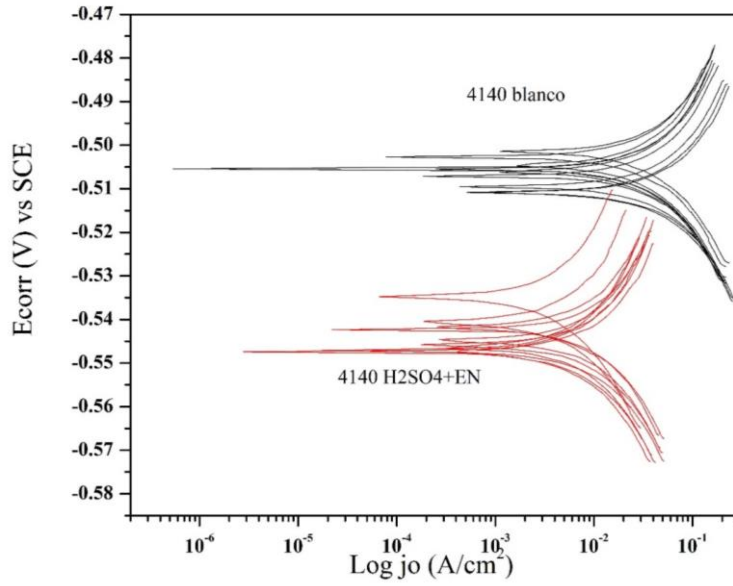


Figura 36. Curvas de polarización potenciodinámicas obtenidas con y sin presencia del agente inhibidor (EN) evaluando el acero AISI 4140.

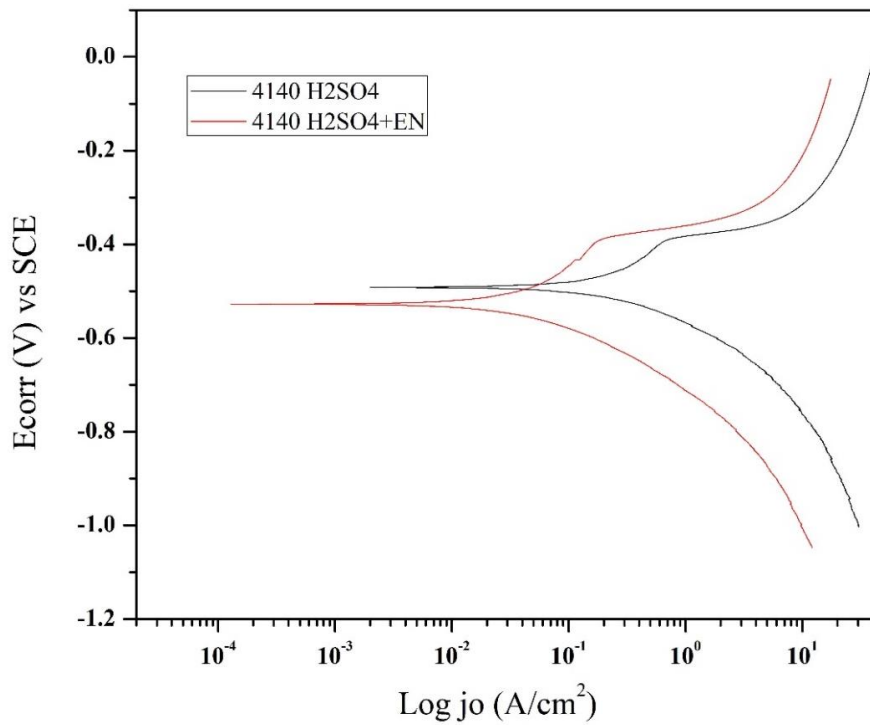


Figura 37. Curvas de polarización lineal con y sin presencia del agente inhibidor (EN) evaluando el acero AISI 4140

Los gráficos de impedancia (Nyquist) mostrados en la Figura 38 muestran un aumento del diámetro de los semicírculos, lo que se asocia a un incremento en la resistencia a la transferencia de carga a medida que se adiciona el extracto-inhibidor *EN*, en comparación con las mediciones únicamente en ácido sulfúrico. De la misma manera, está asociado a la reducción de la velocidad de corrosión en función del tiempo de exposición.

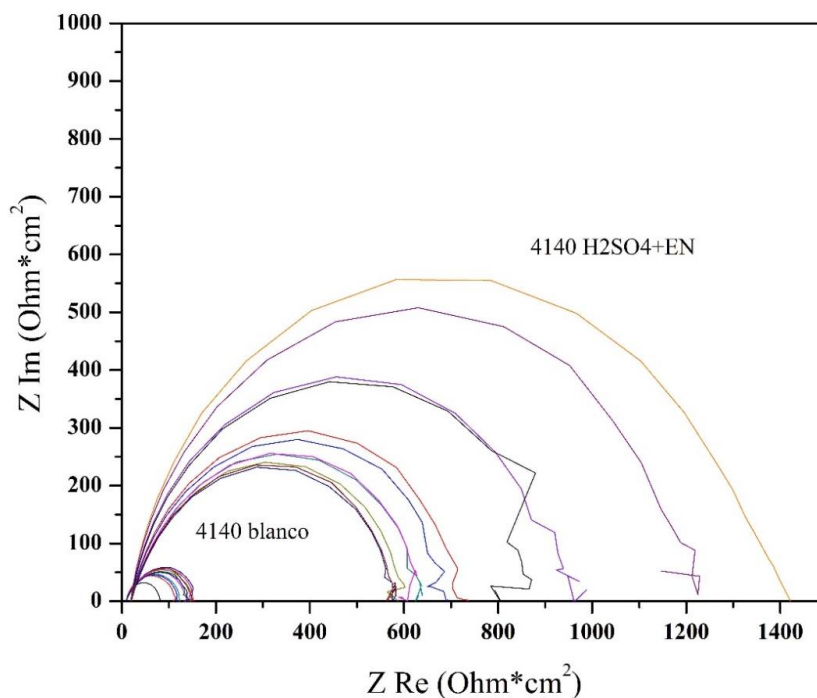


Figura 38. Gráfico de Nyquist para el acero AISI 4140 inmerso en las soluciones de trabajo durante 24 horas.

En la Figura 39 se muestra el comportamiento de los ajustes de los datos experimentales con un circuito eléctrico, para el caso del acero en blanco (solo ácido) y para la mezcla ácido-inhibidor del acero AISI 4140. En base a este tipo de gráfico podemos obtener parámetros electroquímicos y de esta manera evaluar la efectividad del extracto *EN* en la protección a la corrosión.

Además, en la Figura 40 se muestra otra representación de los diagramas de impedancia, que son los diagramas de Bode, para el blanco y para la mezcla ácido-inhibidor. Se puede notar un incremento de la magnitud del valor absoluto de la impedancia $|Z|$ con el agente inhibidor, el cual se relaciona a la resistencia a la transferencia de carga. Además, ocurre un desplazamiento de la curva (constante de tiempo) a bajas frecuencias y un aumento en el ángulo de fase en presencia del inhibidor *EN*, esto indica que se tiene una menor capacidad de intercambio iónico.

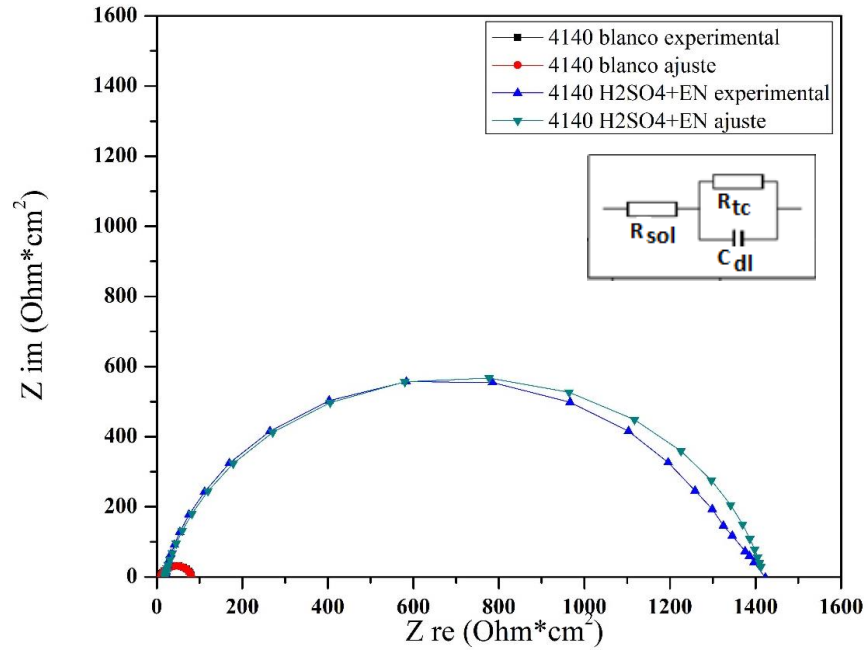


Figura 39. Ajuste, circuito de Randles, con y sin presencia del agente inhibidor del acero AISI 4140.

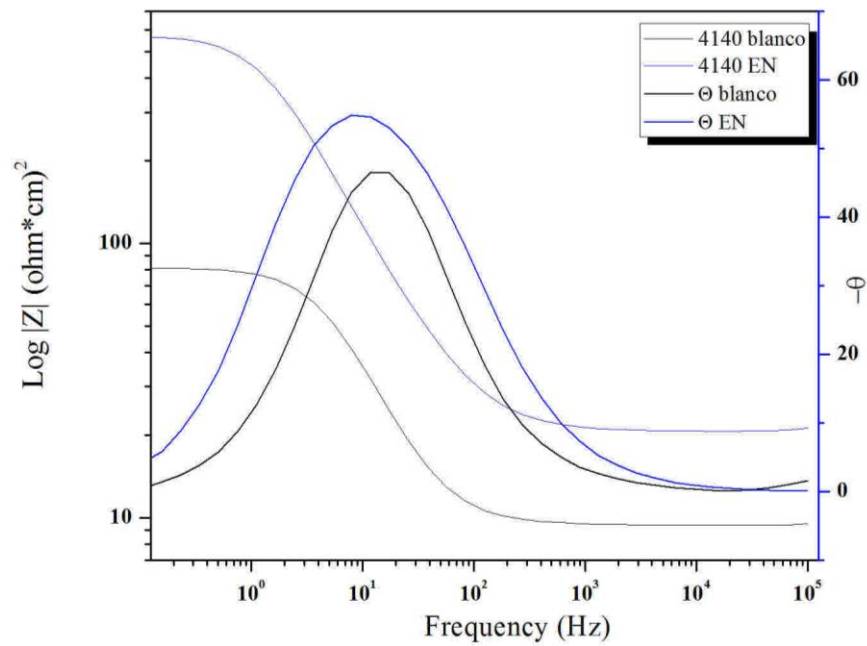


Figura 40. Diagrama de Bode-Fase con y sin presencia del agente inhibidor del acero AISI 4140.

Por último en la Tabla 7, se muestran los datos obtenidos del análisis de los diagramas de impedancia para el acero AISI 4140, en base a la función del tiempo de exposición, donde se muestra una comparación del valor de la resistencia a la transferencia de carga (R_{tc}) para las pruebas en blanco o con la mezcla ácido-inhibidor. Además se calcula el porcentaje de la eficiencia de inhibición.

Tabla 7. Parámetros termodinámicos y eficiencia de inhibición del nopal en acero AISI 4140 a diferentes tiempos de exposición.

Tiempo (hora)	1/R_{tc} (ohm-cm²) (blanco)	1/R_{tc} (ohm-cm²) (inhibidor)	Θ	EI %
1.00	0.0139	0.0007	0.949	94.96
2.50	0.0105	0.0008	0.923	92.38
5.00	0.0093	0.0009	.903	90.32
7.50	0.0090	0.0012	.866	86.66
10.00	0.0082	0.0014	0.829	82.92
12.50	0.0079	0.0014	0.822	82.27
15.00	0.0067	0.0015	0.776	77.61
17.50	0.0067	0.0016	0.761	76.11
20.00	0.0071	0.0017	0.760	76.05
22.50	0.0067	0.0017	0.746	74.62

Se observa que el grado de recubrimiento, el cual presentó variación desde las 2.5h de inmersión, obteniendo así, una eficiencia de inhibición del 94.9%, sin embargo, la eficiencia de inhibición fue disminuyendo con el paso del tiempo, hasta llegar a valores de eficiencia del 74.6%.

En la Tabla 8 que a continuación se muestra, se representan de forma general los resultados de las técnicas electroquímicas empleadas, como Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS), y Resistencia a la Polarización (LP), para los diferentes aceros evaluados en el medio ácido y para la mezcla ácido-inhibidor. Podemos decir que, para la técnica de Resistencia a la Polarización LP , hay una disminución de la corriente de corrosión (i_{corr}) en cuanto se adiciona el agente inhibidor con respecto a la prueba en blanco para los tres aceros evaluados. Así como un incremento del potencial de corrosión (E_{corr}) y de la resistencia a la polarización (R_p) con la adición del agente inhibidor para los tres aceros evaluados.

En cuanto a la técnica de EIS, tenemos que existe un incremento de la resistencia a la transferencia de carga (R_{tc}) en cuanto a la adición del inhibidor, como resultado de una disminución de la velocidad de corrosión (V_{corr}), además de que existe una menor capacidad de intercambio de electrones, una vez que se adicionó el inhibidor.

Tabla 8. Resultados de las técnicas electroquímicas de los aceros evaluados.

Acero	Medio	LP				EIS		
		i_{corr} (A/cm ²)	E_{corr} vs SCE (V)	R_p (Ohm · cm ²)	V_{corr} i (mm · año)	V_{corr} f (mm · año)	R_{tc} (Ohm · cm ²)	C_{dl} μF/cm ²
1018	H ₂ SO ₄	2.92E-05	-0.511	268.182	0.217	10.449	187.538	179.36
	50% H ₂ SO ₄ +50% EN	7.85E-06	-0.545	1015.013	0.5758	0.2038	717.162	155.96
4140	H ₂ SO ₄	4.74E-05	-0.506	179.379	0.2096	3.2589	121.76	1202.42
	50% H ₂ SO ₄ +50% EN	7.71E-06	-0.543	1085.28	0.6851	0.2342	815.98	185.14
1045	H ₂ SO ₄	3.34E-04	-0.439	64.865	4.4026	19.9101	50.78	492.49
	50% H ₂ SO ₄ +50% EN	1.15E-05	-0.505	729.44	0.1247	0.5310	514.16	120.41

En base a las eficiencias de inhibición obtenidas de los diferentes aceros evaluados contra el tiempo de exposición, se construyó un gráfico representativo, ilustrado en la Figura 41. Donde cabe mencionar que el extracto de nopal *EN* presentó eficiencias por encima del 70%, alcanzando una eficiencia de inhibición del 98% en el caso del acero AISI 1045. Mientras que para el acero AISI 4140, la eficiencia de inhibición va disminuyendo con respecto al tiempo, comenzando con una eficiencia del 95% hasta llegar a valores del 74% de eficiencia. Por último, el acero AISI 1018 alcanzó valores del 84% de la eficiencia de inhibición con respecto al tiempo.

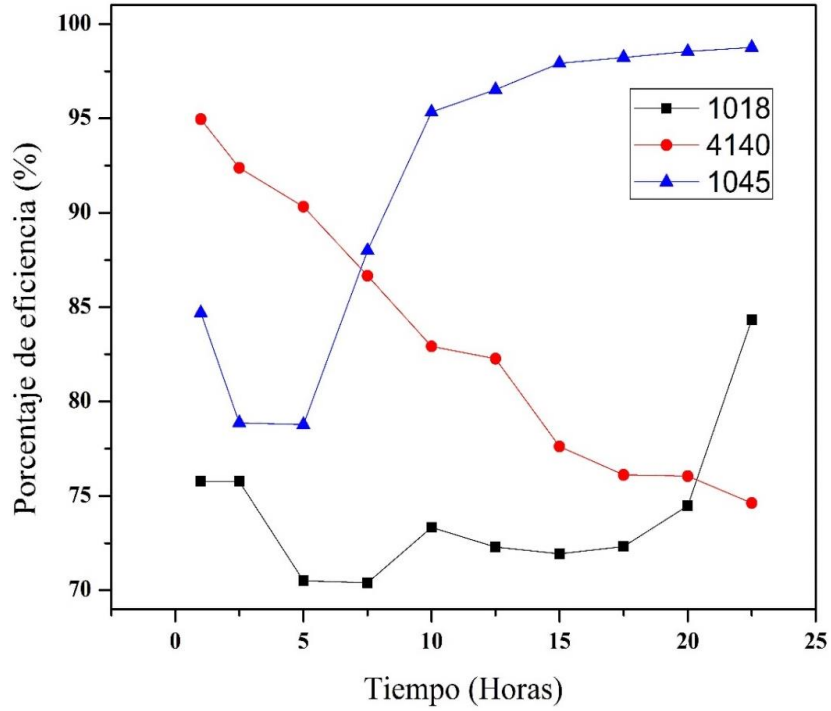


Figura 41. Gráfico de porcentaje de la eficiencia de inhibición (*EI*) para el extracto-liquido de nopal *EN*.

3.3 Microscopia óptica

Acero AISI 1018

En la Figura 42(a) y (b) se muestran las fotografías tomadas con el microscopio (LEICA modelo EZ4D) estereoscópico para el acero AISI 1018 después de ser expuestas en los medios de trabajo. a) 1018 en H_2SO_4 . b) 1018 en 50% H_2SO_4 + 50% *EN*.

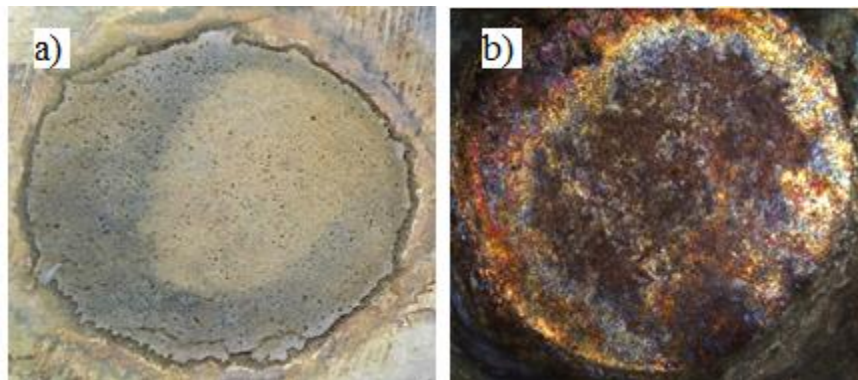


Figura 42. Fotografías, acero AISI 1018. a) 1018 en H_2SO_4 . b) 1018 en 50% H_2SO_4 + 50% *EN*.

Mientras que, en la Figura 43(c) y (d) se muestran las micrografías del acero AISI 1018 después de ser expuestas a las soluciones de trabajo a un aumento de 50X. c) 1018 en H_2SO_4 y d) 1018 50% H_2SO_4 + 50% *EN*. Así como las micrografías que fueron tomadas con Microscopio óptico Nikon Epip Hot 200.

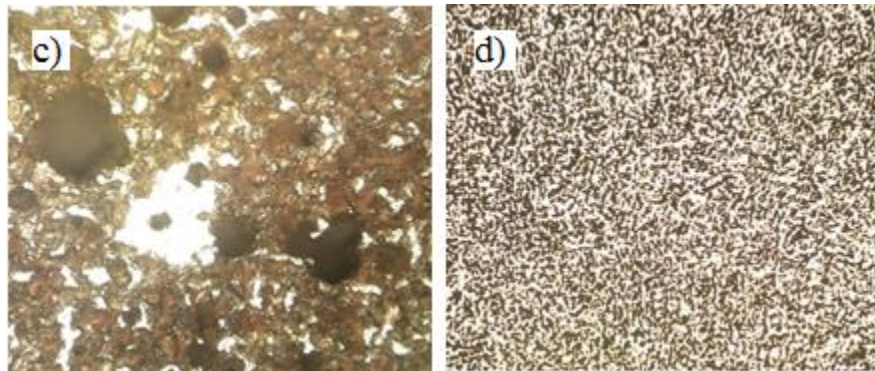


Figura 43. Micrografías (50X), acero AISI 1018. c) 1018 en H_2SO_4 . d) 1018 50% H_2SO_4 + 50% *EN*.

Acero AISI 4140

En la Figura 44(a) y (b) se muestran las fotografías del acero AISI 4140 al ser expuestas en los medios de trabajo. a) 4140 en H_2SO_4 . b) 4140 en 50% H_2SO_4 + 50% *EN*. Tomadas con el microscopio estereoscópico LEICA modelo EZ4D.

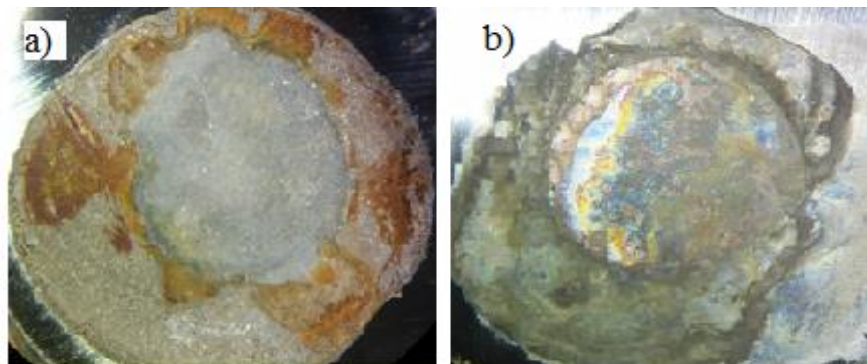


Figura 44. Fotografías, acero AISI 4140. a) 4140 en H_2SO_4 . b) 4140 en 50% H_2SO_4 + 50% *EN*.

En la figura 45(c) y (d) se muestran las micrografías del acero AISI 4140 después de ser expuestas en las soluciones de trabajo a un aumento de 50X. c) 4140 en H_2SO_4 y d) 4140 50% H_2SO_4 + 50% *EN*. Tomadas con el microscopio óptico Nikon Epip Hot 200.

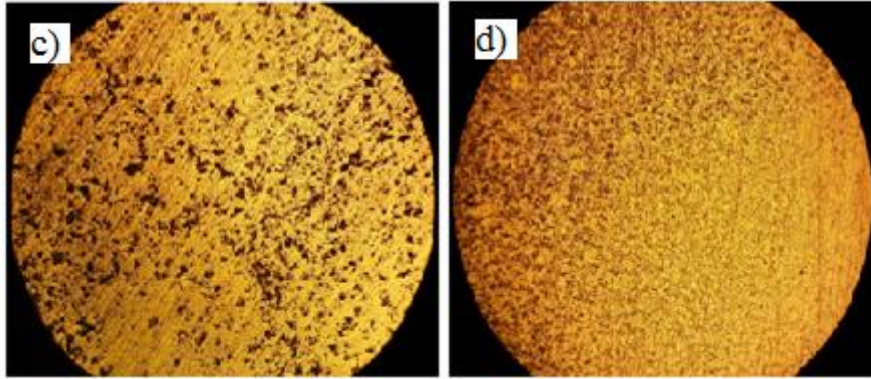


Figura 45. Micrografías (50X), acero AISI 4140. c) 4140 en H_2SO_4 . d) 4140 50% H_2SO_4 + 50% *EN*.

Acero AISI 1045

En la Figura 46(a) y (b) se muestran las fotografías del acero AISI 1045 al ser expuestas en los medios de trabajo. a) 1045 en H_2SO_4 . b) 1045 en 50% H_2SO_4 + 50% *EN*. Tomadas con el microscopio estereoscópico LEICA modelo EZ4D.

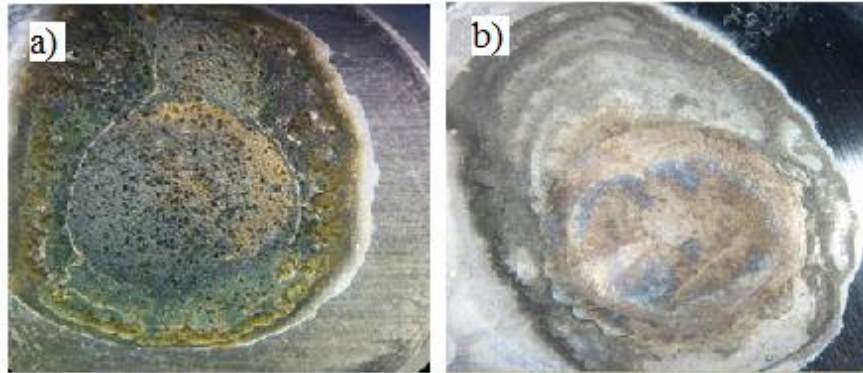


Figura 46. Fotografías, acero AISI 1045. a) 1045 en H_2SO_4 . b) 1045 en 50% H_2SO_4 + 50% *EN*.

En la Figura 47(c) y (d) se muestran las micrografías del acero AISI 1045 después de ser expuestas en las soluciones de trabajo a un aumento de 50X. c) 1045 en H_2SO_4 y d) 1045 50% H_2SO_4 + 50% *EN*. Tomadas con el microscopio óptico Nikon Epip Hot 200.

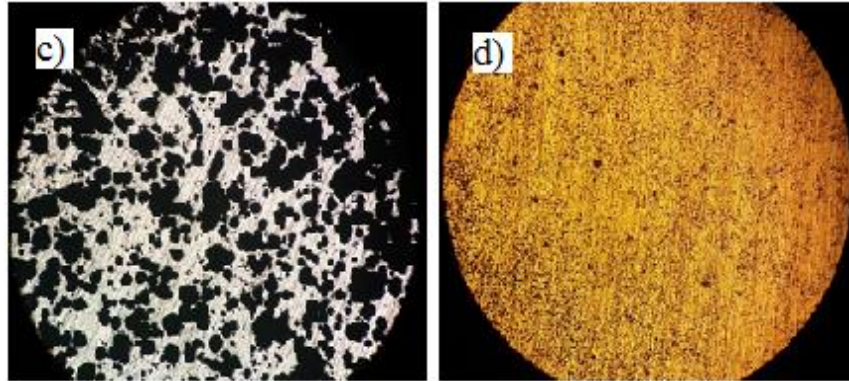


Figura 47. Micrografías (50X), acero AISI 1045. c) 1045 en H_2SO_4 . d) 1045 50% H_2SO_4 + 50% *EN*.

3.4 Evaluación de cupones normalizados de acero al carbono expuestos a la intemperie

Preparación de los cupones normalizados de acero al carbono

Se realizó un pulido sobre la superficie de los cupones normalizados de acero al carbono (Figura 48). Se empleó una pulidora de la marca Dewalt modelo D26441, ocupando hojas de carburo de silicio del número 80, 100, 240, 320, 400, 600, 1000, 1500, 2500 para retirar imperfecciones sobre ellas. Se lavaron con agua destilada y se desengrasaron con acetona (Figura 49). Y se registró el peso de cada una de ellas.



Figura 48. Preparación de cupones normalizados de acero al carbono.



Figura 49. Pulido de cupones normalizados de acero al carbono.

Inmersión y secado de los cupones normalizados en EN

Posteriormente a la preparación de los cupones normalizados, estos se sumergieron en extracto-líquido EN. Dichos cupones se sumergieron en un lapso de una hora con agitación/movimiento con ayuda de un mezclador Cole Palmer (laboratory mixer) No. 4554-14 de 3-250/50-5000 R.P.M. (Figura 50). Posteriormente a la inmersión de los cupones, se retiraron del recipiente para dejarlos reposar, permitiendo el secado de estos a temperatura ambiente durante 1 hora aproximadamente.

Registro del peso de los cupones normalizados de acero al carbono

Posteriormente a la inmersión y secado de los cupones normalizados en el EN estos fueron pesados en una balanza analítica Adventure Pro®. El peso de los cupones normalizados después de la inmersión y secado se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Peso de los cupones normalizados posterior a la inmersión y secado.

Placa Testigo	Placa con EN
92.0385 gr.	92.7490 gr.

Una vez concluido el tiempo de exposición, se realizó un análisis comparativo entre ambos cupones normalizados, con respecto a su peso después del tiempo de exposición al ambiente corrosivo.

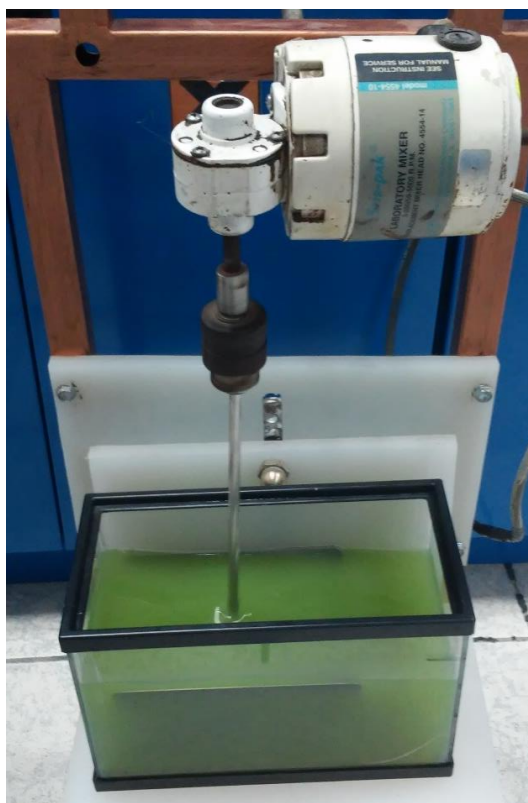
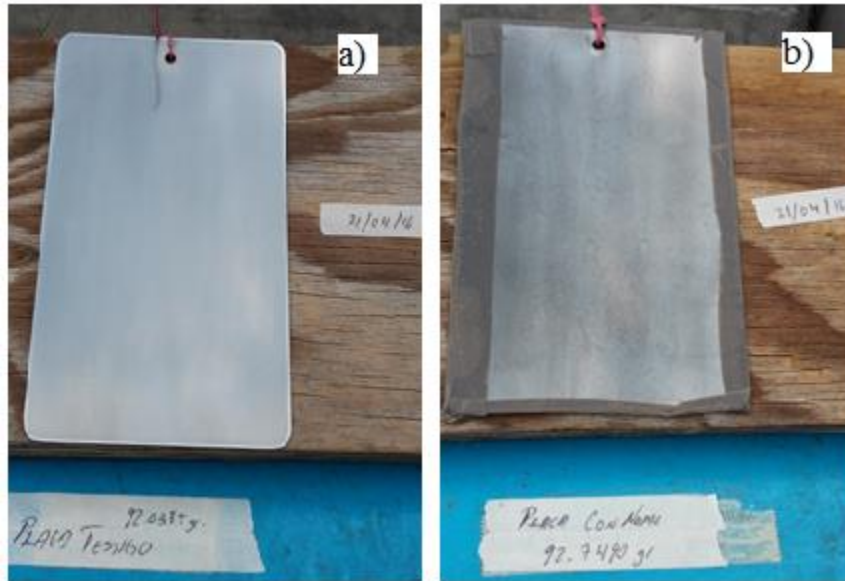


Figura 50. Inmersión de los cupones normalizados en (EN)

Exposición al ambiente de los cupones normalizados

Los cupones normalizados se colocaron en una superficie inclinada a la intemperie, asegurándolos de manera adecuada. A partir de ese instante se dejaron expuestos en un espacio dentro del CIDETEQ (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica) al clima y ambiente del Estado de Querétaro para terminar la exposición en un periodo de 12 días. En las Figuras 51-58 se muestran las fotografías de los cupones (primer día de exposición), dichas fotografías se tomaron día con día. Se colocaron dos cupones normalizados, uno de ellos fue colocado después del pulido, es decir, no se impregno con *EN* (placa testigo) ilustrado en las Figuras 51(a) contrario a la otra ilustración, Figura 51(b) (inmersa con *EN*).



Figuras 51. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) Placa con *EN*. Primer día de exposición. 21/04/16

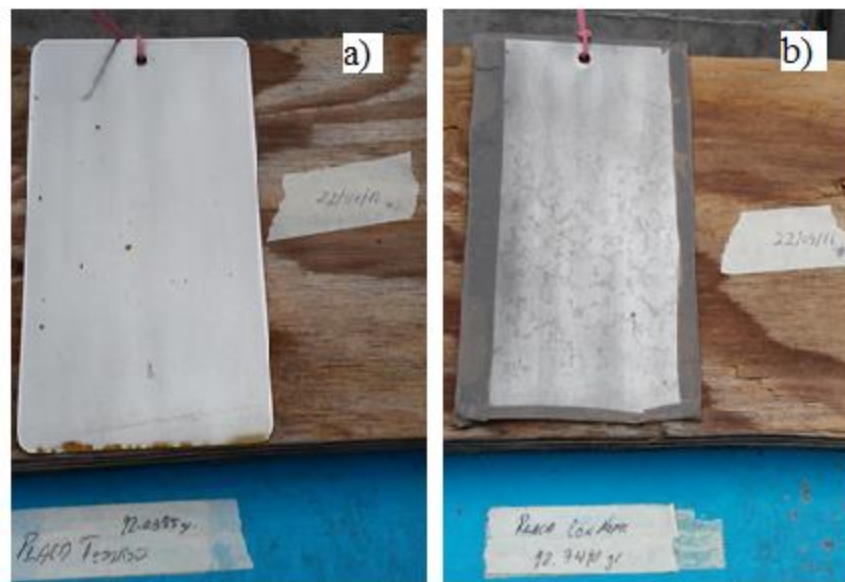
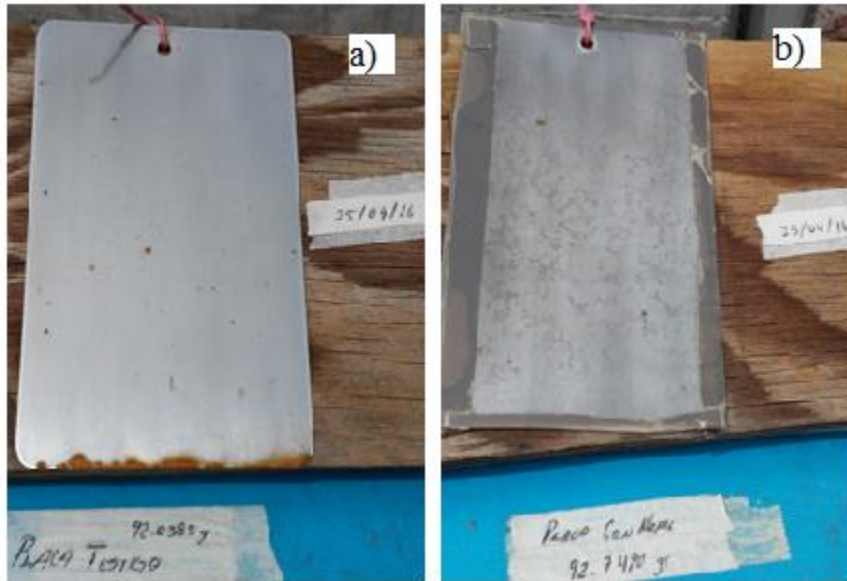
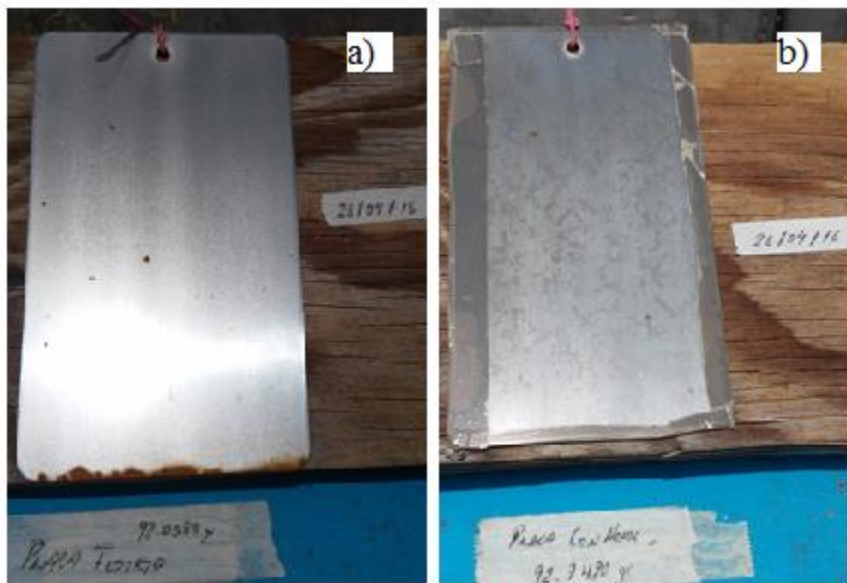


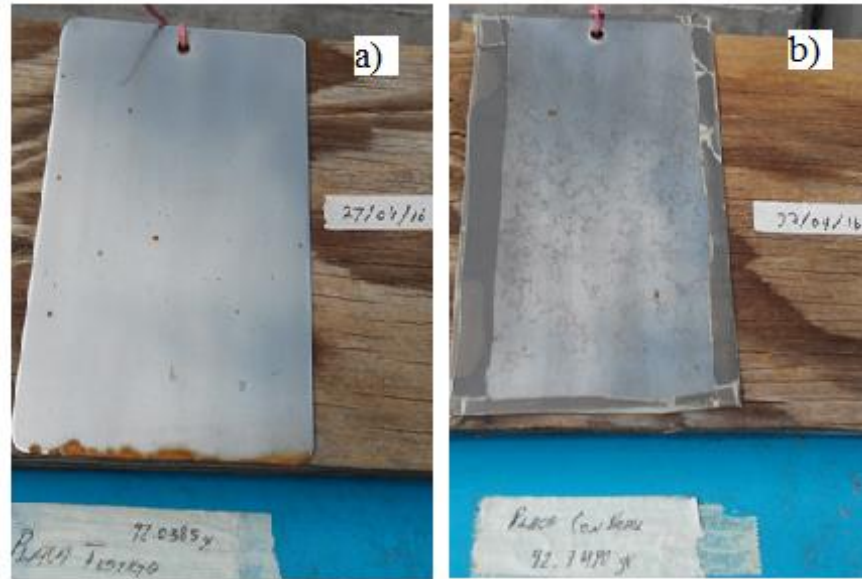
Figura 52. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) Placa con *EN*. Segundo día de exposición. 22/04/16.



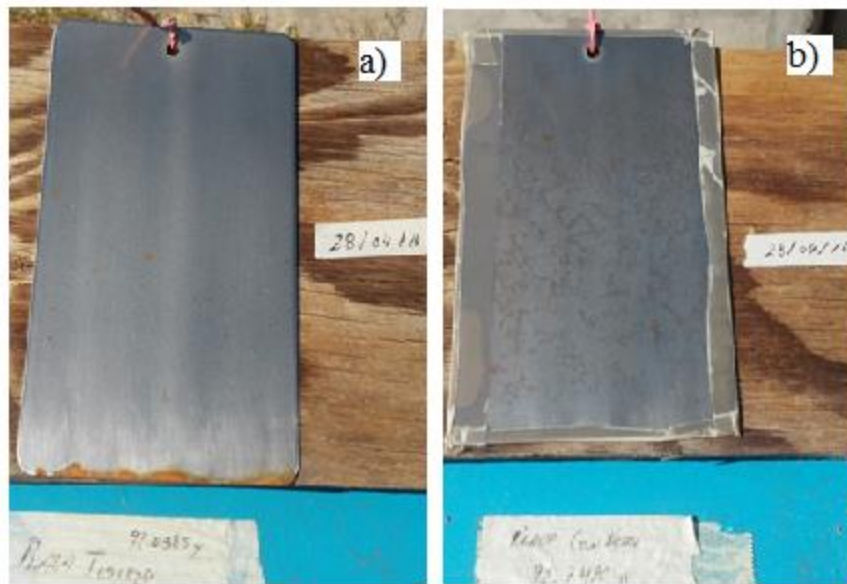
Figuras 53. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) Placa con *EN*. Quinto día de exposición. 25/04/16.



Figuras 54. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) Placa con *EN*. Sexto día de exposición. 26/04/16.



Figuras 55. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) Placa con EN. Séptimo día de exposición. 27/04/16.



Figuras 56. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) Placa con EN. Octavo día de exposición. 28/04/16.



Figura 57. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) Placa con EN. Noveno día de exposición. 29/04/16.

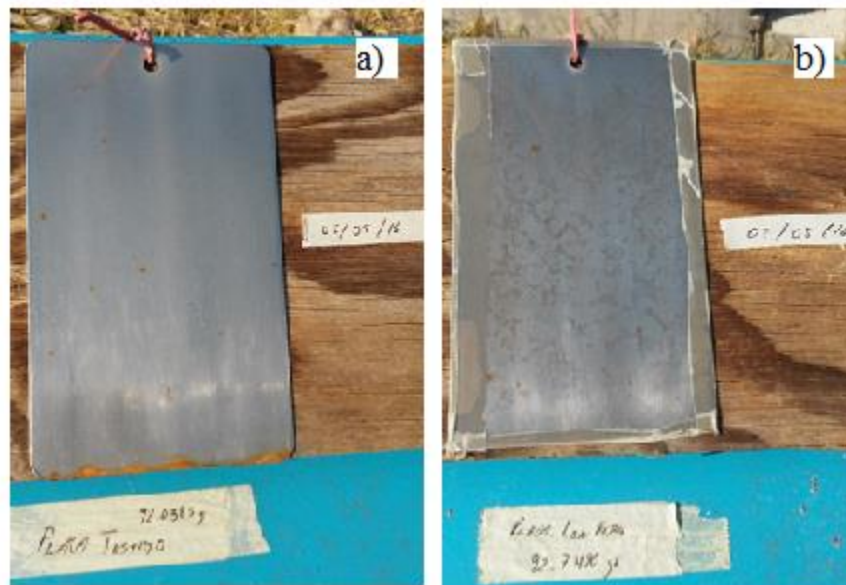


Figura 58. Cupones normalizados expuestos al ambiente. (a) Placa testigo, (b) Placa con EN. Décimo segundo día de exposición. 02/05/16

Registro del peso de los cupones normalizados después de la exposición al ambiente

Se realizó nuevamente el registro del peso de los cupones normalizados, después de la exposición al ambiente, los cuales se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Peso de los cupones normalizados posterior a la exposición del ambiente

Placa Testigo	Placa con EN
92.0418 gr.	92.7711 gr.

Una vez obtenidos los pesos previos y posteriores, a la exposición del ambiente de los cupones normalizados, se realizó un análisis comparativo de dichos pesajes, los cuales se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Comparación del peso de los cupones normalizados, previo y posterior a la exposición del ambiente.

Cupones normalizados de acero al carbono.	Placa testigo	Placa con EN.
Peso. Previo a la exposición al ambiente.	92.0385 gr.	92.7490 gr.
Peso. Posterior a la exposición al ambiente.	92.0418 gr.	92.7711 gr.

3.5 DISCUSIONES

3.5.1 Obtención del extracto

El extracto líquido que fue obtenido de la planta del nopal tuvo algunas características organolépticas particulares como un color verdoso, un aspecto un tanto viscoso y aroma dulce debido a sus compuestos en su composición. El extracto de *Opuntia Ficus-Indica* presentó una densidad de 0.9 g/ml. en el momento que fue obtenido con un ph de 4.7.

3.5.2 Evaluación electroquímica del extracto

Extrapolación de tafel

En las figuras 24, 30 y 36 se puede observar el comportamiento de los diferentes aceros al carbono evaluados con y sin presencia del agente inhibidor, donde es identificable un desplazamiento significativo de las curvas hacia frecuencias más pequeñas con la adición del *EN* por parte de los tres aceros y por lo tanto los valores del potencial de corrosión (E_{corr}), son más activos con respecto a las pruebas en blanco. Dicho comportamiento así como el desplazamiento de las curvas nos proporciona la información necesaria para identificar el tipo de mecanismo de corrosión de la sustancia añadida (anódica, catódica, mixta). En cuanto a los valores se puede demostrar que si existe un efecto importante al añadir el *EN* en el medio agresivo.

Curvas de polarización lineal

En cuanto a este tipo de técnica se puede apreciar en las Figuras 25, 31 y 37 de igual manera para los tres casos diferentes un comportamiento similar, ya que existe un desplazamiento de las curvas hacia el lado izquierdo en el potencial de corrosión (E_{corr}) siguiendo un comportamiento del material de una forma más activa al haber agregado el extracto de nopal.

En los tres tipos de materiales el comportamiento es semejante, debido a que se muestra una ligera tendencia a pasivarse. Por lo cual da la idea de que el material se sigue corroyendo de una forma homogénea.

Gráficos de impedancia (Nyquist)

En las Figuras 26, 32 y 38 se muestra el comportamiento que presentó cada una de las muestras de acero al carbono en el medio ácido en comparación con la adición del *EN* con la aplicación de la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

Basado en la teoría de EIS podemos identificar la resistencia a la transferencia de carga (R_{tc}) y la resistencia de la solución a través de los bucles o semicírculos ya que se encuentran cercanos al eje X; en cada uno de los diagramas se puede observar notablemente un aumento a la resistencia por parte del *EN* con respecto al blanco.

En aceros como el 1045 y el 4140 la resistencia va disminuyendo con respecto al tiempo y para el acero 1018 no existe tanto decremento de la resistencia ya que la tendencia de los bucles se mantiene constante. Cabe mencionar que la sustancia que se agregó presentó características inhibitorias para los diferentes materiales metálicos.

Gráficos de Ajustes experimentales, “circuito de Randles”

En base a los diagramas de impedancia (Nyquist) que se mostraron en este estudio, tenemos que deben ser relacionados con un circuito eléctrico equivalente para caracterizar los datos experimentales. En este caso se propuso el circuito eléctrico de Randles ya que se ajustó de manera correcta a las condiciones experimentales. Este circuito está compuesto por un elemento de fase constante, una resistencia a la transferencia de carga conectados en paralelo, y una resistencia a la solución conectada en serie. Dada esta modulación se pueden obtener parámetros electroquímicos para conocer la habilidad a la protección a la corrosión o el comportamiento de la corrosión, además de obtener una contribución de los valores de resistencia y capacitancia para cada uno de los aceros evaluados.

Gráficos de Bode ($|Z|$) vs f y ángulo de fase (ϕ)

Este tipo de gráficos son una representación más de los diagramas de impedancia (Nyquist) solo que en el modo Bode-Fase.

En los cuales se puede observar un incremento de la resistencia a la transferencia de carga, además de un desplazamiento de la curva con la adición del inhibidor, lo cual quiere decir que existe una

menor capacidad de transporte de electrones con respecto a las pruebas en blanco o en el medio ácido. Este tipo de comportamiento se presentó de una manera similar, para los tres aceros evaluados.

3.5.3 Microscopía Óptica

Dentro de las micrografías ópticas de cada una de las muestras después de ser expuestas en las soluciones de trabajo se pudo observar productos de óxido oscuro, que suele ser muy característico de los aceros al carbono que son inmersos en la solución ácida, además de presentar picaduras definidas seguidas de corrosión generalizada sobre la superficie de éstas. Mientras que adicionando el *EN* este dominio cambia, mostrando un dominio de corrosión generalizada para las tres muestras, disminuyendo así el tamaño de las picaduras sobre la superficie de los diferentes materiales metálicos.

3.5.4 Evaluación de cupones normalizados de acero al carbono expuestos a la intemperie

- Primer día de exposición al ambiente. A simple vista no se pudo apreciar algún daño o señales de oxidación sobre la superficie de los cupones normalizados (Figura 51).
- Segundo día de exposición al ambiente. Comienza hacerse notorio el cambio para cada uno de los cupones normalizados. Se puede ver que sobre la superficie de la placa testigo, Figura 52 (a) comienzan aparecer algunas manchas de óxido, las cuales se hacen más notorias en la parte inferior de esta. Mientras que para la placa con *EN*, Figura 52(b), solamente se aprecia un ligero oscurecimiento sobre la superficie de esta con la aparición de manchas del mismo tono.
- Quinto día de exposición al ambiente. No se ha incrementado la aparición de manchas de óxido sobre la superficie de la placa testigo Figura 53(a), por lo tanto no hay un cambio considerable. Para la placa con *EN*, Figura 53(b), la superficie se mantiene oscurecida, mientras que las manchas que anteriormente estaban oscuras Figura 52(b) se han tornado de un color rojizo.
- Sexto día de exposición. No se ha incrementado la aparición de manchas de óxido sobre la superficie de la placa testigo, solamente las manchas existentes se han tornado más rojizas, Figura 54(a). Mientras que para la placa con *EN*, se mantiene un tanto oscurecida y no se aprecia algún otro cambio considerable u aparición de otras manchas de óxido, Figura 54(b).
- Séptimo día de exposición. Hubo un ligero incremento de las manchas de óxido sobre la superficie de la placa Figura 55(a). Mientras que para la placa con *EN*, persisten las mismas

manchas y el color oscuro sobre la superficie, por lo tanto no se apreciaba algún otro cambio significativo de esta, Figura 55(b).

- Octavo día de exposición. No hubo cambio significativo para la placa testigo Figura 56(a), solamente se presentó un ligero oscurecimiento sobre la superficie de esta. Para la placa con *EN* Figura 56(b), solamente persiste el color oscuro sobre la superficie de la placa y por lo tanto no se apreciaba algún otro cambio considerable.
- Noveno día de exposición. Se aprecia un ligero aumento de las manchas de óxido y el oscurecimiento persiste sobre la superficie de la placa Figura 57(a). Mientras que para la placa con *EN* Figura 57(b) no hay un cambio considerable.
- Décimo segundo día de exposición. No se ha presentado algún otro cambio considerable sobre la placa testigo Figura 58(a) y tampoco se aprecian cambios para la placa con *EN*. Figura 58(b). Solamente se puede apreciar que ambas placas se encuentran oscurecidas.

4 CONCLUSIONES

De acuerdo a la hipótesis planteada, se puede concluir que el extracto líquido obtenido de las pencas de *Opuntia ficus-indica* demostró tener un mecanismo de inhibición sobre la superficie de las muestras de acero al carbono AISI 1018, 1045 y 4140 inmersos en un medio ácido de H_2SO_4 de 0.6 Mol/l. con la formación de una película hidrofóbica, la cual rechaza las moléculas líquidas sobre la superficie brindando protección.

Dentro de las evaluaciones electroquímicas de Potencial de corrosión (E_{corr}) con respecto al tiempo de exposición en las probetas de acero al carbono AISI 1018, 1045 y 4140 inmersas en el medio ácido y con la adición del *EN*; podemos decir en los tres casos, que nos da la idea de que el metal se corroe y tiende a corroerse más. Cabe mencionar que el acero que mostró menores potenciales de corrosión es el 1045 en el grado entre el blanco y el *EN*, cuyos valores están alrededor de los -400 mV, mientras que en aceros como el 1018 y el 4140 están en un rango de -500 mV aproximadamente. A pesar de que el acero se corroe lentamente podemos afirmar que si existe un comportamiento de inhibición en la superficie del acero para los tres casos.

En relación a las curvas de extrapolación de Tafel podemos concluir en los tres casos que existe cierta activación de la superficie de los aceros al haber adicionado el *EN* por lo cual este reaccionará corroyendo el material que en comparación con las pruebas en blanco podemos decir que el metal es más noble. De acuerdo a la tendencia de las curvas al haber adicionado el *EN*, podemos concluir que dicho extracto si presenta propiedades inhibitorias sobre la superficie de los aceros. Que en relación

a las curvas de polarización promedio tenemos un comportamiento similar de un material más activo al agregar el extracto de nopal mostrando una ligera tendencia a pasivarse, seguido de una traspasivación para los tres materiales. Lo cual nos da la idea de que los materiales siguen corroyendose de manera homogénea.

Ademas de que existe un comportamiento similar tanto en la pendiente anódica como en la pendiente catódica con la adición del *EN* por lo cual se concluye que para los tres tipos de aceros existe un mecanismo de inhibición de tipo mixto. Esto debido a la adsorción del *EN* sobre la superficie de los aceros y la forma en que cubrió la superficie de cada uno de ellos.

La técnica de EIS presentó resultados significativos en cuanto a la tendencia de los semicírculos para los tres aceros al adicionar el *EN* en comparación con las pruebas en blanco. Se aprecia un incremento de la resistencia a la transferencia de carga para cada tipo de material. En aceros como el AISI 1045 y AISI 4140 la resistencia va disminuyendo con el paso del tiempo de exposición mientras que para el acero 1018 la resistencia se mantiene ligeramente constante y no hay tanto decremento de esta. Podemos concluir que el acero que interpreto mayor incremento a la resistencia de la transferencia de carga fue el acero AISI 1018.

Dentro de los diagramas de Bode Fase, podemos mencionar que en el efecto de inhibición solo se puede observar una constate de tiempo para los tres aceros estudiados.

En el análisis superficial realizado con un Microscopio Estereoscopico para las diferentes probetas de trabajo, se llego a la conclusión de que el mecanismo dominante para acero al carbono en el medio ácido fue de picaduras definidas, seguidas de corrosión generalizada; mientras que el resultado de haber adicionado el *EN* el comportamiento es distinto para cada acero. En el caso del acero 1018 existe un dominio de mecanismo de corrosión generalizada así como en el acero 4140, mientras que para el acero 1045 siguen las picaduras, solo que en menor presencia.

En cuanto a la evaluación de los cupones normalizados de acero al carbono expuestos al ambiente se concluyo lo siguiente:

- Se presentó un ligero aumento en el peso de ambas placas o cupones normalizados de acero al carbono, después de estar expuestas a la intemperie. Esto debido a la presencia de óxidos sobre la superficie de cada una de ellas, debido a la introducción de moléculas de oxígeno del medio, las cuales se convinan con el hierro, formando hidróxido ferroso.
- Hubo cierto grado de protección en el caso de la placa inmersa en el extracto de nopal, ya que la presencia de óxidos fue en menor proporción que la placa testigo.

- El *EN* sobre la placa, funcionó como una sustancia protectora de fácil remoción , brindando cierto grado de protección durante 12 días de exposición.
- El extracto de nopal presentó protección ante diferentes cambios climáticos presentados.

5 RECOMENDACIONES

- Evaluar en otro medio electrolítico ya sea en condiciones ácidas o alcalinas.
- Investigación bibliográfica para especificar las medidas que se pueden aplicar en cuanto a la temperatura y presión para poder realizar las evaluaciones electroquímicas.
- Aplicar un método de obtención de extractos diferente, evaluar en condiciones similares y comparar.
- Evaluación electroquímica con diferentes materiales metálicos.
- Caracterizar y cuantificar el número de compuestos presentes en el extracto de nopal.

6 BIBLIOGRAFÍA

Abdel-Gaber, A.M., Abd-El-Nabey, B., Khamis, E., Abd-ElKhalek, D. (2011). A natural extract as scale and corrosion inhibitor for steel surface in brine solution. Alexandria University Egypt. Desalination, 278(1–3): 337-342.

Alvarado Cortés José Omar. (2006). Selección Electroquímica de Compuestos Orgánicos como Inhibidores de Corrosión en Medio Ácido. (Tesis de Licenciatura). Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Pachuca de Soto Hidalgo.

Alvarez Bustamante R. G. Negron-Silva, M. Abreu-Quijano, H. Herrera-Hernández, M Romero, Romo, A. Cuan, M. Palomar Pardavé (2009). Electrochemical study of 2 mercaptoimidazole as a novel corrosion inhibitor for steels. Electrochimica Acta 54pp.5393-5399.

Ávila J., y Genescá J. (1996). “Más Allá de la Herrumbre”, Editorial, Fondo de Cultura Económica 2ª Reimpresión México,

Baboian, R. (1986). Electrochemical Techniques. Houston, Texas

Berrocal Bravo M. J., Altamiranda Percy E. D. (2013). Evaluación de la eficiencia inhibidora de corrosión del extracto acuoso de aguacate (Tesis de Licenciatura). Universidad de Cartagena. Facultad de Ingeniería.

Buralla Montal Ernest. (2012) Estudio del Efecto de los Inhibidores de la Corrosión en Armaduras del Hormigón. Escuela Técnica superior de Ingeniería de Edificación Universidad Politécnica de Valencia, Master en Edificación-Especialidad Tecnología.

Castillo Rendón R. (2011). “Evaluación Electroquímica de extractos vegetales como inhibidores de corrosión”(Tesis de Licenciatura) Universidad Veracruzana.

Castillo Valdes José, Tiznado Urbina Aarón, (2015). Caracterización del desgaste y resistencia a la corrosión de un recubrimiento de acero inoxidable proyectado térmicamente. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Cd. Universitaria.

Cruz Islas E. (2002). “Evaluación del Recubrimiento Metálico Zn-Al mediante Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y Difracción de Rayos X” (Tesis de Licenciatura), Poza Rica Hidalgo Ver.,

Fernández Guerrero Marianela, (2011). Corrosión en la industria petrolera. Métodos de control de corrosión. República Bolivariana de Venezuela. Universidad de Zulia. Facultad de Ingeniería. Centro de estudios de corrosión. Maracaibo, Julio de 2011.

Flores de los Ríos Juan Pablo, (2016). Comportamiento de inhibidores “verdes” en la corrosión de acero 1018 en medios ácidos. (Tesis Doctoral). Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. Chihuahua. Chih.

Franco Tronco Mara Isabel (2014). “Evaluación electroquímica de extractos naturales a partir de hojas de Morinda Citrifolia como posibles inhibidores de corrosión”. Boca del Río Veracruz.

García Favela B. (2013). Mucílago de nopal (Opuntia spp.) sobre propiedades micromorfológicas y estructurales del suelo en trigo (Tesis Doctoral). Colegio de Postgraduados, Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco, Edo. De México.

- García Inzunza R. (2014). Inhibidores de corrosión de acero en medios ácidos a partir de extractos naturales. (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Ingeniería Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería. Mexicali, B. C.
- Genescá, J. (2002). Tècniques electroquímiques de corrent directa para el estudi de la corrosiò. J. (Eds).Tècniques electroquímicos para el control y estudio de la corrosión, México: Ciudad universitaria. pp, 9-53.
- Gómez, F. & Alcaraz, D. (2004). Manual básico para ingenieros. Murcia, España: Universidad de Murcia.. p 62-65.
- J. A. Gonzales Fernández, (1989). “Control de Corrosión Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas”, Editorial C. S. I. C Madrid páginas 407-446.
- Granados Sanchez Diodoro. (2003). El nopal. Historia, Fisiología, Genética e importancia frutícola. Trillas. México.
- Guzmán, L. D. y Chávez, J. (2007). Estudio bromatológico del cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para el consumo humano. Revista Sociedad Química Perú. 73 (1): 41-45.
- Lugo Islas Gabriela. (2010). Evaluación de la corrosividad atmosférica aplicando la normativa ISO y los métodos electroquímicos (probetas planas cada estación del año) (Tesis de Licenciatura), Poza Rica de Hidalgo Ver., Páginas 26-35.
- Mendoza, Duran & Genescá. (2014). Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en Corrosión, Recuperado de <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF>
- Mendoza Flores Juan, Durán Roero Rubén, Genescá Llongueras Joan (2003). Espectroscopia de Impedancia Electroquímica. Instituto Mexicano del Petroleo. Facultad de Química UNAM.
- Monroy Barreto E. (2016). Extractos líquidos naturales de *Morinda Citrifolia* y *Aloe-Vera* como posibles inhibidores de la corrosión en aceros industriales. (Tesis de Licenciatura) Centro Universitario UAEM Valle de México.
- Morales Marina J., Esparza Ferrera P., Fernández Suárez G., Varela Molina Aurea (2011). Curso teórico y práctico de introducción a la corrosión metálica. Materiales didácticos universitarios.
- Moreno Jonathan, Romero Francisco, Muso Erick. Informe de pruebas del acero AISI-SAE 1018. (2013). Departamento de ciencias de la energía y mecánica. Carrera de Ingeniería Mecatrónica. Sangolquí, 01 de Octubre del 2013.
- Nahle Ayssar, Abu-Abdoun Ideisan, Abdel-Rahman Abraham, Al-Khayat Maysson. (2010). UAE Neem Extract as a Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in HCl Solution. Int J Corros, vol 2010.Hindawi Publishing Corporation. International Journal of Corrosion
- E. Otero Huerta. (2000). Corrosión y degradación de materiales. Editorial Sintesis.

M. Palomar-Pardavé, M. Romero-Romo, H. Herrera-Hernández, M. A. Abreu-Quijano, Natalya V. Likhanova b, J. Uruchurtu c, J. M. Juaárez-García (2012). Influence of the alkyl chain length of 2-amino-5-alkyl-1,3,4-thiazole compounds on the corrosion inhibition of steel immersed in sulfuric acid solutions *Corrosion Science* 54 pp. 231-243.

Paredes Martínez Erika, (2011). Establecimiento de las condiciones de centrifugación para la obtención de mucílago de nopal deshidratado. Cuautitlan Izcalli, Estado de México.

Ramírez Reyes J. L., (2007). “Métodos Experimentales en la Ciencia de la Corrosión”. Ed. Instituto de Ingeniería, UV, Veracruz

Ríos, R. J y Quintana, M. V. (2004) Manual del Participante, Manejo General del Cultivo del Nopal. Colegio de Postgrados. Secretaría de la Reforma Agraria. P. 8-10

Rodríguez Gómez Francisco Javier (2002). Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión. Resistencia a la Polarización. Dpto. Ing. Metalúrgica, Facultad Química, UNAM Ciudad Universitaria. 04510- México D.F. MÉXICO.

Satri, V. (2011). *Green Corrosion Inhibitors. Theory and Practice*. New Jersey: Winston Revie

Tejeda Benítez Lesly Patricia, Meza Castellar Pedro Javier, Altamiranda Percy Edgar David, Berrocal Bravo María Jose, (2014). Uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión. Plant extracts used as corrosion inhibitors. (Informador técnico, Colombia).

Trejo Rosales José Luis, (2006). Estudio Electroquímico de una Molécula Orgánica como Inhibidor de Corrosión del Acero al Carbono en un Medio Ácido. (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Física y Matemáticas. Departamento de Ciencia de Materiales.

Valdez Cepeda, R. D.; Blanco, M. F.; E. Vázquez Alvarado, R. E.; Magallanes Quintanar, R. (2008). Producción y usos del nopal para verdura. *Revista Salud Pública y Nutrición*. 14: 1-19.

Yunny Meas (2012). Técnicas Electroquímicas de corriente directa para la determinación de la velocidad de corrosión. Técnicas electroquímicas para la medición de la velocidad de corrosión. Centro de Investigación y desarrollo en Electroquímica (CIDETEQ), Parque Tecnológico, Sanfandila, Pedro Escobedo, C.P 76700, Estado de Querétaro.