



**SEP**  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



GOBIERNO DEL  
ESTADO DE MÉXICO



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC  
DIRECCIÓN ACADÉMICA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

*Desarrollo y evaluación de un inhibidor de corrosión de extractos  
naturales de residuos sólidos orgánicos*

**TESIS**

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA

**I.Q. JUAN CARLOS VICENCIO REYES**

**Director**

Dr. William Sánchez Ortiz  
TESE

**Codirector**

Dr. Jorge Iván Aldana González  
UAM-A

Comité Tutorial Asesor:

Dra. Mariana Bárcenas Castañeda  
Dr. José Antonio Arcos Casarrubias

Ecatepec de Morelos, México, (mayo) de 2024

*Este trabajo fue posible gracias al apoyo del  
Consejo Nacional de humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT)  
a través de la beca nacional con numero de CVU:1195806 durante los semestres  
22-2 y 23-1.*

## *Dedicatorias*

*A mis padres, Irineo Vicencio Reyes y María Reyes Martínez, por todo su apoyo y amor. Las palabras nunca serán suficientes para expresarles todo el amor y la gratitud que siento por ustedes.*

*A Ian Irineo Vicencio Osorio y Luz María Osorio cruz a pesar de la distancia, ustedes siempre han sido mi inspiración y aliento para mí.*

## *Agradecimientos*

*Quiero expresar mi profundo agradecimiento al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE) y a la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química por brindarme la valiosa oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en esta prestigiosa institución. Además, quiero reconocer el apoyo brindado por su infraestructura en el desarrollo de mi trabajo en la UAM-Azcapotzalco.*

*Al Dr. William Sánchez Ortiz, director de mi tesis, por brindarme la invaluable oportunidad de colaborar con él en este proyecto. Su orientación, enseñanza y dedicación ha sido fundamentalmente para el desarrollo exitoso de este trabajo. Asimismo, quiero agradecer al Dr. Jorge Iván Aldana González por su valioso tiempo, contribuciones y orientación como mi codirector a lo largo de todo el proceso.*

## Contenido

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>8</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Introducción.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 Planteamiento de Problema.....</b>	<b>13</b>
<b>1.3 Justificación.....</b>	<b>14</b>
<b>1.4 Hipótesis.....</b>	<b>15</b>
<b>1.5 Objetivos.....</b>	<b>16</b>
1.5.1. Objetivo General.....	16
1.5.2. Objetivos Específicos.....	16
<b>CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Corrosión.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Tipos de Corrosión.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Métodos de control para la corrosión.....</b>	<b>19</b>
2.3.1 Diseño.....	19
2.3.2 Selección de materiales.....	20
2.3.3 Protección catódica.....	20
2.3.4 Protección anódica.....	20
2.3.5 Inhibidores de la corrosión.....	21
2.3.5.1 Clasificación de los inhibidores de corrosión.....	21
<b>2.4 Evaluación electroquímica.....</b>	<b>25</b>
2.4.1 Resistencia a la polarización lineal.....	25
2.4.2 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).....	26
<b>2.5 Disolventes eutécticos profundos.....</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO 3 REVISIÓN DEL ESTADO DEL TEMA.....</b>	<b>32</b>
<b>CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA.....</b>	<b>35</b>

<b>4.1. Etapa 1</b> .....	<b>35</b>
4.1.1 Preparación disolventes eutécticos Profundos (DES).....	35
4.1.2 Extracción de extracto de cáscara de cítricos con DES .....	36
4.1.3 Elaboración de medios corrosivos .....	36
<b>4.2 Etapa 2</b> .....	<b>36</b>
4.2.1 Montaje de celda electroquímica .....	36
4.2.2 Preparación de probeta.....	37
<b>4.3 Etapa 3 Evaluación del Inhibidor verdes de la corrosión</b> .....	<b>38</b>
4.3.1 Espectroscopia de impedancia electroquímicas (EIS) .....	38
4.3.2 Resistencia a la polarización lineal (LPR) .....	40
<b>CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	<b>41</b>
<b>5.1 Espectroscopia de Impedancia electroquímica (EIS)</b> .....	<b>41</b>
5.1.1 Diagramas de Nyquist en medio de Cloruro de sodio (NaCl) al 5% wt. ....	41
5.1.2 Diagramas de Nyquist de EIS en medio de ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) 1M.....	43
<b>5.2 Polarización potenciodinamica (Rp)</b> .....	<b>47</b>
5.2.1 Pruebas de RPL en medio de Cloruro de sodio (NaCl) al 5% wt. ....	47
5.2.2 Pruebas de RPL en medio de ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) 1M.....	48
<b>5.3 Cinética de corrosión</b> .....	<b>52</b>
<b>CONCLUSIÓN</b> .....	<b>53</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>54</b>
<b>PARTICIPACIONES EN EVENTOS</b> .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Diagrama corriente-potencial mostrando el efecto de un inhibidor anódico sobre el proceso de corrosión .....	22
<b>Figura 2.</b> Diagrama corriente-potencial mostrando el efecto de un inhibidor catódico sobre el proceso de corrosión .....	22
<b>Figura 3.</b> Diagrama corriente-potencial mostrando el efecto de un inhibidor mixto sobre el proceso de corrosión .....	23
<b>Figura 4.</b> Diagrama de Nyquist, componente real ( $Z'$ ) vs. imaginario ( $Z''$ ) de la impedancia b) Diagrama de Bode de $ Z $ vs ángulo de fase ( $\phi$ ) vs $f$ para el acero inoxidable AISI 304 sumergido en $H_2SO_4$ 0.5M .....	28
<b>Figura 5.</b> DES para formar de tipo III.....	31
<b>Figura 6.</b> Montaje de Celda Electroquímica.....	37
<b>Figura 7.</b> Representa los circuitos eléctricos equivalentes utilizados para la simulación de espectros de impedancia para (Circuito A) en ausencia (en blanco) y (Circuito B) en presencia del inhibidor (DES + cascara de naranja o DES +Cascara de toronja) .....	39
<b>Figura 8.</b> Diagramas de Nyquist para un acero AISI-1045 inmerso en 5% wt de NaCl en la adición de de inhibidores de cáscara de naranja con a) Ethaline b) Reline y cáscara de toronja con c) Ethaline d) Reline .....	42
<b>Figura 9.</b> Diagramas de Nyquist para un acero AISI-1045 inmerso en 1M de $H_2SO_4$ en la adición de de inhibidores de cáscara de naranja con a) Ethaline b) Reline y cáscara de toronja con c) Ethaline d) Reline .....	44
<b>Figura 10.</b> Curvas de polarización para un acero AISI-1045 inmerso en 5%wt Nacl en función del inhibidor de cáscara de naranja con Ethaline. ....	47
<b>Figura 11.</b> Diagramas de Nyquist para un acero AISI-1045 inmerso en 1M de $H_2SO_4$ en la adición de de inhibidores de cáscara de naranja con a) Ethaline b) Reline y cáscara de toronja con c) Ethaline d) Reline .....	49
<b>Figura 12.</b> La pendiente curva de polarización para diferentes volúmenes ( $\mu L$ ) de inhibidores de cáscara de naranja con a) Ethaline b) Reline y cáscara de toronja con c) Ethaline d) Reline para un acero AISI 1045 en un medio de 1M de $H_2SO_4$ .....	51
<b>Figura 13.</b> Cinética de corrosión del acero AISI-1045 inmerso en 5% wt de NaCl con la presencia de los inhibidores.....	52

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Tipos de Corrosión .....	18
<b>Tabla 2 .</b> Comparación IL vs DES.....	29
<b>Tabla 3.</b> Tipos de DES .....	30
<b>Tabla 4.</b> Composición química del acero AISI 1045 .....	38
<b>Tabla 5.</b> Parámetros de impedancia para el acero AISI-1045 inmerso en 5% wt de NaCl en presencia de los inhibidores.....	43
<b>Tabla 6.</b> Parámetros de impedancia para el acero AISI-1045 inmerso en 1M de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> en presencia de los inhibidores.....	45
<b>Tabla 7.</b> Parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización para diferentes volúmenes( $\mu$ L) de inhibidor de cáscara de naranja con Etahaline para un acero AISI 1045 en 5% wt de NaCl.....	48
<b>Tabla 8.</b> Parámetros electroquímicos para el acero AISI-1045 inmerso en 1M de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> en presencia de los inhibidores.....	50

## RESUMEN

En este trabajo de investigación se analizaron alternativas de inhibidores de la corrosión amigables con el medio ambiente y de bajo costo para el control de la corrosión, debido a que los inhibidores convencionales presentes en el mercado pueden ser demasiado costosos y peligrosos para los seres vivos debido a su alta toxicidad. Por ello, se desarrollaron inhibidores verdes de la corrosión a partir de extractos de cáscara de cítricos (naranja, toronja) con distintos disolventes eutécticos profundos (DES) que están conformados por cloruro de colina-etilenglicol (Ethaline) y cloruro de colina-urea (Reline). Los extractos se realizaron con una relación de 5:3 volumen- peso, en agitación constante durante 24 horas. La evaluación del efecto inhibitorio se realizó en un acero AISI - SAE 1045 con medios corrosivos de 5% wt NaCl y 1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La evaluación de los inhibidores se realizó mediante pruebas electroquímicas: espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y resistencia a la polarización lineal (LPR). Los resultados más relevantes, los inhibidores fueron más efectivos en medio de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> alcanzando una eficiencia de inhibición (EI) superior del 80 % con cantidades máximas de 2000 µL. En particular los inhibidores de cáscaras de naranja + DES (Ethaline, Reline) evaluados en medio NaCl; se logró obtener EI superiores del 85%. Sin embargo, los inhibidores de cáscaras de toronja + DES no presentaron un efecto positivo. Se evaluó en el tiempo los inhibidores de cáscaras de naranja con Ethaline a los 800 µL y cáscaras naranjas con Reline a los 700 µL, obteniendo eficiencias máximas de inhibición superiores al 60% durante 180 hrs, siendo los inhibidores más estables en un medio NaCl.

**Palabras clave:** Corrosion, Inhibidores verdes, DES, Electroquímica, EIS, LPR

## ABSTRACT

*In this research work, environmentally friendly and low-cost corrosion inhibitor alternatives for corrosion control were analyzed, because conventional inhibitors present in the market can be too expensive and dangerous for living beings due to their high toxicity. Therefore, green corrosion inhibitors were developed from citrus peel extracts (orange, grapefruit) with different deep eutectic solvents (DES) consisting of choline-ethylene glycol chloride (Ethaline) and choline-urea chloride (Reline). The extracts were made with a 5:3 volume-weight ratio, under constant agitation for 24 hours. The evaluation of the inhibitory effect was performed on an AISI - SAE 1045 steel with corrosive media of 5% wt NaCl and 1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. The inhibitors were evaluated by electrochemical tests: electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and linear polarization resistance (LPR). The most relevant results, the inhibitors were more effective in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> medium reaching an inhibition efficiency (IE) higher than 80 % with maximum amounts of 2000  $\mu$ L. In particular, the orange peel + DES inhibitors (Ethaline, Reline), evaluated in NaCl medium, were able to obtain EI higher than 85%. However, the grapefruit peel + DES inhibitors did not show a positive effect. Orange peel inhibitors were evaluated over time with Ethaline at 800  $\mu$ L and orange peel inhibitors with Reline at 700  $\mu$ L, obtaining maximum inhibition efficiencies higher than 60% during 180 hr, being the most stable inhibitors in NaCl medium.*

**Keywords:** Corrosion, Inhibitors, Deep eutectics solvents (DES), Electrochemical

# Capítulo 1

En este capítulo, se presenta una introducción al presente trabajo exponiendo el planteamiento del problema de manera detallada, se ofrece una justificación para abordar dicho problema formulando la hipótesis que guiará la investigación y se definen con claridad los objetivos generales y específicos que orientarán este estudio.

## 1.1 Introducción

La corrosión es una reacción interfacial irreversible que ocurre entre un material (como metal, cerámica o polímero) y su entorno, resultando en el consumo del material o la disolución de uno de sus componentes (Marzorati et al., 2019). Este fenómeno, común en los metales, tiene un gran impacto económico debido a los elevados costos asociados. Según estudios de la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE), se estima que el costo global de la corrosión ascendió a \$2.5 billones de dólares estadounidenses en 2013, lo que representa el 3.4% del producto interno bruto mundial (Marzorati et al., 2019; Salleh et al., 2021).

Este mismo estudio señala que la aplicación de métodos para prevenir y controlar la corrosión, como el uso de inhibidores, recubrimientos, protección anódica, protección catódica, y la selección adecuada de materiales y diseño, podría reducir los costos totales de corrosión entre un 15% y un 35% (Salleh et al., 2021; Zakeri et al., 2022).

Una de las alternativas mencionadas anteriormente para prevenir y controlar la corrosión es el uso de inhibidores de la corrosión. Estas sustancias se añaden en pequeñas cantidades o concentraciones a la superficie metálica y al medio que lo rodea para reducir las velocidades de corrosión (Tejeda Benítez et al., 2014). El proceso de inhibición de la corrosión comienza con la adsorción del inhibidor sobre la superficie metálica, creando una barrera protectora que interactúa con los sitios de reacción anódica y/o catódica, reduciendo así las reacciones de oxidación-reducción (Salleh et al., 2021; Zakeri et al., 2022). Los inhibidores de corrosión se pueden clasificar en dos grupos principales: inorgánicos y orgánicos tradicionales. Estos grupos son ampliamente utilizados debido a su fácil procesamiento y aplicación, así como a su excelente eficacia a bajas concentraciones (Zakeri et al., 2022).

Los inhibidores orgánicos son eficientes cuando tienen grupos funcionales polares que contienen heteroátomos como átomos de azufre (S), oxígeno (O) o nitrógeno (N) en la molécula y un resto hidrofóbico que repelerá las especies corrosivas sobre la superficie metálica. En particular, contiene grupos funcionales electronegativos y electrones tipo phi en enlaces dobles o triples conjugados exhiben buenas propiedades inhibitorias al suministrar electrones a través de phi-orbitales. Algunas de los productos químicos orgánicos utilizados

para inhibir son las amidas grasas, las piridinas, los polímeros y las imidazolininas (Miralrio & Vázquez, 2020; Salleh et al., 2021).

Los inhibidores inorgánicos, derivados de arseniatos, fosfatos, cromatos y dicromatos, pueden funcionar de manera excelente a altas temperaturas durante períodos prolongados. Sin embargo, presentan limitaciones, ya que no son efectivos en soluciones ácidas más concentradas que el 17% de HCl (ácido clorhídrico) (Salleh et al., 2021; Zakeri et al., 2022). En este tipo de inhibidores, son los aniones los responsables de reducir la velocidad de corrosión (Tejeda Benítez. Lesly P et al., 2014). Por otro lado, los inhibidores inorgánicos son altamente peligrosos y tóxicos; no se descomponen ni pierden su potencia al desecharse, lo que representa un riesgo para la salud humana y el medio ambiente. Esta falta de degradación puede ocasionar la acumulación de sustancias nocivas y aumentar el riesgo de problemas a largo plazo, como el cáncer (Zakeri et al., 2022).

Actualmente, existe un creciente interés en los inhibidores verdes de la corrosión, derivados de extractos naturales como partes de plantas, hojas, raíces, cortezas, frutos, cáscaras, semillas e incluso plantas completas (Marzorati et al., 2019; Miralrio & Vázquez Espinoza, 2020). Estos extractos naturales contienen compuestos activos, también conocidos como fitoquímicos, que muestran prometedores efectos de inhibición sobre la corrosión en entornos agresivos (Miralrio & Vázquez Espinoza, 2020). Entre los fitoquímicos más comúnmente identificados con propiedades inhibidoras de la corrosión se encuentran los flavonoides, glucósidos, alcaloides, saponinas, fitoesterol, taninos, antraquinonas, compuestos fenólicos (Miralrio & Vázquez Espinoza, 2020; Salleh et al., 2021).

Para el proceso de extracción de extracto se inicia con el secado que se complementa habitualmente con tamizado y molienda para convertir el extracto en polvo. Después, se emplean varios métodos para aislar y extraer el extracto deseado de las plantas. Estos métodos abarcan la extracción por solvente, destilación, prensado y sublimación, según el principio de extracción (Miralrio & Vázquez Espinoza, 2020; Salleh et al., 2021). La eficacia de la extracción de los componentes activos varía en función del solvente utilizado, la temperatura de extracción (generalmente entre 60 y 80 °C para la mayoría de las plantas), la temperatura de secado (también entre 60 y 80 °C), el tiempo de extracción y la relación líquido-sólido, entre otros factores. (Miralrio A & Vázquez Espinoza A, 2020).

Por ello, en el presente trabajo de investigación, se llevará a cabo la extracción de extractos naturales a partir de cáscaras de cítricos mediante el uso de disolventes eutécticos profundos (DES). La evaluación de estos, en acero de uso comercial; así mismo, la duración del efeto inhibitorio en el tiempo-.

## 1.2 Planteamiento de Problema

La corrosión puede provocar desde la degradación de los materiales metálicos, hasta el deterioro de las propiedades del producto, un aspecto no estético o desembocar en peligros latentes. Una forma de prevenir y controlar la corrosión en los materiales metálicos en especial los aceros de medio carbón es mediante el uso de inhibidores de la corrosión. Sin embargo, los inhibidores convencionales disponibles en el mercado pueden resultar costosos y representar un riesgo para los organismos vivos debido a su alta toxicidad (Tejeda Benítez. Lesly P et al., 2014). En el caso de los seres humanos, pueden ocasionar daños temporales o permanentes en órganos como los riñones o el hígado, así como interferir con procesos bioquímicos o sistemas enzimáticos en el cuerpo (Marzorati et al., 2019). Es por ello por lo que se deben desarrollar inhibidores verdes de la corrosión, no nocivos a la salud y medio ambiente, fáciles de preparar y de bajo costo. Una alternativa puede surgir de residuos agroindustriales, si bien este tipo de residuos son naturales, Sin gestión de los desechos, su vertido o quema perjudica la salud humana, daña el medio ambiente, afecta el clima, y dificulta el desarrollo económico en países tanto pobres como ricos por igual. Una característica importante de los desechos es que pueden acelerar la proliferación de las bacterias, y una vez liberados al medio ambiente pueden alcanzar distancias muy lejanas a las del origen de emisión, a través de las corrientes marinas, o arrastradas por el aire. La particularidad de este tipo de residuos es que tarda varios años en biodegradarse y desaparecer.

### 1.3 Justificación

Los residuos agroindustriales se generan anualmente cerca de 76 millones de toneladas de residuos orgánicos de frutas (limón, peras, manzanas, papaya, piña, plátano, naranja) y vegetales (maíz, caña de azúcar, frijol, col, zanahoria, tomate, lechuga, papa) en México. Estos residuos provienen tanto de la industria alimentaria como del sector agroindustrial y doméstico. La producción de naranjas en México se aproxima a tres millones de toneladas anuales con diferentes destinos de los cuales sobresale la producción de jugo concentrado, además, es importante tener presente los beneficios que podrían existir en residuos de cascara de naranja, ya que algunas empresas podrían hacer uso de estos residuos con fines distintos. Las cáscaras de los cítricos albergan una variedad de antioxidantes capaces de inhibir la acción de metales ferrosos. Entre estos, destaca la presencia prominente de vitamina C (ácido ascórbico), flavonoides y carotenoides. Tradicionalmente, la extracción de estos antioxidantes se realiza mediante el uso de solventes convencionales como metanol, etanol, agua, éter y acetona. Este método conlleva costos elevados, dificultades en la preparación, riesgos para la salud y el medio ambiente. En este estudio, se propone obtener extractos de las cáscaras de cítricos utilizando solventes eutécticos profundos (DES) que no requiere síntesis química para su obtención, fácil de preparar, bajo costo y es clasificado como solvente verde. Ofrecen ventajas como disolventes de extracción a muchos niveles y son, por tanto, una alternativa prometedora a los disolventes orgánicos convencionales. Los disolventes eutécticos profundos funcionan de forma excelente y proporcionan altos rendimientos de extractos de primera calidad. Una de las principales ventajas es la mayor eficacia de extracción de compuestos fenólicos y otros fitoquímicos de fuentes naturales.

## 1.4 Hipótesis

Es posible utilizar sistemas de disolventes eutécticos profundos como Ethaline y Reline, junto con residuos agroindustriales, extractos de cáscaras de cítricos (naranja y toronja). Para generar inhibidores en el proceso de corrosión en el acero AISI-1045 cuando se expone a ambientes corrosivos que simulan condiciones costeras – cloruro de sodio (NaCl) al 5% wt y condiciones industriales – ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a una concentración de 1M

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1. Objetivo General

Desarrollar y evaluar la eficiencia de inhibición de extractos naturales obtenidos a partir de disolvente eutécticos profundos y residuos agroindustriales, en un acero AISI – SAE 1045

### 1.5.2. Objetivos Específicos

1. Elaboración de los disolventes eutécticos profundos (DES) utilizando cloruro de colina (ChCl) con etilenglicol (Et) - Ethaline y cloruro de colina (ChCl) con urea (U) - Reline en una relación molar 1:2.
2. Obtención de extractos de cáscara de cítricos (naranja y toronja) con Reline y Ethaline.
3. Evaluación de los extractos naturales como inhibidores verdes de la corrosión para el acero AISI – SAE 1045 mediante resistencia a la polarización ( $R_p$ ) en sistemas que contienen cloruro de sodio (NaCl) al 5% wt y ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a una concentración de 1M.
4. Evaluación de los extractos naturales como inhibidores verdes de la corrosión para el acero AISI – SAE 1045 mediante espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), en sistemas que contienen cloruro de sodio (NaCl) al 5% wt y ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a una concentración de 1M.
5. Evaluación de la cinética de corrosión para determinar el tiempo de vida de los inhibidores de corrosión (extractos de cascara de naranja y toronja) durante un mes, en sistemas que contienen cloruro de sodio (NaCl) al 5% wt.

# Capítulo 2 Marco Teórico

En este capítulo se presentan conceptos básicos de la corrosión, tipos de corrosión, alternativas para combatir la corrosión, tipos de inhibidoras y la descripción de las técnicas electroquímicas para la evaluación de los inhibidores por medio resistencia polarización lineal y espectroscopia de impedancia electroquímica.

## 2.1 Corrosión

La Corrosión es un término que se utiliza para describir el proceso de deterioro de materiales metálicos (incluyendo tanto metales puros, como aleaciones de estos), mediante reacciones químicas y electroquímicas. Las reacciones químicas ocurren directamente entre el metal y su entorno corrosivo, sin embargo, las reacciones electroquímicas requieren de una corriente eléctrica externa. Para el caso del deterioro relacionado con otros tipos de materiales, como los polímeros y cerámicos, se utiliza el término degradación (Salazar Jiménez. José A, 2015).

La corrosión es un proceso natural en el que los metales y las aleaciones intentan volver a su estado termodinámico más estable como resultado del ataque químico o la reactividad con su entorno. En otras palabras, los metales, a excepción del platino y el oro, se encuentran en la naturaleza en forma impura, principalmente como óxidos o sulfuros, que son estables. En la mayoría de las técnicas de procesamiento, se consume energía para obtener metales puros, lo que provoca que los metales puros se encuentren en un estado de mayor energía en comparación con su mineral. Como resultado, la corrosión de los metales es la forma más sencilla y rápida de alcanzar su estado más estable (Zakeri et al., 2022).

## 2.2 Tipos de Corrosión

Existen muchos tipos de procesos de corrosión diferentes que se caracterizan dependiendo tanto de la naturaleza del material y de las condiciones del medioambiente, donde se desarrollen. La Tabla 1 presenta algunos ejemplos junto con sus principales características (Askeland, 2017; Charng & Lansing, 1982; Salazar Jiménez, 2015).

**Tabla 1.**Tipos de Corrosión

Tipo de corrosión	Características
Generalizada	Este tipo de corrosión, también se le conoce como corrosión uniforme, ocurre en toda la superficie de metal de forma homogénea hasta deteriorándolo completamente el metal. Este tipo de corrosión es el que mayor pérdida de material provoca, pero es relativamente fácil de predecir y controlar, por lo que un accidente producido por este es de rara ocurrencia. Se puede observar comúnmente en materiales, sobre todo en la industria de la construcción, a base de hierro no aleado con metales inoxidables, como el níquel y el cromo.
Picadura	La mayoría de las picaduras se forman en superficies horizontales de acero y crecen hacia abajo. Las picaduras se producen en forma de pequeñas áreas de corrosión localizada que varían en tamaño, frecuencia de aparición y profundidad. Las picaduras no suelen ser un problema claramente identificable para el acero porque el entorno que las induce también tiende a causar una rápida corrosión general. Los iones haluros, como los cloruros, suelen estimular la corrosión por picaduras. El mecanismo es similar al descrito para la corrosión por grietas. El agotamiento del oxígeno en la picadura ralentiza la generación de iones hidroxilo. La acumulación de cargas positivas en forma de $Fe^{++}$ atrae entonces iones de cloruro de carga negativa. El cloruro ferroso resultante se hidroliza para producir hidróxido ferroso insoluble más un exceso de hidrógeno e iones de cloruro; ambos iones aceleran la corrosión en el fondo del pozo.
Galvánica	La corrosión galvánica ocurre cuando existe una unión, física o eléctrica, entre metales de diferente naturaleza, los cuales, en la presencia de un electrolito, forman una celda electroquímica, donde el material de menor potencial electroquímico es el que se corroe. Este tipo de corrosión es muy vista en partes que requieren sujeción, es decir en donde hay remaches o tornillos.
Erosión	La erosión es la destrucción de un metal por la acción combinada de la corrosión y la abrasión o el desgaste resultante del flujo de líquido o gas. Cuando el fluido contiene partículas sólidas más duras que la superficie metálica afectada, la erosión se producirá por la acción combinada de la corrosión y la abrasión. Cuando el fluido no contiene sólidos en suspensión, o contiene partículas más blandas que el metal, la erosión se producirá por corrosión y desgaste. La evidencia visual de dicho ataque suele adoptar la forma de surcos direccionales, cárcavas, ondas, agujeros redondeados, o valles.
Intergranular	La corrosión localizada en los límites de grano del metal o de la aleación sin ataque apreciable a los propios granos o cristales se denomina corrosión intergranular. Es el resultado de una diferencia de potencial entre los límites de grano anódicos y los granos. Cuando es grave, este ataque provoca una pérdida de resistencia y ductilidad hasta el punto de destruir el metal. La corrosión intergranular puede provocar el fallo completo del metal, aunque sólo esté afectada una pequeña parte de este. Este tipo de corrosión en acero inoxidable y algunas aleaciones. Se cree que este tipo de corrosión en el acero inoxidable y en algunas aleaciones de aluminio y cobre es el resultado de un tratamiento térmico inadecuado que provoca la precipitación de compuestos intergranulares. El medio de prevención más eficaz es la selección adecuada de la aleación y/o un tratamiento térmico apropiado.

## 2.3 Métodos de control para la corrosión

Existen diversos métodos para combatir la corrosión, incluyendo el diseño y la selección de los materiales, la protección catódica y anódica, los recubrimientos y los inhibidores de corrosión.

### 2.3.1 Diseño

Tener un diseño adecuado de estructuras metálicas puede que reduzca la velocidad de corrosión o evitarla. A continuación, se describe algunos aspectos a considerar.

1. Impedir la formación de celdas galvánicas: Las celdas galvánicas se generan por metales o aleaciones semejantes. Por ejemplo, es frecuente que tuberías de acero se conecten con conexiones de latón, esto produce que el acero se corroe. Con una conexión intermedia de plástico entre el acero y el latón, es problema se reduciría el mínimo.

2. Hacer que el área del ánodo sea mucho mayor que el área de cátodo: Por ejemplo, pueden usarse remaches de cobre para sujetar una lámina de acero. Debido a la pequeña área de los remaches de cobre, ocurra una reacción catódica limitada, por lo que el cobre acepta pocos electrones y la reacción anódica del acero continúe con lentitud. De lo contrario, si se usan remaches de acero para unir láminas de cobre, la pequeña área del ánodo de acero cede muchos electrones que son aceptados por el área grande del cátodo de cobre, de este modo la corrosión de los remaches de acero es muy rápida.

3. Diseñar los componentes de modo que los sistemas de los fluidos estén cerrados, no abiertos, para que no se acumulen charcos de agua estancada: Los depósitos parcialmente llenos sufren de corrosión por líneas de agua. Los sistemas abiertos disuelven continuamente gases, produciendo iones que participan en la reacción catódica y estimulan las celdas de concentración.

4. Evite hendiduras entre materiales ensamblados o unido: La soldadura puede ser una mejor técnica de unión que la soldadura fuerte, soldadura blanda o sujeción mecánica. Las celdas galvánicas se forman en la soldadura fuerte o la soldadura blanda porque los metales de relleno tienen diferente composición a la del metal que se une. Los sujetadores mecánicos producen hendiduras generadas por celdas de concentración. Si el metal de relleno es muy semejante al metal base, la soldadura puede impedir la formación de estas celdas.

5. En algunos casos, la rapidez de corrosión no puede reducirse a un nivel que no interfiera con la duración esperada del componente: En tales casos, el ensamble debe estar diseñado en forma tal que la parte corroída puede cambiarse fácil y económicamente.

### 2.3.2 Selección de materiales

Se refiere a la selección y empleo de materiales resistentes a la corrosión, tales como: acero inoxidable, plásticos y aleaciones especiales que alarguen la de vida útil de una estructura, por ejemplo, de la tubería. Sin embargo, en la selección de materiales resistentes a la corrosión el criterio fundamental no es, en esencia, la protección de una estructura, sino la protección o conservación del medio donde esta existe (Fernández, 1989).

### 2.3.3 Protección catódica

Este tipo protección consiste en suministrar electrones al metal y se fuerza al metal a ser el cátodo. La protección catódica se puede utilizar un anodo de sacrificio o un voltaje aplicado. El ánodo de sacrificio se une al material a proteger, formando así un circuito electroquímico, así como también el ánodo se corroe, cede electrones al metal y con ello impide una reacción anódica en el metal, por lo general se utiliza zinc o magnesio que es consumido totalmente y remplazado. Entre sus aplicaciones se ocupa para impedir la corrosión en tuberías enterradas, barcos, plataformas de perforación marinas y calentadores de agua. La protección catódica cuando se utiliza un voltaje aplicado de una corriente directa conectada entre un ánodo auxiliar y el metal a proteger, por lo en general, se conecta una batería de modo que los electrones se muevan hacia el metal, provocando que este sea el cátodo y el ánodo auxiliar por ejemplo se ocupa chatarra de hierro, esto se corroe (Askeland, 2017).

### 2.3.4 Protección anódica

Los metales situados cerca de extremo anódico de la serie galvánica son activos y sirven como ánodos en casi todas las celdas electrolíticas; no obstante, si se hace que estos metales sean más pasivos o catódicos, se corroe con más lentitud de la normal. La pasivación resulta si se produce una fuerte polarización anódica que impide la reacción anódica normal.

La pasivación se produce al exponer el metal a soluciones oxidantes altamente concentrados en caso de una pieza sumergida en ácido nítrico muy concentrado, se corroe la forma rápida y uniforme para formar una delgada capa protectora de hidróxido de hierro, por lo que, la capa protege al hierro de más corrosión ácido nítrico. También se puede generar pasivación si se

aumentar el potencial del metal a un potencial más positivo que el del equilibrio metal/disolución, aunque se podría pensar que esto conduciría a un aumento en la velocidad de corrosión, en ciertos metales la velocidad se vuelve cero (Askeland, 2017; Fernández, 1989).

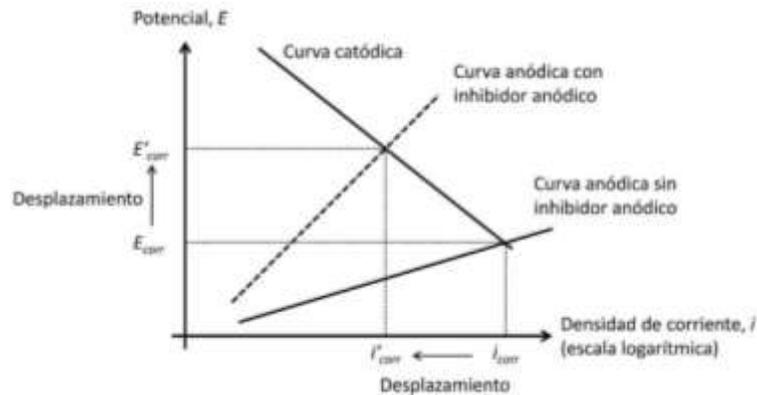
### 2.3.5 Inhibidores de la corrosión

Es una sustancia que se utiliza en pequeña proporción y, actuando sobre el metal o medio agresivo, reduce la velocidad de corrosión, a través de la modificación de sus procesos parciales anódico o catódico, o de ambos, dificultando su desarrollo, bien por precipitación de compuestos insolubles sobre la superficie metálica, o por formación de capas pasivantes o adsorbidas (Fernández, 1989).

#### 2.3.5.1 Clasificación de los inhibidores de corrosión

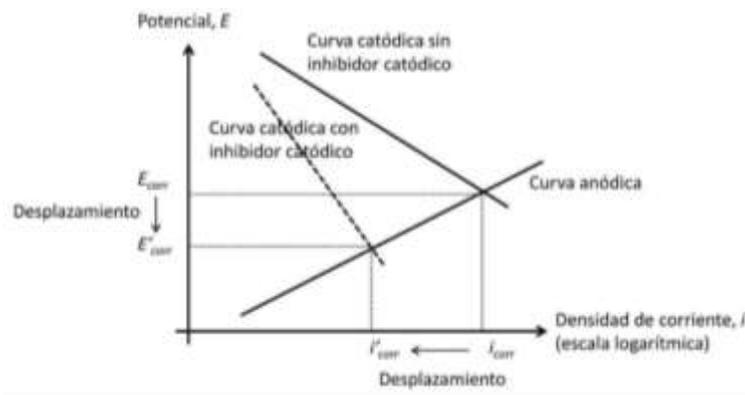
2.3.5.1.1 Según su modo de acción electroquímica los inhibidores se pueden clasificar en tres tipos: anódicos, catódicos o mixtos.

1. Los inhibidores anódicos son principalmente aquellos donde existe un agente oxidante, por ejemplo, sustancias con la habilidad de aceptar electrones en reacciones químicas redox. Un ejemplo de estos inhibidores es al utilizarse en acero, el inhibidor oxida el ion ferroso en ion férrico, permitiendo la formación de una capa pasiva densa sobre la superficie del acero, y así suprimiendo la parte anódica de la reacción de corrosión. El comportamiento electroquímico se puede observar en la Figura 1, la presencia de un inhibidor anódico provoca un desplazamiento en el potencial de corrosión (de  $E_{\text{corr}}$  a  $E'_{\text{corr}}$ ) y en la corriente de corrosión (de  $i_{\text{corr}}$  a  $i'_{\text{corr}}$ ), por lo tanto, la velocidad de corrosión es reducida y el potencial de corrosión se mueve a la zona más positiva (Salinas Martínez, 2019) .



**Figura 1.** Diagrama corriente-potencial mostrando el efecto de un inhibidor anódico sobre el proceso de corrosión

- Los inhibidores catódicos por otra parte disminuyen la reacción de reducción del proceso redox, por ejemplo, en el caso del acero expuesto a un medio acuoso, estos inhibidores actúan al precipitar una sal poco insoluble sobre la superficie del acero, esta barrera reduce el transporte del oxígeno a las zonas catódicas. Esto se puede explicar observando el comportamiento electroquímico en la Figura 2, la presencia de un inhibidor catódico provoca un desplazamiento del potencial de corrosión y de la corriente de corrosión que va de  $E_{corr}$  a  $E'_{corr}$  y de  $i_{corr}$  a  $i'_{corr}$  respectivamente. La velocidad de corrosión es reducida y el potencial de corrosión es desplazado hacia valores más negativos (Salinas Martínez, 2019).

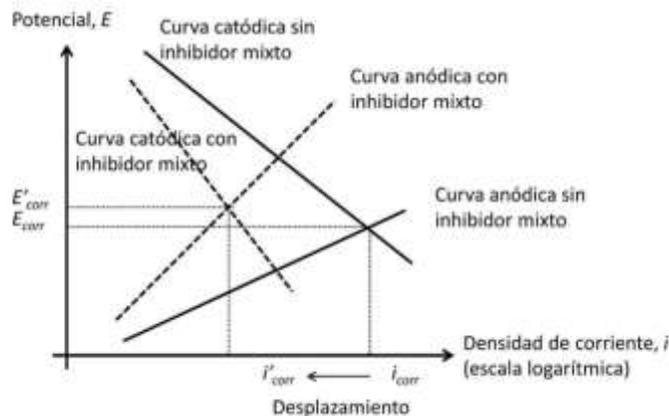


**Figura 2.** Diagrama corriente-potencial mostrando el efecto de un inhibidor catódico sobre el proceso de corrosión

- Los inhibidores mixtos son entonces aquellos que reducen la reacción anódica y catódica, por lo general estos inhibidores actúan por adsorción sobre la superficie metálica, formando una delgada capa protectora, al igual que en los otros tipos de inhibidores, la velocidad de corrosión disminuye, pero el cambio en el potencial de corrosión es mínimo,

y puede ser hacia el lado anódico o catódico, dependiendo de que reacción es más afectada, el efecto total es casi despreciable. En la Figura 3 se representa el comportamiento de este tipo de inhibidor (Salinas Martínez, 2019).

Las sustancias orgánicas que contienen grupos polares como nitrógeno, sulfuro u hidroxilo han demostrado ser efectivos inhibidores de corrosión mixtos. Las aminas y alcalonaminas son comúnmente utilizadas con este propósito.(Salinas Martínez, 2019).



**Figura 3.** Diagrama corriente-potencial mostrando el efecto de un inhibidor mixto sobre el proceso de corrosión

2.3.5.1.2 De acuerdo con su origen, los inhibidores se pueden clasificar en dos tipos: inhibidores químicos (Orgánicos, Inorgánicos) e inhibidores a partir de extractos naturales.

1. Inhibidores Químicos. Su origen proviene de sustancias químicas, generalmente de una mezcla de componentes solubles entre sí. A nivel mundial, son los más utilizados por la industria en la actualidad por la alta eficiencia de inhibición de la corrosión que proporcionan, pero su gran desventaja es su alta toxicidad. Estos inhibidores pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos.

- Los inhibidores químicos orgánicos están compuestos por moléculas carboxílicas con naturaleza polar, por lo que fácilmente son atraídos hacia las zonas donde se crean pares galvánicos productores de la corrosión. Se adsorben química o físicamente, muy frecuentemente la adsorción involucra transferencia de electrones entre la molécula orgánica y el metal (quimiadsorción), este proceso es bastante lento y requiere algún tipo de energía de activación. El proceso de acción del inhibidor ocurre en dos etapas, primero el compuesto orgánico se adhiere a través de sus grupos polares a la superficie

del metal y en la segunda etapa se da la formación de iones complejos, formando precipitados sobre la superficie (Santander Soazo, 2018).

- Los inhibidores inorgánicos son pasivantes, es decir son agentes oxidantes que pueden reducirse y actúan a pH entre 6 y 9. Al utilizarlos forman un óxido pasivante asociado muchas veces a la formación de trazas de hidróxidos. Existe una concentración crítica que mantiene pasivada la superficie de un metal, por ejemplo, para los nitratos, cromatos y molibdatos es entre  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$  M. Estos inhibidores son muy tóxicos, costosos y su utilización es bastante restringida (Santander Soazo, 2018).
2. Inhibidores verdes. Los inhibidores verdes se extraen de plantas y/o vegetales, se obtienen de manera más sencilla y con bajos costos en comparación con los inhibidores de tipo químico. Los extractos provenientes de vegetales pueden ser obtenidos desde cáscaras o el centro del vegetal, mientras que los extractos obtenidos a partir de árboles se obtienen desde sus frutos, flores, hojas, semillas, raíces y/o tallos. En los últimos 20 años ha aumentado la investigación de este tipo de inhibidor, demostrando que su capacidad inhibidora se atribuye principalmente a la presencia de compuestos orgánicos como saponinas, taninos, flavonoides y aminoácidos (Salleh et al., 2021), los cuales se adsorben en la interfaz metal-inhibidor formando una película protectora a la transferencia de carga y masa, disminuyendo la capacidad de interacción entre el metal y el medio al cual se encuentra expuesto, produciendo una disminución en la velocidad de corrosión (Santander Soazo, 2018).

## 2.4 Evaluación electroquímica

Existen distintas técnicas para la evaluación de los procesos de velocidad de corrosión que ocurren en los metales expuestos a medios corrosivos. En este trabajo de investigación se utilizaron dos técnicas de medición, una técnica de corriente directa (DC) como lo es TAFEL y una técnica de corriente alterna (AC), la cual lleva por nombre Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés, Electrochemical Impedance Spectroscopy)

### 2.4.1 Resistencia a la polarización lineal

La técnica electroquímica Resistencia a la Polarización Lineal (LPR)(García Inzunza, 2014; Gómez Chacón. Virginia L, 2016; Santander Soazo, 2018), fue desarrollada por Stern-Geary, la cual 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, registrándose las variaciones de potencial  $\Delta E$  y de corriente  $\Delta I$  en el sistema. La técnica LPR se utiliza para medir las velocidades de corrosión, generalmente expresadas mm/año. La ecuación para el cálculo de la velocidad de corrosión  $i_{corr}$  a partir de esta técnica es a través de la Ley de Ohm. La pendiente de una curva de polarización lineal es llamada resistencia a la polarización.

$$V = RI \quad Ec. 1$$

Despejando  $R$

$$R = \frac{V}{I} \quad Ec. 2$$

Donde  $I$  es la intensidad de corriente,  $R$  es la resistencia a la polarización la cual se representará por  $R_p$  y  $V$  es el potencial  $E$  en Volts. La resistencia de polarización se puede definir en función de los gradientes de potencial  $\Delta E$  y de corriente  $\Delta I$ .

$$pendiente = R_p = \frac{E}{I} = \frac{\Delta E}{\Delta i} \quad Ec. 3$$

La ecuación para el cálculo de la velocidad de corrosión desarrollada por Stern y Geary toma el nombre de los investigadores y se presenta en la ecuación 4.

$$i_{corr} = \frac{(\beta a \beta c) / [2.303(\beta a + \beta c)]}{R_p} = \frac{B}{R_p} \quad Ec. 4$$

En la cual  $\beta_a$  y  $\beta_c$  son las pendientes de Tafel anódica y catódica, respectivamente. Aplicando el concepto de las pendientes de Tafel se puede obtener la velocidad de corrosión de acuerdo con la ecuación 5.

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \quad Ec. 5$$

Si se divide la  $I_{corr}$  por unidad de área se obtiene la densidad de corriente de corrosión la cual es directamente proporcional a la velocidad de corrosión

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{Area}$$

La ecuación de Stern y Geary establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión  $i_{corr}$ , es decir, la velocidad de corrosión, con la resistencia a la polarización, la constante B sirve para pasar de la proporcionalidad a la igualdad y presenta una relación existente entre las pendientes de Tafel. Queda claro a partir de esta relación, que es indispensable la existencia del comportamiento Tafeliano en el sistema electroquímico, para que la ecuación (3) sea aplicable.

#### 2.4.2 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

La técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) (Alvarado Montalvo. Lucia G, 2005; Cabrera-Sierra et al., 2007; Camargo et al., 2009; Esteban Bedoya Lora & Andrés Calderón Gutiérrez, 2011; Pérez et al., 2000; Ramírez et al., 2008; Vázquez Gutiérrez, 2007), por sus siglas en inglés, es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo (metal en corrosión) y determinando la respuesta correspondiente.

En el procedimiento experimental más comúnmente usado de la EIS, se aplica una pequeña señal de potencial ( $E$ ) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente ( $I$ ) a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial - tiempo y corriente - tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina "espectro de impedancias". En el caso de los estudios de corrosión que utilizan la técnica de EIS, los espectros de impedancia obtenidos suelen ser analizados mediante circuitos eléctricos, compuestos por componentes tales como resistencias ( $R$ ), capacitancias ( $C$ ), inductancias ( $L$ ), etc. Combinados de tal manera que

reproduzcan los espectros de impedancia medidos. Estos circuitos eléctricos son denominados “circuitos eléctricos equivalentes”.

La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica ( $R$ ), utilizada en circuitos de corriente alterna ( $CA$ ). En un circuito de corriente directa ( $CD$ ) la relación entre la corriente ( $I$ ) y el potencial ( $E$ ) está dada por la ley de Ohm.

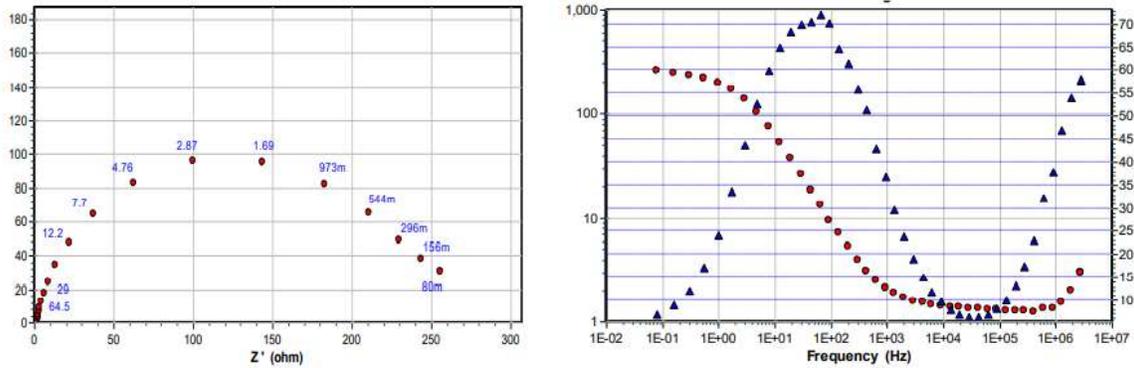
La impedancia de un sistema a cada frecuencia está definida por, la razón entre la amplitud de la señal de corriente alterna y la amplitud de la señal de potencial alterno y el ángulo de fase. Un listado de estos parámetros a diferentes frecuencias constituye el “espectro de impedancia”. El desarrollo matemático de la teoría que fundamenta la técnica de EIS permite describir la impedancia de un sistema en términos de un componente real y un componente imaginario (asociado a la raíz cuadrada de  $-1$ ).

Al obtener los espectros de impedancia se obtienen dos gráficos (Fig.4):

1. Nyquist. Este tipo de gráfico, también conocido como gráfico en plano complejo, corresponde a graficar  $-Z''$  contra  $Z'$ . Donde  $Z''$  es el valor de la impedancia imaginaria mientras  $Z'$  el valor de impedancia real.
2. Bode. Son representaciones de diferentes parámetros de la impedancia contra frecuencia y existen diferentes variantes.

Los gráficos de Bode más comunes son:

- a) Logaritmo base 10 del módulo de la impedancia ( $|Z|$ ) contra logaritmo base 10 de la frecuencia
- b) Ángulo de fase ( $\phi$ ) contra logaritmo base 10 de la frecuencia ( $f$ ). A diferencia de los gráficos de Nyquist, las representaciones de Bode contienen toda la información de un ensayo de EIS, ya que las frecuencias se identifican claramente



**Figura 4.** Diagrama de Nyquist, componente real ( $Z'$ ) vs. imaginario ( $Z''$ ) de la impedancia b) Diagrama de Bode de  $|Z|$  vs ángulo de fase ( $\varphi$ ) vs  $f$  para el acero inoxidable AISI 304 sumergido en  $H_2SO_4$  0.5M

El análisis de la información generada por la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica se puede interpretar mediante:

### 3. Gráfico

El análisis gráfico de un espectro de impedancia permite obtener parámetros relacionados con la cinética de corrosión de un metal en un medio dado. A partir de un diagrama de Nyquist es posible estimar el valor de la resistencia de la solución ( $R_{sol}$ ), como el límite a alta frecuencia de  $Z'$ . La suma de la “resistencia a la polarización” ( $R_p$ ) y  $R_{sol}$ , es igual al límite de  $Z'$  a bajas frecuencias. La capacitancia del sistema (asociada a la doble capa)  $C_{dl}$ , puede ser calculada a partir de la frecuencia en la cima del semicírculo del diagrama de Nyquist y del valor de  $R_p$ .

### 4. Circuitos Eléctricos Equivalentes

Un circuito equivalente es una combinación de elementos pasivos (resistencias, capacitancias, inductores y otras formas de impedancias distribuidas) que dan la misma respuesta a toda frecuencia, de una celda de corrosión. Cuando el análisis de los datos de EIS se realiza mediante un ajuste de los datos experimentales a un circuito eléctrico equivalente, se obtienen valores de diferentes parámetros eléctricos. Estos valores son utilizados para obtener información, tanto de velocidades de corrosión como de mecanismos de corrosión. El número de circuitos equivalentes que pueden cumplir el comportamiento de una celda de corrosión es prácticamente infinito. No obstante, existe una condición esencial para la selección de un circuito equivalente: tanto los componentes del circuito, como el circuito eléctrico en sí mismo, deben tener explicación física. Esto es de particular importancia ya que usualmente pueden existir varios circuitos equivalentes que describan con la misma exactitud los datos experimentales.

## 2.5 Disolventes eutécticos profundos

Los disolventes eutécticos profundos (DES, por sus siglas ingles) son sistemas formados por una mezcla eutéctica, entre ácidos de Lewis o de Bronsted y bases que contienen una variedad de especies aniónicas y/o catiónicas, que presentan enlaces tipo puente de hidrógeno entre sus componentes (Torres Palacio, 2021). Los DES son una alternativa de los líquidos iónicos, en la tabla 2 se presenta una comparación entre los líquidos iónicos y los DES.

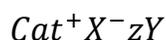
**Tabla 2** .Comparación de los Disolventes eutécticos profundos vs Líquidos iónicos

<b>Parámetro</b>	<b>Disolventes eutécticos profundos (DES)</b>	<b>Líquidos Iónicos (IL)</b>
<b>Síntesis</b>	Preparación sencilla sin reacción química ni pasos de purificación	Reacciones multipasos y purificación necesaria
<b>Estabilidad térmica</b>	Temperatura de descomposición inferiores a los 200°C	Temperaturas de descomposición entre 300°C y 400°C
<b>Densidad</b>	Mayores valore de densidad > 1 g/cm <sup>3</sup>	Poseen bajas densidad 0.8 g/cm <sup>3</sup> -1.6 g/cm <sup>3</sup>
<b>Viscosidad</b>	Altas viscosidades (>100 mPa·S)	Bajas viscosidades (10 mPa·S - 726 mPa·S)
<b>Toxicidad</b>	No tóxicos, biodegradabilidad considerada como solventes verdes	Baja biodegradabilidad, toxicad aumenta con el aumento en la cadena aquilica del catión
<b>Reciclabilidad</b>	Reciclables y reusables	Dificultad de reciclarse
<b>Costo</b>	Menos costoso que los IL	Altamente costoso

En los Sistemas de Disolventes Profundos (DES), la interacción se establece mediante puentes de hidrógeno, los cuales son la fuerza predominante en las mezclas eutécticas entre el compuesto aceptor (HBA) y el compuesto donador (HBD). La fuerza de estos enlaces de hidrógeno en los DES se sitúa en un punto intermedio entre un enlace covalente y una fuerza de Van der Waals. Por lo tanto, la fuerza física clave que conduce a la formación del DES, está relacionada con el proceso de deslocalización de carga resultante por la formación del enlace

de hidrógeno intermolecular. Es decir, el componente aceptor (HBA) y el donante de enlaces de puente de hidrógeno (HBD) se autoasocian, generando una deslocalización de carga que disminuye la fuerza del enlace iónico, causando que el punto de congelación de la mezcla sea mucho menor comparado con cada uno de sus componentes individuales; donde, la fuerza de este enlace depende de en gran medida de la estructura de los componentes de la mezcla (Torres Palacio P, 2021).

Los disolventes eutécticos profundos se pueden describir mediante la fórmula general



Donde  $Cat^+$  es en principio cualquier catión de amonio, fosfonio o sulfonio, y  $X^-$  es una base de Lewis, generalmente un anión haluro. Las especies aniónicas complejas se forman entre  $X^-$  y un ácido de Lewis o de Brønsted  $Y$  ( $z$  se refiere al número de moléculas de  $Y$  que interactúan con el anión). La mayoría de los estudios se han centrado en los cationes de amonio cuaternario, con especial énfasis en los sistemas más prácticos que utilizan cloruro de colina (Smith et al., 2014).

Los DES se clasifican en gran medida según la naturaleza del agente complejante utilizado, como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3.** Tipos de DES

TIPO	FORMULA GENERAL	Términos
TIPO I	$Cat^+ X^- zMCl_x$	$M = Zn,^{1,5,6} Sn,^7 Fe, Al,^8 Ga,^9 In^{10}$
TIPO II	$Cat^+ X^- zMCl_x \cdot yH_2O$	$M = Cr,^{11} Co, Cu, Ni, Fe$
TIPO III	$Cat^+ X^- zRZ$	$Z = CONH_2,^{12} COOH,^{13} OH^{14}$
TIPO IV	$MCl_x + RZ = MCl_{x-1} \cdot RZ + MCl_{x+1}$	$M = Al, Zn$ and $Z = CONH_2, OH$

#### DES tipo 1

La gama de haluros metálicos no hidratados que tienen un punto de fusión adecuadamente bajo para formar DES (Smith et al., 2014).

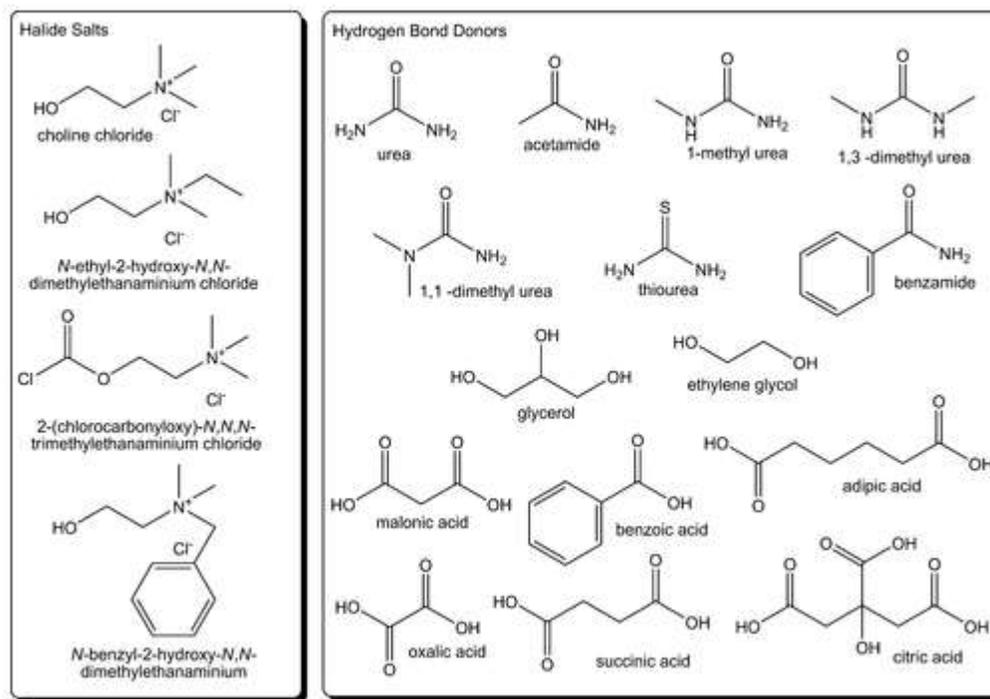
#### DES tipo II

El alcance de los solventes eutécticos profundos se puede aumentar mediante el uso de haluros metálicos hidratados y cloruro de colina (DES tipo II). El costo relativamente bajo de

muchas sales metálicas hidratadas junto con su inherente insensibilidad al aire/humedad hace viable su uso en procesos industriales a gran escala (Smith et al., 2014).

### DES tipo III

Son formados a partir de cloruro de colina y donantes de enlaces de hidrógeno (Figura 5), han sido de interés debido a su capacidad para solvatar una amplia gama de especies de metales de transición, incluidos los cloruros y óxidos. Hasta la fecha, se ha estudiado una variedad de donantes de enlaces de hidrógeno, con solventes eutécticos profundos formados usando amidas, ácidos carboxílicos y alcoholes (Smith et al., 2014).



**Figura 5.** DES para formar de tipo III (Smith et al., 2014)

### DES tipo IV

Abbot et al. Ha demostrado que se pueden incorporar una gama de metales de transición en los eutécticos a temperatura ambiente, y estos ahora se han denominado DES tipo IV. Se espera que estas sales metálicas no se ionizaran normalmente en medios no acuosos; sin embargo, se ha demostrado que  $ZnCl_2$  forma eutécticos con urea, acetamida, etilenglicol y 1,6-hexanodio (Smith et al., 2014).

## Capítulo 3 Revisión del estado del tema

En el desarrollo de la revisión bibliográfica se encontraron investigaciones relevantes en tema inhibidores de la corrosión a partir de extractos naturales. Se presentan en función de la aportación para dicha investigación:

1. Herrera-Hernández et al., 2015 presentaron una investigación del extracto de Aloe-vera(gel) como inhibidor de la corrosión alcanzado una eficiencia de inhibición 83%. El cual se probó en un sistema de acero estructural expuesto en un medio corrosivo de 1 M de ácido clorhídrico (HCl). La extracción de este gel en forma pura utilizando el método de incisión, que consiste en seccionar la parte superior y posterior de la hoja para dejar expuesto a la sustancia cristalina. A partir de los resultados electroquímico se determinó que el mecanismo con el cual se adhiere a la superficie del metal es del tipo fisorción, con una energía estándar de adsorción  $-14.17 \text{ KJ/mol}$ .
2. La investigación realizada por (Mara F et al., 2018) sobre el extracto de la morinda citrifolia que han demostrado que es un excelente inhibidor de la corrosión, han alcanzado valores hasta un 90 % de eficiencia para reducir la velocidad de corrosión. Por lo cual se probó en un sistema de acero 1045 en un medio corrosivo 0.5 M de ácido clorhídrico (HCl). La obtención del extracto, primero trituraron las hojas y los secaron a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 48 h, posteriormente pesaron 5 g de hojas y lo disolvieron en agua en 50 ml, durante tres días y bajo constante agitación se mantuvo en maceración, al final se separaron las hojas y el extracto por filtración. Han comprobado experimentalmente que el proceso de inhibición tiene un lugar por la adsorción de las moléculas orgánicas por un proceso fisorción.
3. En el estudio realizado por (Vergara Sotomayor et al., 2018, sobre extracto de hojas de annona muricata L (guanábana) que fue capaz para inhibir de la corrosión, donde utilizaron dos solventes (agua y etanol) para extraer el extracto, el de mayor efecto para inhibir la corrosión es el extracto acuso con una eficiencia del 96.7% a una temperatura de  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  y el extracto etanoico con una eficiencia 94.5 % a una temperatura de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . El cual se probó en un sistema de acero 1008 en un medio corrosivo de 1 M de ácido clorhídrico (HCl).

4. En 2018, Arul X y Vijayalakshmi U presentaron un estudio sobre el uso de extractos de residuos de cáscara de naranja como inhibidores ecológicos de la corrosión para acero dulce en un medio de ácido clorhídrico (HCl) 1M. Utilizando un 0.25% de extracto de cáscara de naranja, lograron una eficiencia de inhibición (EI) del 99.19% mediante la técnica de pérdida de peso. En pruebas electroquímicas, alcanzaron una EI del 95.10% utilizando espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), mientras que la polarización potenciodinámica mostró una EI del 95.36%. Además, identificaron la presencia de grupos fenólicos  $-OH$ , grupos carbonilo  $C=O$  y grupos insaturados  $C=C$ ,  $C=H$  mediante espectro IR, indicando la presencia de compuestos con heteroátomos. Estos grupos funcionales actúan como sitios activos para el proceso de adsorción en los sustratos metálicos.
  
5. En 2015, Fiori-Bimbi y colaboradores llevaron a cabo una investigación sobre la pectina extraída de cáscaras de limón como un inhibidor ecológico de la corrosión para acero dulce en soluciones de ácido clorhídrico (HCl) 1M. La evaluación de la eficacia de la pectina como inhibidor se realizó mediante la técnica de pérdida de peso durante 1 hora, logrando una eficiencia de inhibición del 94.2% con una concentración de inhibidor de 2g/L y a una temperatura máxima de 318 K. Además, mediante las curvas de polarización potenciodinámica, se determinó que la pectina actúa como un inhibidor de tipo mixto.
  
6. En 2018, Liao y su equipo llevaron a cabo una investigación sobre la extracción de un inhibidor ecológico de la corrosión a partir de residuos de cáscara y semilla de lichi para su aplicación en acero dulce en medio de ácido clorhídrico (HCl) 0.5M. La evaluación del inhibidor se realizó mediante pruebas electroquímicas y pérdida de peso utilizando un extracto etanólico de cáscara y semilla de lichi a una concentración de 600 mg/L, obtenido mediante ultrasonido durante 1.5 horas. Este proceso y tiempo de extracción demostraron tener un efecto especialmente positivo en la inhibición de la corrosión.  
  
Mediante la técnica de polarización potenciodinámica, se logró una eficiencia de inhibición (EI) del 97.95%, mientras que la espectroscopia de impedancia electroquímica proporcionó una EI del 97.75%. Por último, utilizando el método de pérdida de peso, se alcanzó una EI del 87.04%.

7. Se realizó un estudio por los (M'hiri et al., 2016) sobre el comportamiento de antioxidantes presentes en extracto de cáscara de naranja como inhibidor verde corrosión para el acero al carbón en medio de ácido clorhídrico (HCl) 0.1M, el medio corrosivo se combinó en una mezcla de agua/ etanol (50/50 vol. %). El extracto se obtuvo a partir de 5g de polvo de cáscara y 150 ml de una mezcla etanol/agua (80/20 vol.%) mediante agitación mecánica a 35 °C. Después de la centrifugación y filtración (0,2 µm), los extractos se almacenaron a 4°C. La eficacia del inhibidor se evaluó mediante pruebas espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) durante un período de 8 horas, logrando obtener una eficiencia de inhibición (EI) del 95% con el extracto diluido al 10%.

Es por ello que los trabajos mencionados con antelación tienen una importancia dentro de esta investigación debido a la diferencia de obtención de los extractos, el sistema de estudio (acero AISI 1045/ NaCl o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y las condiciones de pruebas electroquímicas (EIS y RPL).

# Capítulo 4 Metodología

La parte experimental de este estudio se dividió en tres etapas. En la primera etapa, se detalla la preparación de los disolventes eutécticos profundos (DES), la extracción de extractos a partir de cáscaras de cítricos con DES y la elaboración de medios corrosivos. En la segunda etapa, se describe el montaje de celda electroquímica y la preparación de electrodo de trabajo. Por último, se aborda la evaluación de los extractos como inhibidores verdes de la corrosión por medio de pruebas electroquímicas.

## 4.1. Etapa 1

### 4.1.1 Preparación disolventes eutécticos Profundos (DES)

La elaboración de los distintos de los disolventes eutécticos profundos (DES) se llevó a cabo utilizando cloruro de colina (ChCl) con una pureza del 98%, en combinación con etilenglicol (EG) de pureza del 99.8% en una relación molar de 1:2 M para obtener Ethaline, y ChCl con urea con una pureza del 98% en una relación molar de 1:2 M para obtener Reline (Ahmed et al., 2021). Durante el proceso de la elaboración de los DES, las sales (ChCl, Urea) se calentaron a 80°C en una estufa durante 2 horas para eliminar el exceso de humedad. Posteriormente, se mezclaron las sustancias para obtener Ethaline y Reline. Finalmente, los DES, se dejaron reposar durante 24 horas con agitación constante y se calentaron a 40°C. A continuación, se presentan los cálculos de las sustancias para la elaboración de los DES en 0.5 litro de solución.

EG 2M

$$2 \frac{\text{mol}}{\text{L}} * 62.07 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 0.5\text{L} * \frac{100\%}{99.8\%} * \frac{1\text{ml}}{1.113 \text{ g}} = 55.87\text{ml}$$

Urea 2M

$$2 \frac{\text{mol}}{\text{L}} * 60.06 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 0.5\text{L} * \frac{100\%}{98\%} = 61.28 \text{ g}$$

ChCl 1M

$$1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} * 139.62 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 0.5\text{L} * \frac{100\%}{98\%} = 71.23 \text{ g}$$

#### 4.1.2 Extracción de extracto de cáscara de cítricos con DES

Se prepararon extractos a partir de cáscara de naranja y toronja utilizando diferentes disolventes eutécticos profundos (DES), específicamente Ethaline y Reline. La cáscara se trituró en trozos pequeños y se sometió a calentamiento a 60°C en una estufa durante tres horas para reducir el contenido de humedad. Posteriormente, se mezclaron 50 ml de cada DES (Ethaline y Reline) con 30 g de cáscara de naranja o toronja, obteniendo así cuatro extractos diferentes.

#### 4.1.3 Elaboración de medios corrosivos

Se elaboró los medios corrosivos para someter el acero AISI 1045 a pruebas electroquímicas. El primer medio consistió en cloruro de sodio (NaCl) al 5% wt, con una pureza del 99 %, mientras que el segundo medio fue una solución de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) al 1M, con una pureza del 96.5%, y una densidad 1.840 g/ml. A continuación, se presentan los cálculos de la preparación de medios corrosivos en 0.250 litro de solución.

NaCl 5% w%

$$5\% P/P = \frac{X_{\text{Soluto}}}{X_{\text{Solucion}}} * 100$$
$$X_{\text{Soluto}} = 5\% * \frac{250g}{100} * \frac{100\%}{99\%} = 12.62g$$
$$X_{\text{Solucion}} = X_{\text{Soluto}} + X_{\text{Solvente}}$$
$$X_{\text{Solvente}} = 250g - 12.62 = 237.38g$$

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M

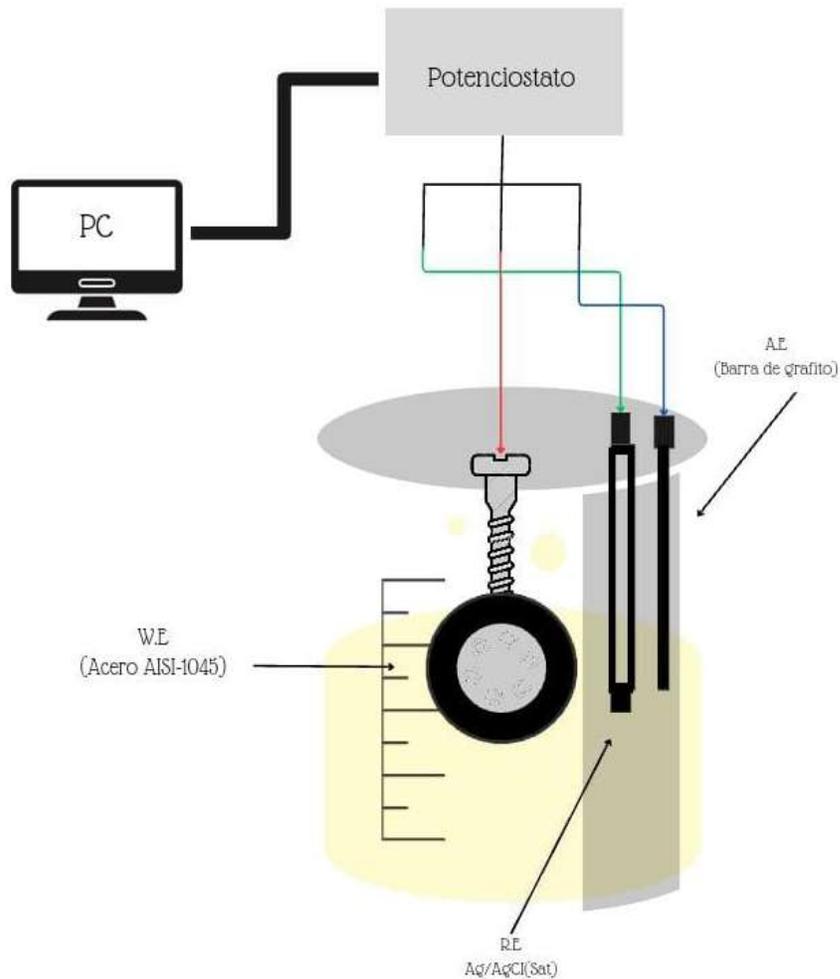
$$1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} * 98.08 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 0.250 \text{ L} * \frac{100\%}{98\%} * \frac{1\text{ml}}{1.84 \text{ g}} = 13.59 \text{ ml}$$

## 4.2 Etapa 2

### 4.2.1 Montaje de celda electroquímica

Para el montaje de la celda electroquímica, se utilizaron tres electrodos típicos, tal como se muestra en la Figura 6. Estos electrodos se emplearon para llevar a cabo pruebas de

espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y resistencia a la polarización lineal (LPR). La configuración consistió en un electrodo de trabajo (WE) de acero AISI 1045, una barra de grafito utilizada como contraelectrodo (CE) y un electrodo de referencia (RE) de Ag/AgCl(sat).



**Figura 6.** Montaje de Celda Electroquímica

#### 4.2.2 Preparación de probeta

Para el electrodo de trabajo (WE) se utilizó una barra de acero AISI -1045 con una composición química que se muestra en la Tabla 3. Se cortaron barras de acero con un espesor 1 cm y un

área de exposición de 1.32 cm<sup>2</sup>. Posteriormente, a cada una de las barras de acero se utilizó resina para encapsular metal y perforar para colocar un tornillo por un lado de espesor. Antes de colocar el tornillo y fijarlo con pegamento, se sometieron las probetas a un proceso de limpieza mediante ultrasonido para eliminar impurezas. Finalmente, se realizó un desbastado mecánico en la superficie de las probetas utilizando papel abrasivo de carburo de silicio (SiC) con diferentes granulometrías: 220, 340, 400, 600, 1200 y 2000.

**Tabla 4.** Composición química del acero AISI 1045(Bohórquez et al., 2012)

% C	%Mn	%Si	%P	%S
0.43-0.50	0.60-0.90	0.15-0.35	<0.04	<0.05

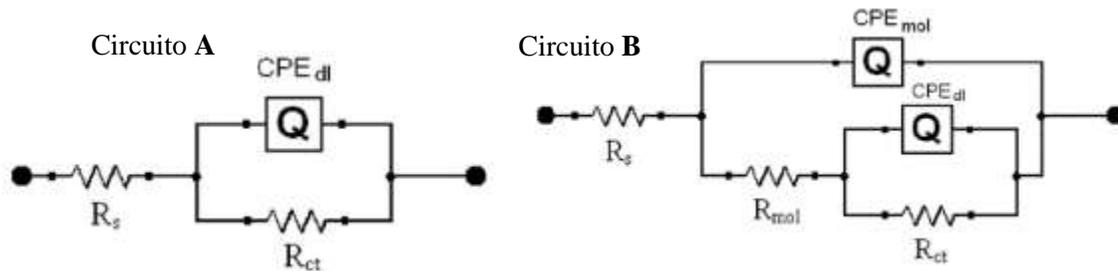
### 4.3 Etapa 3 Evaluación del Inhibidor verdes de la corrosión

La evaluación de los extractos como inhibidores verdes de la corrosión se llevó a cabo variando el volumen de los inhibidores desde 0 µL hasta 2000 µL. En cada prueba electroquímica, se agregó gradualmente el inhibidor y se aplicó agitación constante durante tres minutos. Además, se limpió el electrodo de trabajo utilizando papel abrasivo de carburo de silicio de grano 1200 y 2000 antes de cada prueba.

#### 4.3.1 Espectroscopia de impedancia electroquímicas (EIS)

Para obtención de datos de EIS se utilizó un potenciostato/Galvanostato de la marca admiral instruments con software Squidstat User Interfaz v2.11.19.2020. Estableciendo condiciones de trabajo tales como: aplicando un potencial sinusoidal de ±10 mV y un barrido de frecuencia de 2000 Hz hasta 0.01 Hz. Las pruebas se realizaron a temperatura ambiente y en 50ml de solución de 5%wt de NaCl y 1M de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> más inhibidor y en condiciones estacionarias.

Teniendo en cuenta la característica representada por los gráficos de impedancia registrados en ausencia y presencia de los inhibidores, se decidió utilizar los circuitos eléctricos equivalentes (ECC) que se muestran en la Figura 10 para simular los diagramas de impedancia generados experimentalmente.



**Figura 7.** Representa los circuitos eléctricos equivalentes utilizados para la simulación de espectros de impedancia para (Circuito A) en ausencia (en blanco) y (Circuito B) en presencia del inhibidor (DES + cascara de naranja o DES +Cascara de toronja)

El circuito A consiste solo en una resistencia de solución ( $R_s$ ), resistencia de transferencia de carga ( $R_{tc}$ ) y un elemento de fase constante (Q). Estos accesorios pueden indicar que, para el objetivo, solo una constante de tiempo está presente y está relacionada con el proceso de transferencia de carga (Aldana-González et al., 2020; Palomar-Pardavé et al., 2012). Para el circuito B consiste en dos resistencias paralelas de los procesos que tienen lugar en la interfaz metal-solución, durante la formación de la película (Aldana-González et al., 2020). El primero está relacionado con un proceso faradaico que involucra resistencia a la transferencia de carga ( $R_{tc}$ ) y el segundo proceso puede atribuirse a moléculas de resistencia ( $R_{mol}$ ) asociadas con la formación de una película en la superficie metálica debido a la adsorción de moléculas inhibitoras (Aldana-González et al., 2020; Palomar-Pardavé et al., 2012). Además de se incluyen dos elementos de fase constante (Q), uno atribuye moléculas y el otro está relacionado con la transferencia de carga. La resistencia a la polarización ( $R_p$ ) se puede estimar por la suma de  $R_{tc}$  y  $R_{mol}$  (Aldana-González et al., 2020).

Para determinar la eficiencia de los inhibidores, se utilizó la siguiente Ecuación (6) (Aldana-González et al., 2020; Arul. Xavier S & Vijayalakshmi. U, 2018; Liao et al., 2018; M'hiri et al., 2016; Palomar-Pardavé et al., 2012) a partir de los valores de transferencia de carga ( $R_{tc}$ )

$$\text{Eficiencia de Inhibición (\%)} = \frac{R_{tc(\text{inh})} - R_{tc(\text{blanco})}}{R_{tc(\text{inh})}} * 100 \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:  $R_{tc(\text{inh})}$  y  $R_{tc(\text{blanco})}$  son los valores de resistencia de transferencia de carga con y sin inhibidor, respectivamente.  $R_{tc}$  puede interpretarse como un término eléctrico que es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión.

#### 4.3.2 Resistencia a la polarización lineal (LPR)

Para la técnica Rp se utilizó un potenciostato/Galvanostato de la marca admiral instruments con software Squidstat User Interfaz v2.11.19.2020 con las siguientes condiciones de trabajo: se aplicó un barrido potencial de -0.5V hasta 0.5V con una velocidad de barrido de 10 mV/s. Las pruebas se realizaron a temperatura ambiente y en 50ml de solución de 5%wt de NaCl y 1M de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> más inhibidor y en condiciones estacionarias.

Para determinar la eficiencia de los inhibidores mediante esta técnica, se utilizó la Ecuación (7) (Arul. Xavier S & Vijayalakshmi. U, 2018; Liao et al., 2018; Mara F et al., 2018) a partir de los valores de la densidad de corriente de corrosión  $i_{(corr)}$ .

$$\text{Eficiencia de Inhibición (\%)} = \frac{i_{\text{corr}(\text{blanco})} - i_{\text{corr}(\text{inh})}}{i_{\text{corr}(\text{blanco})}} * 100 \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:  $i_{\text{corr}(\text{blanco})}$  es la densidad de corriente de corrosión sin inhibidor y  $i_{\text{corr}(\text{inh})}$  es la densidad de corriente de corrosión con inhibidor.

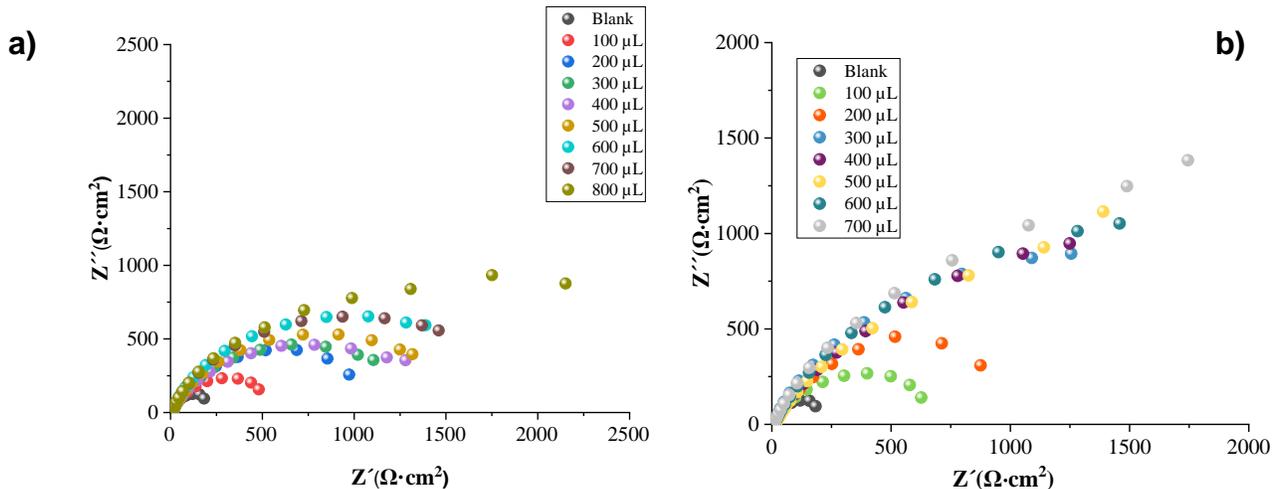
# Capítulo 5 Resultados y Discusiones

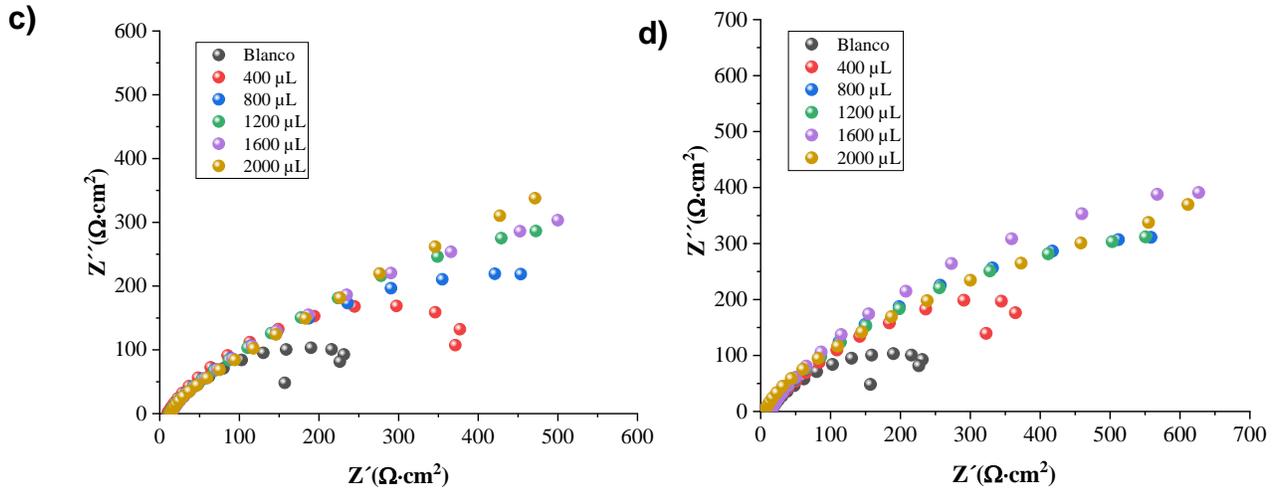
## 5.1 Espectroscopia de Impedancia electroquímica (EIS)

### 5.1.1 Diagramas de Nyquist en medio de Cloruro de sodio (NaCl) al 5% wt.

En la Figura 8 se muestra los diagramas típicos de impedancia (representación de Nyquist  $Z_{real}$  vs.  $Z_{imag}$ ) del acero AISI-1045 inmerso en un sistema de 50 ml de NaCl al 5% wt con o sin las adiciones de los inhibidores de cáscaras de naranja con Ethaline (8.a), cáscaras de naranja con Reline (8.b), cáscaras de toronja con Ethaline (8.c) y cáscaras de toronja con Reline (8.d) a diferentes volúmenes. Los diagramas EIS muestran la presencia de un semicírculo no muy bien definido con una magnitud en su diámetro de  $240 \Omega \cdot \text{cm}^2$  para el acero sin los inhibidores.

En los diagramas de Nyquist del extracto de cáscara de naranja con Ethaline (Figura 8.a), se observa un aumento en el diámetro del semicírculo ( $Z_{real}$ ) a medida que se añade el inhibidor, la transferencia de carga ( $R_{tc}$ ) aumenta de 500 hasta  $2500 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , mientras en caso extracto de cascara de naranja con Reline (Figura 8.b) 600 hasta  $1800 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . En caso de los extractos de cáscaras de toronja con Ethaline (Figura 8.c) y Reline (Figura 8.d) aplicados en este medio no presenta un efecto positivo, ya que  $R_{tc}$  no aumenta.





**Figura 8.** Diagramas de Nyquist para un acero AISI-1045 inmerso en 5% wt de NaCl en la adición de de inhibidores de cáscara de naranja con a) Ethaline b) Reline y cáscara de toronja con c) Ethaline d) Reline

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los parámetros de impedancia para el acero AISI-1045 inmerso en 5% wt de NaCl con o sin las adiciones de los inhibidores de cáscara de naranja con Ethaline y Reline. Los resultados se obtuvieron a partir de los circuitos eléctricos equivalentes que se muestra en la Figura 7.

Se aprecia que el valor de  $R_{tc}$  aumenta para el acero AISI-1045 a medida que se va aumentando la cantidad del volumen de los inhibidores (cáscara de naranja con Ethaline y Reline), indicando que la carga de iones en la doble capa electroquímica desciende, esto indica la posible formación de una película protectora por lo que impide el deterioro del acero por corrosión. Además, en la Tabla 5 se presenta el porcentaje de eficiencia de inhibición (% EI) perteneciente a la ecuación 6, como se puede notar que a los 700 $\mu$ L de inhibidor de cáscara de naranja con Reline se logró obtener EI 89.76% siendo el inhibidor más efectivo en el sistema 5% wt de NaCl.

**Tabla 5.** Parámetros de impedancia para el acero AISI-1045 inmerso en 5% wt de NaCl en presencia de los inhibidores

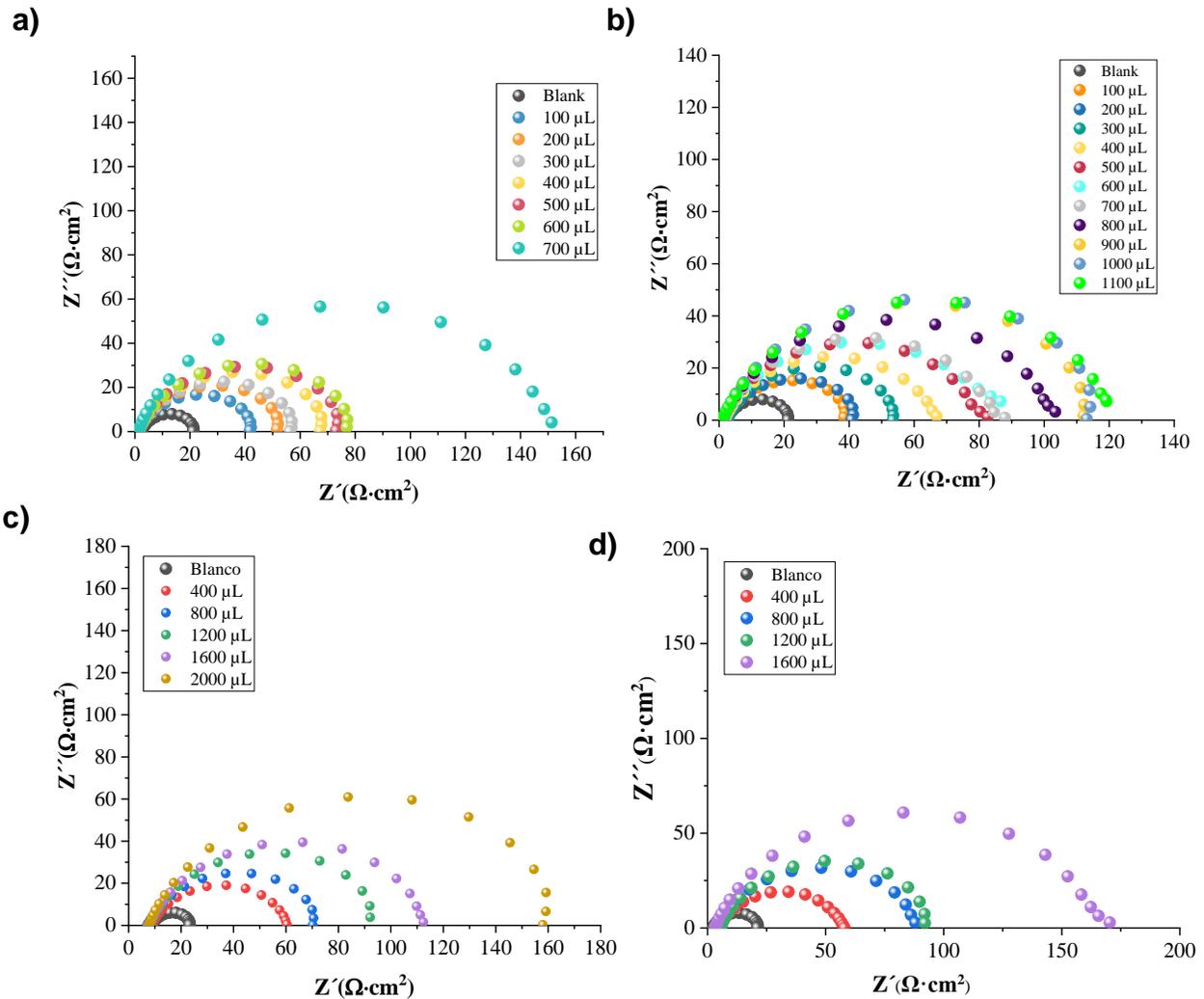
Inhibidor de cáscara de naranja con Ethaline									
Muestra (μL)	$R_s$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$Q_{dl}$ ( $\mu\text{F cm}^{-2}$ ) $\cdot 10^{-4}$	n	$R_{mol}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$Q_{dl}$ ( $\mu\text{F cm}^{-2}$ ) $\cdot 10^{-4}$	n	$R_{tc}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	%EI
Blanco	5.57				1.73	0.85	318.56	318.56	
100	7.53	8.65	0.94	106.19	1.41	0.90	634.46	740.65	<b>49.79</b>
200	12.91	1.59	0.88	130.08	1.51	0.78	1353.87	1483.95	<b>76.47</b>
300	10.75	3.54	1.00	278.21	3.21	0.80	1460.06	1738.27	<b>78.18</b>
400	14.11	7.34	0.85	279.80	2.52	0.79	1606.06	1885.86	<b>80.17</b>
500	15.58	1.54	0.79	428.59	1.90	0.80	1725.52	2154.12	<b>81.54</b>
600	11.83	7.46	0.84	716.76	2.21	0.83	1773.31	2490.06	<b>82.04</b>
700	6.58	2.03	0.80	829.31	1.90	0.65	2094.52	2923.83	<b>84.79</b>
800	10.80	8.29	0.99	841.39	1.99	0.81	2694.47	3535.86	<b>88.18</b>
Inhibidor de cáscara de naranja con Reline									
Muestra (μL)	$R_s$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$Q_{dl}$ ( $\mu\text{F cm}^{-2}$ ) $\cdot 10^{-4}$	n	$R_{mol}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$Q_{dl}$ ( $\mu\text{F cm}^{-2}$ ) $\cdot 10^{-4}$	n	$R_{tc}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	%EI
Blanco	5.57				1.73	0.85	318.56	318.56	
100	10.12	5.92	0.99	250.86	3.11	0.83	687.55	938.42	<b>53.67</b>
200	15.00	1.44	0.99	685.30	3.63	0.82	755.25	1440.55	<b>57.82</b>
300	9.81	6.83	0.87	1327.33	3.45	0.82	2002.93	3330.26	<b>84.10</b>
400	11.99	5.20	0.99	1365.82	3.84	0.77	2229.91	3595.73	<b>85.71</b>
500	19.80	3.80	0.99	1486.61	3.86	0.76	2389.19	3875.79	<b>86.67</b>
600	12.41	4.31	0.84	1541.03	3.18	0.77	2521.92	4062.94	<b>87.37</b>
700	10.74	4.53	0.99	1619.34	2.81	0.80	3109.92	4729.26	<b>89.76</b>

### 5.1.2 Diagramas de Nyquist de EIS en medio de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 1M

La Figura 9 muestran los diagramas de impedancia (Nyquist) del acero AISI-1045 inmerso en 50 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1M con o sin las adiciones de los inhibidores de cáscaras de naranja con Ethaline (9.a), cáscaras de naranja con Reline (9.b), cáscaras de toronja con 9.c) y cáscaras de toronja con Reline (9.d) a diferentes volúmenes. Los diagramas EIS para el blanco que no contiene algunos de los inhibidores presenta un semicírculo muy definido con una magnitud en su diámetro de  $22 \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

Durante el proceso de inhibición de los inhibidores se aprecia un incremento en la resistividad a la corrosión del acero, esto se observa al incrementar la magnitud del semicírculo ( $Z_{real}$ ) a medida que se agrega los inhibidores. Sin embargo, la transferencia de carga ( $R_{tc}$ ) aumenta

de 40, 80, 100 hasta 120  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  para el caso de extracto cáscaras naranja con Ethaline (Figura 9.a), mientras que para el extracto cáscaras naranja con Reline (Figura 9.b) la transferencia de carga aumenta de 40, 60 80 hasta 150  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , para el extracto cáscaras toronja con Ethaline (Figura 9.c) Rtc de 60, 100, 120 hasta 160  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , finalmente el extracto cáscaras toronja con Reline (Figura 9.d) la Rtc aumenta 55 hasta 175  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ .



**Figura 9.** Diagramas de Nyquist para un acero AISI-1045 inmerso en 1M de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en la adición de de inhibidores de cáscara de naranja con a) Ethaline b) Reline y cáscara de toronja con c) Ethaline d) Reline

La Tabla 6 muestra los resultados de los parámetros de impedancia para el acero AISI-1045 inmerso en 1 M de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> con o sin las adiciones de los inhibidores. Estos resultados se calcularon mediante los circuitos eléctricos equivalentes que se muestra en la Figura 7. Como se puede notar el valor de R<sub>tc</sub> aumenta para el acero a medida que se va aumentando el volumen de los inhibidores, indicando que la carga de iones en doble capa electroquímica desciende, por lo que se presenta la formación de una película de moléculas de forma espontáneamente para evitar el deterioro del acero. También se presenta el porcentaje de la eficiencia de inhibición (%EI) que se determinó por la ecuación 6. Como se puede notar que el mejor inhibidor es las cascaras de naranja con Reline, logrando una EI 85.91% a 700 µL de inhibidor y el extracto de cascaras de toronja con Reline es el menos eficiente por su mayor volumen para hacer inhibir al sistema (medio/metal) logrando hasta 2000 µL.

**Tabla 6.** Parámetros de impedancia para el acero AISI-1045 inmerso en 1M de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en presencia de los inhibidores

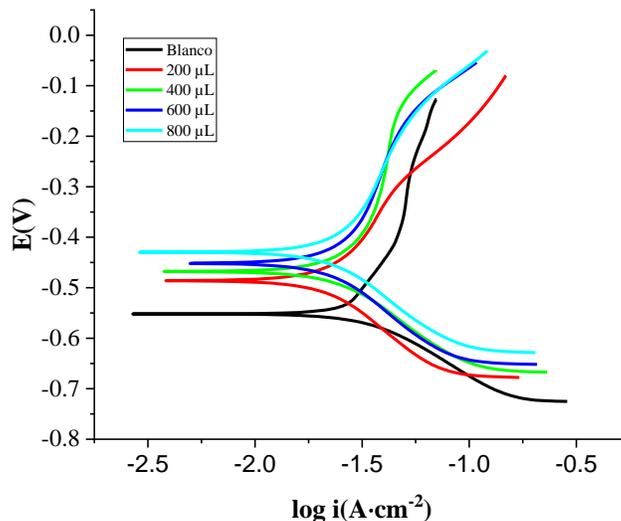
Inhibidor de cáscara de naranja con Ethaline									
Muestra (µL)	R <sub>s</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	Q <sub>dl</sub> (µF cm <sup>-2</sup> ) *10 <sup>-4</sup>	n	R <sub>mol</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	Q <sub>dl</sub> (µFcm <sup>-2</sup> ) *10 <sup>-4</sup>	n	R <sub>tc</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	R <sub>p</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	%EI
Blanco	3.18				3.71	0.85	26.16	26.16	
100	3.14	1.03	0.94	6.37	2.43	0.78	43.99	50.36	<b>40.53</b>
200	3.09	3.10	0.99	7.03	2.73	0.83	48.05	55.08	<b>45.55</b>
300	3.35	5.87	0.98	6.46	3.19	0.84	63.71	70.17	<b>58.94</b>
400	2.12	1.73	0.87	8.23	2.04	0.76	78.66	86.89	<b>66.74</b>
500	1.81	5.41	0.99	11.51	3.05	0.83	94.24	105.75	<b>72.24</b>
600	1.86	1.84	0.99	9.53	2.98	0.82	101.42	110.95	<b>74.20</b>
700	1.85	7.33	0.99	8.85	2.94	0.83	103.66	112.51	<b>74.76</b>
800	1.81	1.39	0.90	11.73	2.21	0.71	124.70	136.44	<b>79.02</b>
900	1.90	1.15	0.94	8.65	2.23	0.74	146.01	154.66	<b>82.08</b>
1000	1.61	7.76	0.95	8.76	2.24	0.74	149.99	158.75	<b>82.56</b>
1100	0.99	1.51	0.85	8.27	1.64	0.75	153.57	161.85	<b>82.96</b>
Inhibidor de cáscara de naranja con Reline									
Muestra (µL)	R <sub>s</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	Q <sub>dl</sub> (µF cm <sup>-2</sup> ) *10 <sup>-4</sup>	n	R <sub>mol</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	Q <sub>dl</sub> (µFcm <sup>-2</sup> ) *10 <sup>-4</sup>	n	R <sub>tc</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	R <sub>p</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	%EI
Blanco	3.13				4.45	0.82	28.25	28.25	
100	1.73	1.10	0.93	5.04	3.60	0.71	55.56	60.61	<b>49.16</b>
200	1.69	1.20	0.91	5.31	2.02	0.78	67.69	73.00	<b>58.27</b>
300	1.61	1.04	0.92	5.44	2.67	0.75	74.33	79.77	<b>62.00</b>
400	1.41	9.27	0.91	5.59	2.21	0.78	86.94	92.53	<b>67.51</b>
500	1.53	9.64	0.91	5.80	2.08	0.78	94.92	100.72	<b>70.24</b>
600	1.73	1.18	0.92	7.57	2.37	0.75	98.22	105.79	<b>71.24</b>
700	1.59	8.97	0.94	7.83	2.04	0.72	200.43	208.26	<b>85.91</b>

Inhibidor de cáscara de toronja con Ethaline									
Muestra (μL)	Rs (Ω*cm <sup>2</sup> )	Q <sub>dl</sub> (μF cm <sup>-2</sup> ) *10 <sup>-4</sup>	n	R <sub>mol</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	Q <sub>dl</sub> (μFcm <sup>-2</sup> ) *10 <sup>-4</sup>	n	R <sub>tc</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	R <sub>p</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	%EI
Blanco	3.18				3.71	0.85	26.16	26.16	
400	11.51	2.10	0.84	12.06	1.85	0.80	57.14	69.20	<b>54.22</b>
800	9.47	1.79	0.87	12.85	1.96	0.80	74.33	87.18	<b>64.80</b>
1200	10.54	2.26	0.86	14.23	1.71	0.82	103.11	117.34	<b>74.63</b>
1600	9.83	2.07	0.84	9.48	1.77	0.79	132.57	142.06	<b>80.27</b>
2000	10.11	7.24	0.98	14.60	2.88	0.82	197.77	212.37	<b>86.77</b>
Inhibidor de cáscara de toronja con Reline									
Muestra (μL)	Rs (Ω*cm <sup>2</sup> )	Q <sub>dl</sub> (μF cm <sup>-2</sup> ) *10 <sup>-4</sup>	n	R <sub>mol</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	Q <sub>dl</sub> (μFcm <sup>-2</sup> ) *10 <sup>-4</sup>	n	R <sub>tc</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	R <sub>p</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	%EI
Blanco	3.18				3.71	0.85	26.16	26.16	
400	6.36	2.05	0.85	9.69	2.20	0.73	61.06	70.74	<b>57.15</b>
800	4.80	9.76	0.95	15.80	2.81	0.79	96.89	112.69	<b>73.00</b>
1200	7.16	1.43	0.90	12.12	2.09	0.78	107.98	120.10	<b>75.77</b>
1600	4.17	6.10	0.99	14.79	2.81	0.81	204.41	219.19	<b>87.20</b>

## 5.2 Polarización potenciodinamica (Rp)

### 5.2.1 Pruebas de RPL en medio de Cloruro de sodio (NaCl) al 5% wt.

En la Figura 10. Se presenta las curvas de polarización ( $\log I_{\text{corr}}$  vs. E) para el acero AISI-1045 inmerso en 50 ml de 5% wt de NaCl con o sin la adición del inhibidor de cáscaras naranja con Ethaline. Como se puede observar en la Figura 10 y en la Tabla 7 el potencial (E) se desplaza hacia valores positivos al aumentar el volumen de inhibidor. También podemos mencionar debido al forma de la curva de polarización del blanco y las adiciones del inhibidor presenta el mismo mecanismo, por lo que las moléculas orgánicas no alteran su comportamiento.



**Figura 10.** Curvas de polarización para un acero AISI-1045 inmerso en 5%wt NaCl en función del inhibidor de cáscara de naranja con Ethaline

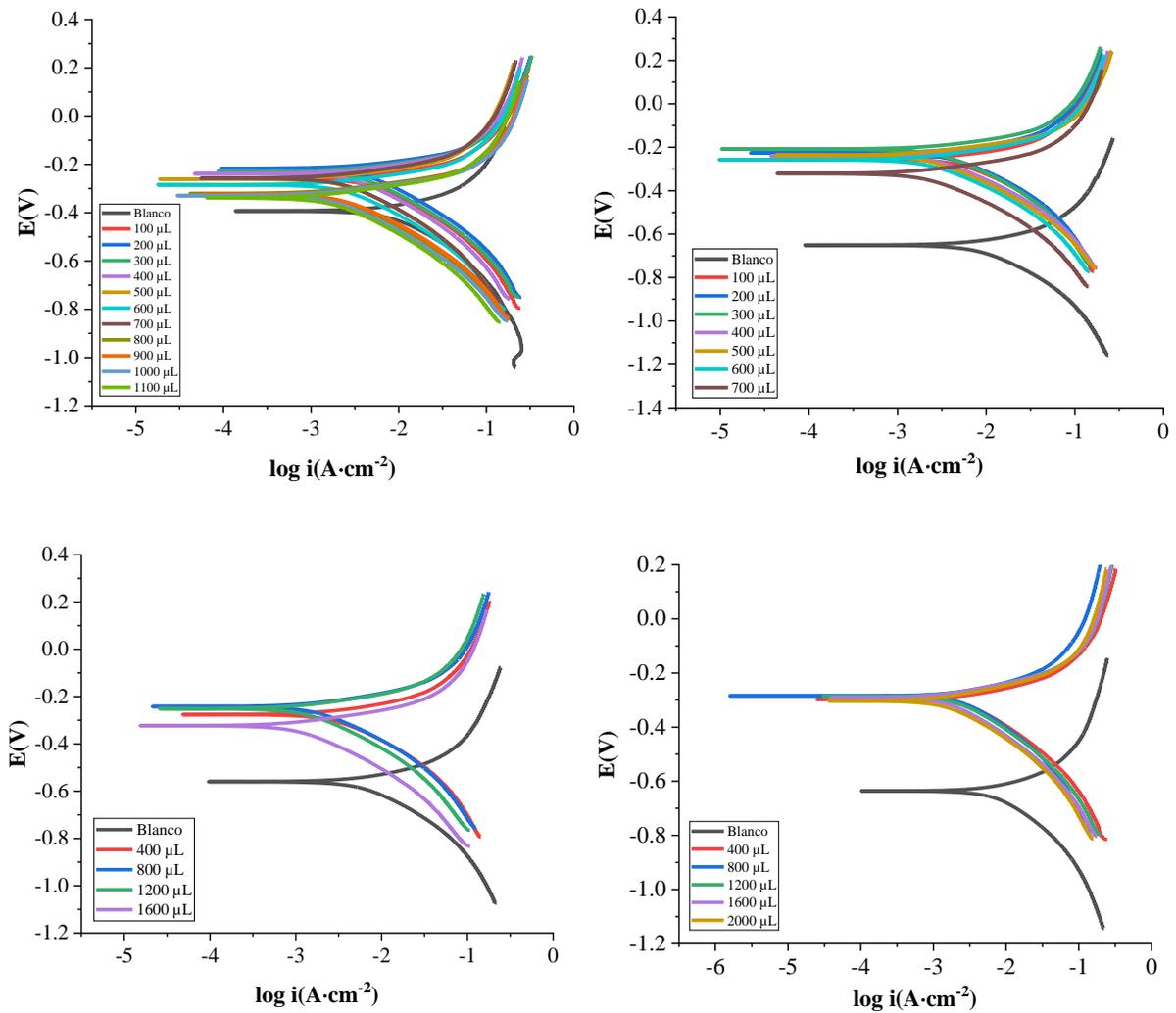
En la tabla 7 se presenta los resultados de los parámetros electroquímicos obtenidos por campo bajo y campo alto para el estudio del acero AISI-1045 inmerso en un medio de NaCl 5% wt con o sin la adición del inhibidor de cáscaras de naranja con Ethaline. A medida que se aumentando el volumen del inhibidor tiene a disminuir la eficiencia de inhibición, por lo que, el inhibidor es absorbido por mismo medio.

**Tabla 7.** Parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización para diferentes volúmenes ( $\mu\text{L}$ ) de inhibidor de cáscara de naranja con Ethaline para un acero AISI 1045 en 5% wt de NaCl

Muestra ( $\mu\text{L}$ )	E (V)	$i_{\text{corr}}$ ( $\text{A}\cdot\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega\cdot\text{cm}^2$ )	$B_c$ (mV/Dec)	$B_a$ (mV/Dec)	%IE
Blanco	-0.55	5.83E-05	1071.75	12.53	55.96	
200	-0.49	1.59E-05	3919.17	15.46	44.60	<b>72.65</b>
400	-0.47	2.06E-05	3038.00	11.10	44.06	<b>64.72</b>
600	-0.45	1.73E-05	3610.37	11.49	43.49	<b>70.31</b>
800	-0.43	1.80E-05	3481.54	10.38	43.35	<b>69.22</b>

### 5.2.2 Pruebas de RPL en medio de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 1M

En la Figura 11 se muestran las curvas de polarización ( $\log i_{\text{corr}}$  vs. E) para el acero AISI-1045 inmerso en 50 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1M con la presencia de los inhibidores de cáscara naranja con Ethaline (11.a), cáscaras naranjas con Reline (11.b), cáscaras toronja con Ethaline (11.c) y cáscara toronja con Reline (11.d) a diferentes volúmenes. También se incluye la curva de polarización del Blanco para el acero expuesto sin la presencia de los inhibidores en medio de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1M para su análisis comparativo. En términos generales, estos diagramas revelan un desplazamiento hacia valores más bajos de la densidad de corriente de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) (lado izquierdo) y un aumento en el potencial E hacia valores más positivos a medida que se incrementa la concentración de los inhibidores. Esto sugiere que este tipo de moléculas actúan como inhibidores de tipo anódico al ser capaces de recubrir y pasivar los sitios más activos del acero.



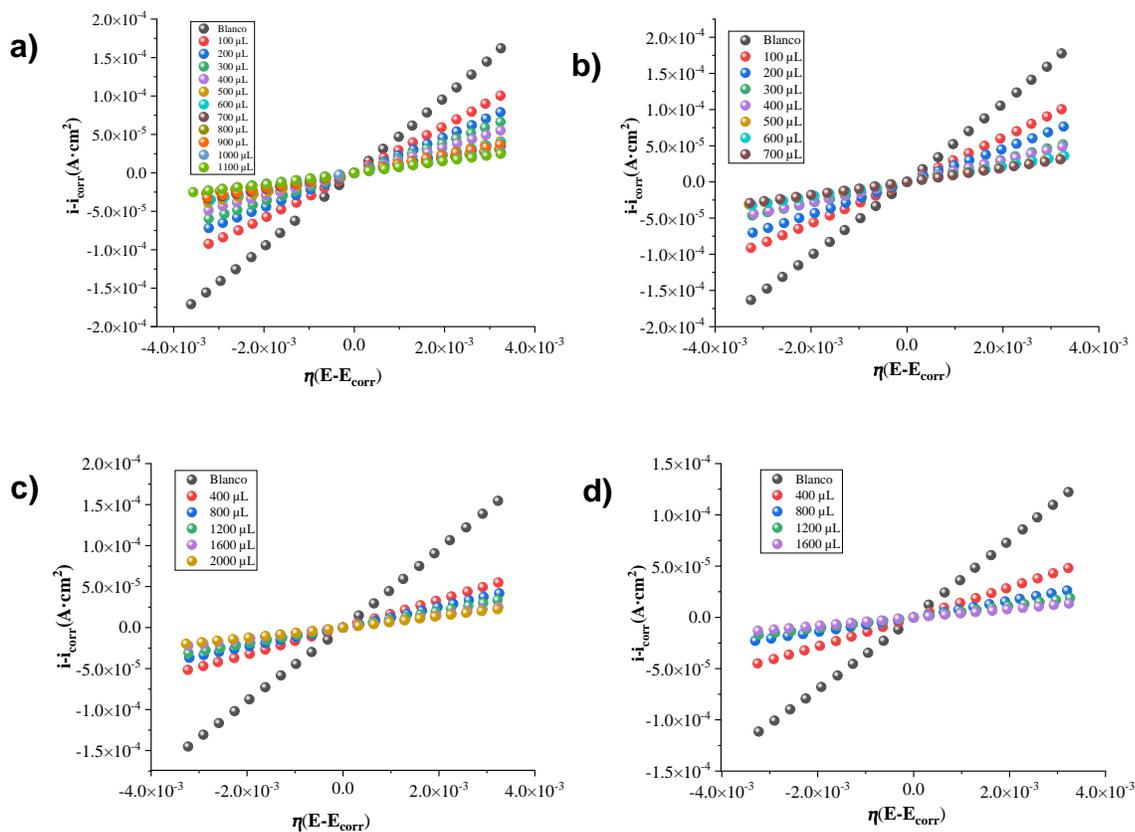
**Figura 11.** Diagramas de Nyquist para un acero AISI-1045 inmerso en 1M de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en la adición de de inhibidores de cáscara de naranja con a) Ethaline b) Reline y cáscara de toronja con c) Ethaline d) Reline

En la Tabla 8 se muestra los resultados de los parámetros electroquímicos para el acero AISI-1045 inmerso en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M con la presencia de los inhibidores. En estudio de los 4 casos al aumentar el volumen del inhibidor al sistema (metal/ medio) tiende a disminuir la densidad de corriente corrosión ( $i_{corr}$ ) por lo general valores de  $\cdot 10^{-4}$  por lo que favorece la eficiencia de Inhibición (EI) determinada por ecuación 7, en donde, se logra obtener que mejor inhibidor son cascara de naranja con Reline, por su menor cantidad de adición obteniendo una EI 82.3% a los 700  $\mu$ L. En caso del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) se logra tener valores -0.3 V. Finalmente se nota los datos de la pendiente catódica ( $B_c$ ) por lo general muestra un decrecimiento de valores esto puede indicar que los inhibidores actúan bloqueando los sitios catódicos y anódicos, como un tipo de inhibición mixta se puede observar en Figura 12

**Tabla 8.** Parámetros electroquímicos para el acero AISI-1045 inmerso en 1M de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en presencia de los inhibidores

Inhibidor de cáscara de naranja con Ethaline						
Muestra (μL)	E <sub>corr</sub> (V)	i <sub>corr</sub> (A*cm <sup>-2</sup> )	R <sub>p</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	B <sub>c</sub> (mV/Dec)	B <sub>a</sub> (mV/Dec)	%EI
Blanco	-0.393	3.020E-03	20.693	154.372	68.968	
100	-0.260	1.872E-03	33.393	205.242	70.345	<b>38.03</b>
200	-0.217	1.446E-03	43.227	227.360	59.560	<b>52.13</b>
300	-0.229	1.206E-03	51.814	188.531	52.170	<b>60.06</b>
400	-0.239	9.895E-04	63.163	211.519	68.481	<b>67.24</b>
500	-0.261	7.740E-04	80.744	222.534	61.192	<b>74.37</b>
600	-0.284	7.133E-04	87.624	223.562	66.395	<b>76.38</b>
700	-0.258	6.696E-04	93.343	205.442	69.781	<b>77.83</b>
800	-0.321	5.510E-04	113.437	221.369	62.352	<b>81.76</b>
900	-0.325	6.747E-04	92.638	218.015	57.778	<b>77.66</b>
1000	-0.329	4.781E-04	130.739	216.383	53.302	<b>84.17</b>
1100	-0.338	4.653E-04	134.320	214.765	65.160	<b>84.59</b>
Inhibidor de cáscara de naranja con Reline						
Muestra (μL)	E <sub>corr</sub> (V)	i <sub>corr</sub> (A*cm <sup>-2</sup> )	R <sub>p</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	B <sub>c</sub> (mV/Dec)	B <sub>a</sub> (mV/Dec)	%EI
Blanco	-0.651	3.30E-03	18.923	238.126	105.745	
100	-0.253	1.86E-03	33.675	221.126	96.087	<b>43.81</b>
200	-0.227	1.42E-03	44.091	204.145	71.832	<b>57.08</b>
300	-0.208	9.44E-04	66.231	215.749	66.044	<b>71.43</b>
400	-0.240	9.07E-04	68.895	210.667	75.645	<b>72.53</b>
500	-0.237	6.30E-04	99.259	213.901	58.285	<b>80.94</b>
600	-0.257	6.51E-04	96.002	193.423	63.342	<b>80.29</b>
700	-0.321	5.83E-04	107.249	216.216	59.941	<b>82.36</b>
Inhibidor de cáscara de toronja con Ethaline						
Muestra (μL)	E <sub>corr</sub> (V)	i <sub>corr</sub> (A*cm <sup>-2</sup> )	R <sub>p</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	B <sub>c</sub> (mV/Dec)	B <sub>a</sub> (mV/Dec)	%EI
Blanco	-0.636	2.892E-03	21.613	217.282	92.060	
400	-0.297	1.034E-03	60.468	168.085	65.022	<b>64.26</b>
800	-0.284	7.595E-04	82.287	204.343	77.553	<b>73.73</b>
1200	-0.287	6.200E-04	100.811	189.012	60.244	<b>78.56</b>
1600	-0.291	4.502E-04	138.823	190.726	56.593	<b>84.43</b>
2000	-0.303	4.093E-04	152.717	178.355	58.530	<b>85.85</b>
Inhibidor de cáscara de toronja con Reline						
Muestra (μL)	E <sub>corr</sub> (V)	i <sub>corr</sub> (A*cm <sup>-2</sup> )	R <sub>p</sub> (Ω*cm <sup>2</sup> )	B <sub>c</sub> (mV/Dec)	B <sub>a</sub> (mV/Dec)	%EI
Blanco	-0.560	2.274E-03	27.486	221.498	80.280	
400	-0.276	9.000E-04	69.444	187.709	62.981	<b>60.42</b>
800	-0.242	4.732E-04	132.084	187.460	57.304	<b>79.19</b>
1200	-0.251	3.410E-04	183.292	191.408	57.462	<b>85.00</b>
1600	-0.323	2.542E-04	245.854	207.274	56.316	<b>88.82</b>

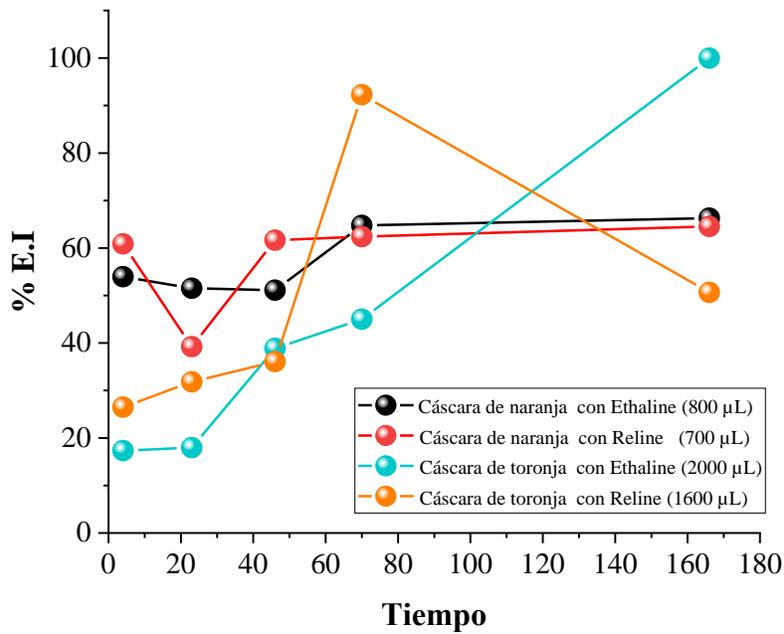
En la Figura 12 se muestra las pendientes de las curvas de polarización obtenidas por campo bajo, en donde  $\eta$  representa el sobrepotencial y la diferencia de corrientes. Como se puede ver en cada uno de los inhibidores inhiben de forma mixta ya que bloquean los sitios anódicos (las pendientes de los inhibidores quedan por abajo del blanco) y catódicos (las pendientes de los inhibidores quedan por arriba del blanco).



**Figura 12.** La pendiente curva de polarización para diferentes volúmenes ( $\mu\text{L}$ ) de inhibidores de cáscara de naranja con a) Ethaline b) Reline y cáscara de toronja con c) Ethaline d) Reline para un acero AISI 1045 en un medio de 1M de  $\text{H}_2\text{SO}_4$

### 5.3 Cinética de corrosión

En la Figura 13. Se presenta el comportamiento de la eficiencia de inhibición (EI) de los inhibidores por un tiempo 180hrs para el acero AISI-1045 inmerso en 50 ml de 5% wt de NaCl con adición de los inhibidores. Los inhibidores se adicono al sistema (medio/metal) con 800  $\mu$ L (cáscara de naranja con Ethaline), 700 $\mu$ L (cáscaras de naranja con Reline), 2000 $\mu$ L (cáscara de toronja con Ethaline) y 1600uL (cáscara de toronja con Reline). Los inhibidores de cáscaras de naranja con Ethaline y Reline son los que se mantiene más estable logrando una EI 60%.



**Figura 13.** Cinética de corrosión del acero AISI-1045 inmerso en 5% wt de NaCl con la presencia de los inhibidores

## Conclusión

En este trabajo se concluye de manera general, que, la obtención de los extractos naturales es una medida alternativa para inhibir la corrosión del acero AISI-1045 en medios de cloruro de sodio y ácido sulfúrico. La generación de los extractos es una metodología simple y de bajo costo, que permitirá formular nuevas alternativas de extractos a partir de residuos agroindustriales, permitiendo obtener un abanico de posibilidades de inhibidores verdes.

Se pudo verificar a través de las técnicas electroquímicas EIS y Rp, la eficiencia de inhibición de cada extracto, así como, conocer el tiempo de vida de cada extracto en el medio de cloruro de sodio. Particularmente los resultados más relevantes de esta investigación permitieron determinar que el extracto de cáscara de naranja con Reline es el inhibidor más eficiente en los medios NaCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, logrando eficiencias inhibición superiores al 80% a los 700 µL, además, es el inhibidor que se mantiene estable por 180 hrs en medio de NaCl.

El extracto de cáscara de toronja con Ethaline es el inhibidor menos eficiente por su mayor volumen de adición en el sistema (acero AISI 1045 / H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), logrando eficiencias inhibición del 85% a los 2000 µL siendo una dosis alta. Pero nos dio una alternativa para realizar ajuste en la relación de DES y residuo, permitiendo concentrar el extracto para reducir la dosificación. A través del análisis de campo bajo (RP), se determinó que los extractos son inhibidores que actúan de manera mixta al bloquear tanto los sitios anódicos como los catódicos.

## Bibliográficas

1. Ahmed, E. I., Ryder, K. S., & Abbott, A. P. (2021). Corrosion of iron, nickel and aluminium in deep eutectic solvents. *Electrochimica Acta*, 397. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139284>
2. Aldana-González, J., Cervantes-Cuevas, H., Alfaro-Romo, C., Rodriguez-Clemente, E., Uruchurtu-Chavarin, J., Romero-Romo, M., de Oca-Yemha, M. G. M., Morales-Gil, P., Mendoza-Huizar, L. H., & Palomar-Pardavé, M. (2020). Experimental and theoretical study on the corrosion inhibition of API 5L X52 steel in acid media by a new quinazoline derivative. *Journal of Molecular Liquids*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114449>
3. Alvarado Montalvo, Lucia G. (2005). *AJUSTE DE ESPECTROS DE IMPEDANCIA Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS ELECTROQUÍMICOS MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS*.
4. Arul. Xavier S, & Vijayalakshmi. U. (2018). Studies on corrosion inhibitory effect and adsorption behavior of waste materials on mild steel in acidic medium. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 6(1), 20–29. <https://doi.org/10.1080/21870764.2018.1439608>
5. Askeland, D. R. , F. P. P. , & W. W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales*.
6. Bohórquez, C. A., Cardona, A., Kohan, P. H., Quinteros, R. D., & Storti, M. A. (2012). *Mecánica Computacional Vol XXXI*.
7. Cabrera-Sierra, R., Marín-Cruz, J., & González, I. (2007). La utilización de la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para identificar diferentes estados superficiales en el proceso de corrosión del acero al carbono en medios amargos. *Bol. Soc. Quím. Méx*, 1(1), 32–41.
8. Camargo, A., Aperador, W., Rios, A., Ortiz, C., & Vera, E. (2009). Caracterización Mediante Espectroscopia de Impedancia Electroquímica de Películas Anódicas Crecidas Sobre Al 2024-T3. In *Revista Colombiana de Física* (Vol. 41, Issue 2).
9. César, P., & Palacio, T. (2021a). *Síntesis, propiedades, caracterización y aplicaciones químicas de novedosos disolventes eutécticos profundos: DES (Deep Eutectic Solvents)*. <http://hdl.handle.net/10803/673075>
10. César, P., & Palacio, T. (2021b). *Síntesis, propiedades, caracterización y aplicaciones químicas de novedosos disolventes eutécticos profundos: DES (Deep Eutectic Solvents)*. <http://hdl.handle.net/10803/673075>
11. Charng, T., & Lansing, F. (1982). *Review of corrosion causes and corrosion control in a technical facility*.
12. Esteban Bedoya Lora, F., & Andrés Calderón Gutiérrez, J. (2011). *ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DETERMINADOS POR ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PINTURAS ANALYSIS OF PARAMETERS DETERMINED BY ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY FOR PERFORMANCE EVALUATION OF PAINTINGS*.
13. Fernández, J. A. G. (1989). *Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas*.
14. García Inzunza, R. (2014). *Inhibidores de corrosión de acero en medios ácidos a partir de extractos naturales*.

15. Gómez Chacón, Virginia L. (2016). *EFICIENCIA DE UN INHIBIDOR VERDE EXTRAÍDO DE CÁSCARA DE MANZANA MEDIANTE EL SISTEMA SOXHLET EN LA CORROSIÓN DEL ACERO 1018 EN MEDIO ÁCIDO*.
16. Liao, L. L., Mo, S., Luo, H. Q., & Li, N. B. (2018). Corrosion protection for mild steel by extract from the waste of lychee fruit in HCl solution: Experimental and theoretical studies. *Journal of Colloid and Interface Science*, 520, 41–49.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.02.071>
17. Mara F, Herrera-Hernández H, García-Orozco I, & Herrasti P. (2018). Extracto acuoso natural de Morinda Citrifolia como inhibidor de corrosión del acero AISI-1045 en ambientes ácidos de HCl. *Revista de Metalurgia*, 54(4).  
<https://doi.org/10.3989/revmetalm.128>
18. Marzorati, S., Verotta, L., & Trasatti, S. P. (2019). Green corrosion inhibitors from natural sources and biomass wastes. *Molecules*, 24(1).  
<https://doi.org/10.3390/molecules24010048>
19. M'hiri, N., Veys-Renaux, D., Rocca, E., Ioannou, I., Boudhrioua, N. M., & Ghoul, M. (2016). Corrosion inhibition of carbon steel in acidic medium by orange peel extract and its main antioxidant compounds. *Corrosion Science*, 102, 55–62.  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.09.017>
20. Palomar-Pardavé, M., Romero-Romo, M., Herrera-Hernández, H., Abreu-Quijano, M. A., Likhanova, N. V., Uruchurtu, J., & Juárez-García, J. M. (2012). Influence of the alkyl chain length of 2 amino 5 alkyl 1,3,4 thiadiazole compounds on the corrosion inhibition of steel immersed in sulfuric acid solutions. *Corrosion Science*, 54(1), 231–243.  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.09.020>
21. Pérez, F. J., Hierro, M. P., Gómez, C., Duday, D., & Romero, M. (2000). Cerámica y Vidrio Estudio de la corrosión de diferentes aleaciones en sales de carbonatos fundidos con la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica. In *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio* (Issue 3).
22. Ramírez, N., Regueiro, A., Arias, O., & Contreras, R. (2008). *Electrochemical impedance spectroscopy: An effective tool for a fast microbiological diagnosis*.
23. Salazar Jiménez, José A. (2015). *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica) Introduction to Corrosion Phenomena: Types, Influencing Factors and Control for Material's Protection (Technical note)*.
24. Salinas Martínez, J. R. (2019). *INHIBIDORES DE CORROSIÓN PARA PROTECCIÓN DE INFRAESTRUCTURA Y TRANSPORTE VEHICULAR EXPUESTAS A SALES ANTICONGELANTES*.
25. Salleh, S. Z., Yusoff, A. H., Zakaria, S. K., Taib, M. A. A., Abu Seman, A., Masri, M. N., Mohamad, M., Mamat, S., Ahmad Sobri, S., Ali, A., & Teo, P. Ter. (2021). Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 304). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127030>
26. Santander Soazo, F. I. (2018). *Estudio de la capacidad inhibidora de la corrosión de extractos de Allium Cepa en medio ácido por métodos electroquímicos*.

27. Smith, E. L., Abbott, A. P., & Ryder, K. S. (2014). Deep Eutectic Solvents (DESs) and Their Applications. In *Chemical Reviews* (Vol. 114, Issue 21, pp. 11060–11082). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/cr300162p>
28. Tejeda Benítez, Lesly P, Meza Castellar, Pedro J, Altamiranda Percy, Edgar D, & Berrocal Bravo M. (2014). *Plant extracts used as corrosion inhibitors*.
29. Vázquez Gutiérrez, J. L. (2007). *EMPLEO DE LA TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIAS ELECTROQUÍMICAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE BIOMATERIALES. APLICACIÓN A UNA ALEACIÓN BIOMÉDICA DE Co-Cr-Mo*.
30. Vergara Sotomayor, A., Cuba, K. P., Morales Comettant, C., Castro Mandujano, O., Solís, P. P., & Rosado, J. D. (2018). *OBTENCIÓN DE EXTRACTOS DE HOJAS DE Annona muricata L. (GUANÁBANA) INDUCIDOS POR SU EFECTO INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN*.
31. Zakeri, A., Bahmani, E., & Aghdam, A. S. R. (2022). Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for protection of ferrous metals in corrosive media: A mini review. In *Corrosion Communications* (Vol. 5, pp. 25–38). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2022.03.002>

## Participaciones en eventos



EL CAPÍTULO ESTUDIANTIL SMMATER-UPVM EN CONJUNTO CON LA SOCIEDAD MEXICANA DE MATERIALES Y LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DEL VALLE DE MÉXICO, OTORGA EL SIGUIENTE

### RECONOCIMIENTO A

VICENCIO REYES JUAN CARLOS, SÁNCHEZ, ORTIZ WILLIAM, ALDANA GONZÁLEZ JORGE IVAN, PALOMAR PARDAVÉ MANUEL EDUARDO, ROMERO ROMO MARIO ALBERTO.

Por su presentación del poster titulado **Grapefruit peel extract with deep eutectic solvents as a corrosion inhibitor for AISI 1045 steel** efectuada en el marco del II Congreso Estatal de Ciencia e Ingeniería de Materiales

Estado de México, Tultitlán del 22 al 24 de Marzo del 2023.

**MELISSA MARTÍNEZ RÍOS**  
Presidente del capítulo estudiantil SMMATER-UPVM

**DR. HÉCTOR CRUZ MEJÍA**  
Asesor académico del capítulo estudiantil SMMater-UPVM y coordinador del congreso

**M. EN C. ANTONIO JUANICO**  
Asesor académico del capítulo estudiantil SMMater-UPVM y coordinador del congreso



Sociedad Mexicana de Materiales A.C.



Congreso Estatal de Materiales QUERÉTARO



El comité organizador del

**2º Congreso Estatal Queretano de Materiales 2023**

otorga la presente

### CONSTANCIA

**A:** Juan Carlos Vicencio Reyes, William Sánchez Ortiz, Jorge Iván Aldana González, David Hernández Perez, Manuel Eduardo Palomar Pardavé y Mario Alberto Romero Romo

Por su participación con el póster titulado

**"Extracto de cáscara de toronja con disolventes eutécticos profundos como inhibidor de la corrosión del acero AISI 1045"**

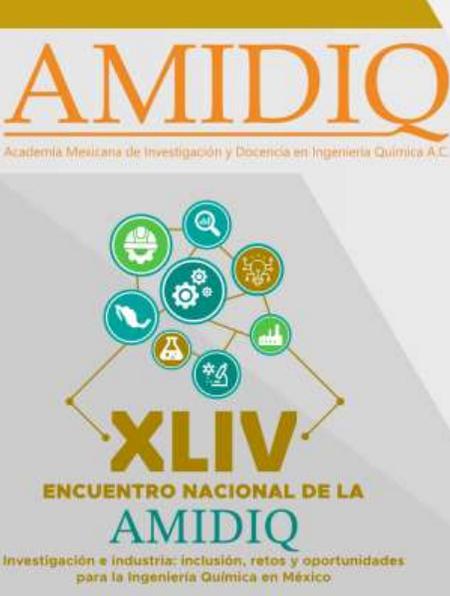
Santiago de Querétaro, Qro., del 24 al 27 de abril de 2023

M. C. José Alberto Elizalde Mata  
Presidente del SMMater Capítulo Estudiantil CFATA

Brenda A. Hernández Rodríguez  
Presidenta del SMMater Capítulo Estudiantil UTEQ

M. C. Arnold Hernández Palomares  
Presidente del SMMater Capítulo Estudiantil CIDETE Q





**AMIDIQ**  
Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.

La Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C. otorga el presente

**RECONOCIMIENTO**

a:

**Juan Carlos Vicencio Reyes, William Sánchez Ortiz, Jorge Ivan Aldana Gonzalez, Manuel Eduardo Palomar Pardavé, Mario Alverto Romero Romo.**

**Por la presentación del trabajo:**

**EXTRACTO DE CÁSCARA DE TORONJA CON DISOLVENTES EUTÉCTICOS PROFUNDOS COMO INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN DEL ACERO AISI 1045**

En el área de **MATERIALES Y POLÍMEROS** en modalidad ORAL  
ID: 534

**XLIV Encuentro Nacional de la AMIDIQ**

Investigación e industria: inclusión, retos y oportunidades para la Ingeniería Química en México



**UDLAP**

Dr. Carlos Romo Hernández  
Presidente del Comité Organizador

Dr. Jorge Ramón Robledo Ortiz  
Presidente Nacional de AMIDIQ

Dr. Tomás Vicente García  
Presidente del Comité Técnico

Huatuleo, Oaxaca, México 30 de mayo al 2 de junio de 2023

## Distinción



**Sociedad Mexicana de Electroquímica**

**BUAP**

**ECS**

**CONACYT**

La Sociedad Mexicana de Electroquímica Otorga el presente

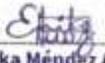
**RECONOCIMIENTO DE TERCER LUGAR EN EL CONCURSO DE CARTELES A NIVEL MAESTRÍA**

A

**Juan Carlos Vicencio**  
con la tesis titulada:  
**Desarrollo y evaluación de un inhibidor de corrosión de extractos naturales de residuos sólidos orgánicos**

Dentro del XXXVII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y 15th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society.

  
**Dr. José A. Cabral Miramontes**  
Presidente del Comité Ejecutivo  
SMEQ 2021 - 2023

  
**Dra. Erika Méndez Albores**  
Presidenta del Comité Organizador  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla