

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE UN
INHIBIDOR VERDE EN UN ACERO API 5LX65

JUAN SEBASTIÁN RENDÓN BALLESTEROS

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Orientador:

OSCAR CHAMARRAVÍ GUERRA

INGENIERO METALÚRGICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN: _____

Bogotá D.C. agosto de 2024

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director del Programa de Ingeniería Mecánica

Dra. María Angélica Acosta Pérez

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto de trabajo de grado a mis padres Carlos Orlando Rendón Gil y Claudia Marcela Ballesteros Gonzáles que me apoyaron durante todo mi proceso de estudio y me incentivaron a ser cada vez una mejor persona confiando tanto en mi potencial como el de este trabajo, siendo mi mayor impulso y fuerza para siempre seguir adelante sin importar las circunstancias. A mi abuela paterna Silvia Marleny Gil de Rendón que ha sido una segunda madre para mí y también ha estado conmigo apoyándome en cada momento que lo he requerido. A mi familia en general que se ha preocupado encarecidamente de mí y mi proceso. A mis amigos que ha sido fuente de alegría y acompañamiento en momentos difíciles, a los cuales considero también parte de mi familia y que quiero en mi vida.

Le agradezco a todos los profesores que me han instruido a lo largo de esta carrera, dándome los conocimientos necesarios del mundo académico y por darme una visión más amplia de la vida, así mismo a todo el personal de la Fundación Universidad de América que me ayudó a tener una experiencia universitaria única, sobre todo Neider Alexander Castaño el encargado del laboratorio de materiales, el cual me ayudó y proporcionó todo lo que necesité para la culminación de las pruebas de laboratorio.

Agradecimientos especiales a mi director de tesis Ing. Oscar Chamarraví Guerra que tuvo la paciencia y la dedicación para guiarme en este proyecto y por enseñarme lo que es ser una persona académica que quiere esparcir el conocimiento y que encuentra el tiempo para poder ayudar a los demás. También a la Ingeniera Leidy Julieta Cárdenas que me acompañó en los laboratorios y me ayudó a la elaboración de los experimentos, además de ya haber sido mi profesora en diversas asignaturas las cuales llevaré en mi mente a lo largo de mi carrera profesional.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	14
1.1. Objetivo general	14
1.2. Objetivos específicos	14
2. CORROSIÓN Y SU RELACIÓN CON PÉRDIDAS ECONÓMICAS	15
3. INHIBIDORES DE CORROSIÓN	21
3.1. Inhibidores anódicos, catódicos y mixtos	21
3.2. Inhibidores volátiles	22
4. USOS INDUSTRIALES	24
5. INHIBIDORES VERDES	25
5.1. Estudios de inhibidores verdes	27
5.2. Selección del inhibidor verde y solución	29
6. TÉCNICAS UTILIZADAS EN EL ESTUDIO DE INHIBIDORES VERDES	32
6.1. Polarización potenciodinámica	32
6.2. Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)	33
6.3. Extraplación de Tafel	34
6.4. Velocidad de corrosión por pérdida de masa	36
7. ACEROS MICRO ALEADOS	37
7.1. Tubería API 5L X65	37
8. MATERIALES Y EQUIPOS	42
8.1. Materiales	42
8.2. Equipos	47
9. PROCESOS Y MÉTODOS EXPERIMENTALES	52
9.1. Proceso de obtención de muestras	52
9.2. Proceso de elaboración de la celda electroquímica	56
9.3. Caracterización metalográfica	58
9.4. Pruebas de polarización potenciodinámicas	67

10. RESULTADOS	77
11. ANÁLISIS DE RESULTADOS	80
12. CONCLUSIONES	83
13. RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFIA	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Corrosión generalizada en tubería</i>	14
Figura 2. <i>Costos de la corrosión</i>	15
Figura 3. <i>Celda electroquímica</i>	16
Figura 4. <i>Clasificación de causas de la corrosión</i>	18
Figura 5. <i>Gráfica de las densidades de corriente</i>	20
Figura 6. <i>Curvas Tafel</i>	22
Figura 7. <i>Clasificación de los inhibidores verdes</i>	25
Figura 8. <i>Tipos de fitoquímicos obtenidos con diferentes solventes</i>	26
Figura 9. <i>Ejemplo curvas de polarización</i>	30
Figura 10. <i>Ejemplo EIS visto en gráficos de Bode</i>	31
Figura 11. <i>Ejemplo de la extrapolación de Tafel</i>	32
Figura 12. <i>Composición química y resistencia mecánica de tubería API 5L X65 ofrecida por la empresa HT tuberías Zhengzhou Huitong Pipeline Equipment Co.,Ltd</i>	35
Figura 13. <i>Composición química de tuberías API 5L para nivel PSL-2 sin costura según la norma</i>	36
Figura 14. <i>Composición química de tuberías API 5L para nivel PSL-2 tubo soldado según la norma</i>	37
Figura 15. <i>Propiedades mecánicas de tuberías API 5L para nivel PSL-1 sin costura y tubo soldado según la norma</i>	38
Figura 16. <i>Imagen del acero API 5L X65</i>	40
Figura 17. <i>Imagen de los moldes</i>	40
Figura 18. <i>Imagen las probetas con las muestras</i>	41
Figura 19. <i>Imagen de la pasta de diamante de 0.03 micras</i>	41
Figura 20. <i>Imagen del Nital</i>	42
Figura 21. <i>Imagen del Metanol</i>	42
Figura 22. <i>Imagen del Agua desionizada</i>	43
Figura 23. <i>Imagen del aceite esencial de hoja de guayaba</i>	43
Figura 24. <i>Imagen del cloruro de sodio al 3,56</i>	44

Figura 25. <i>Imagen de una balanza</i>	44
Figura 26. <i>Imagen de una balanza analítica</i>	45
Figura 27. <i>Imagen del potencióstato</i>	45
Figura 28. <i>Imagen de las celdas de calibración</i>	46
Figura 29. <i>Imagen de las celdas de calibración</i>	46
Figura 30. <i>Imagen de un multímetro</i>	47
Figura 31. <i>Imagen de la celda electrolítica elaborada</i>	47
Figura 32. <i>Imagen de la pulidora metalográfica</i>	48
Figura 33. <i>Imagen de las muestras ya cortadas</i>	49
Figura 34. <i>Muestra 8 pesada en la balanza</i>	50
Figura 35. <i>Probeta del caso de estudio anterior</i>	51
Figura 36. <i>Probeta del caso de estudio anterior</i>	52
Figura 37. <i>Probeta siendo pesada</i>	53
Figura 38. <i>Contra electrodo y electrodo de referencia</i>	53
Figura 39. <i>Ataque químico</i>	54
Figura 40. <i>Muestra 1 X50</i>	55
Figura 41. <i>Muestra 5 X50</i>	56
Figura 42. <i>Muestra 6 X50</i>	57
Figura 43. <i>Muestra 6 X500</i>	58
Figura 44. <i>Muestra 9 X500</i>	59
Figura 45. <i>Muestra 2 X500</i>	60
Figura 46. <i>Muestra 2 X200</i>	61
Figura 47. <i>Muestra 5 X500</i>	62
Figura 48. <i>Muestra 6 X500</i>	63
Figura 49. <i>Barra de herramientas</i>	64
Figura 50. <i>Calibración del equipo</i>	65
Figura 51. <i>Mensaje de verificación</i>	65
Figura 52. <i>Mensaje de rectificación</i>	66
Figura 53. <i>Comienzo de calibración</i>	66
Figura 54. <i>Potenciostato conectado a la celda con el electrolito</i>	67
Figura 55. <i>Inicio del experimento</i>	68

Figura 56. <i>Determinación de variables</i>	69
Figura 57. <i>Muestra 2 después de la prueba de polarización potenciodinámica</i>	70
Figura 58. <i>Muestra 4 después de la prueba de polarización potenciodinámica</i>	70
Figura 59. <i>Muestra 6 después de la prueba de polarización potenciodinámica</i>	71
Figura 60. <i>Muestra 7 después de la prueba de polarización potenciodinámica</i>	71
Figura 61. <i>Muestra 8 después de la prueba de polarización potenciodinámica</i>	72
Figura 62. <i>Muestra 9 después de la prueba de polarización potenciodinámica</i>	72
Figura 63. <i>Muestra 1 X50</i>	74
Figura 64. <i>Comparativa de muestras</i>	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Estudios sobre inhibidores verdes</i>	26
Tabla 2. <i>Matriz de prioridad para la selección del inhibidor verde</i>	28
Tabla 3. <i>Peso de cada una de las muestras</i>	50
Tabla 4. <i>Peso en balanza analítica</i>	52

RESUMEN

La corrosión, un proceso natural que deteriora los metales por reacciones electroquímicas en presencia de humedad y agentes corrosivos, puede ser combatida mediante inhibidores. Estos actúan como modificadores de las reacciones electroquímicas, reduciendo significativamente la velocidad de corrosión y protegiendo los metales de su deterioro. En el siguiente proyecto se presentarán diversos temas acerca de la corrosión y sus consecuencias, los inhibidores de corrosión junto con tipos, categorías y usos industriales. Simultáneamente, la exposición respecto a los estudios que son realizados para evaluar la corrosión mediante diferentes técnicas electroquímicas y el seleccionamiento del inhibidor verde a base de un extracto de hoja de guayaba, ahondando acerca la polarización potenciodinámica y su aplicación para el tipo de acero específico a trabajar el cual es el API 5L X65, a este acero se le realizó una caracterización metalográfica de su micro estructura con y sin el inhibidor evidenciando que hubo una disminución en la corrosión generalizada y por picaduras. Finalmente, tras realizar las pruebas electroquímicas, se determinó que el inhibidor verde seleccionado reduce la velocidad de corrosión en el acero API 5L X65 en un medio acuoso salino de NaCl al 3.56 %.

Palabras clave: Inhibidor verde. Corrosión. Análisis de polarización potenciodinámica. Caracterización metalográfica. Acero API 5L X65. Velocidad de corrosión.

INTRODUCCIÓN

Los materiales metálicos se ven afectados por un proceso natural llamado corrosión, el cual se produce debido a reacciones electroquímicas que se generan cuando estos materiales entran en contacto con el ambiente, especialmente en presencia de humedad y agentes corrosivos.

Para evitar el deterioro que provoca la corrosión en ciertos ambientes, se emplean inhibidores de corrosión. Estos inhibidores actúan como modificadores de las reacciones electroquímicas que intervienen en el proceso, logrando reducir significativamente la velocidad a la que se corroe el metal.

La corrosión implica un problema de costo y seguridad, los cuales pueden ser muy perjudiciales para diferentes sectores industriales. La pérdida de materiales por la corrosión puede ser costosa de reparar y reemplazar. NACE (*National Association of Corrosion Engineers*) realizó un estudio global sobre los costos de la corrosión y las estrategias de prevención en 2013. Este estudio se utilizó junto con los datos del sector económico del Banco Mundial y el Producto Interno Bruto (PIB) mundial para relacionar el costo de la corrosión. El estudio mostró que el costo global estimado de la corrosión era aproximadamente del 3,4% del PIB. [1]. Los gastos por la corrosión también pueden ser indirectos, como afectaciones al medio ambiente, que pueden dañar los ecosistemas locales y la salud pública.

Uno de los métodos más usados para prevenir o disminuir la reacción entre la superficie del metal y el medio circundante es el uso de inhibidores de la corrosión, productos sintéticos que se adicionan al medio corrosivo. El uso más típico es para detener la corrosión interna en tuberías de transporte de fluidos, que puedan resultar aceleradores del proceso de degradación. Es necesaria añadir productos químicos (inhibidores convencionales) a los sistemas de producción, lo que puede resultar costoso, aunque este gasto puede justificarse, ya que se reducirían los costos de mantenimiento y reparación. Los inhibidores convencionales pueden tener un impacto ambiental negativo si se liberan en el medio ambiente, algunos de estos productos químicos pueden ser tóxicos para la vida acuática y otros seres vivos que estén expuestos. El problema de los inhibidores químicos tradicionales se ha venido identificando a través de los años, por lo que se ha generado un interés creciente en el desarrollo de inhibidores verdes, los cuales son compuestos más amigables con el medio ambiente y menos tóxicos que los inhibidores

convencionales. Estos pueden ser derivados de productos naturales, como extractos de plantas y suelen ser biodegradables.

Por ejemplo, muchos de los inhibidores de corrosión tradicionales contienen iones de metales pesados, como cromo, zinc y plomo. Estos metales pueden ser liberados al medio ambiente durante la producción, el uso o la eliminación de los inhibidores de corrosión. Los iones de metales pesados pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana [2]. Es evidente la necesidad de un aumento en la cantidad de estudios respecto a otras opciones a parte de los inhibidores convencionales para intentar disminuir su impacto y se ha demostrado que los inhibidores verdes pueden llegar a ser efectivos en la protección contra la corrosión de diferentes aleaciones como el acero y el aluminio. En un estudio se evaluó la efectividad de un inhibidor verde a base de *Bauhinia tomentosa* en la protección contra la corrosión de aceros de bajo carbono, los resultados mostraron que el inhibidor verde redujo significativamente la tasa de corrosión del acero en comparación con las muestras sin inhibidor [3]. En otro se evaluó la efectividad de un inhibidor verde a base de extracto de hoja de guayaba en la protección contra la corrosión de una aleación de aluminio, los resultados indicaron que el inhibidor verde mejoró significativamente la resistencia a la corrosión de la aleación [4]. Los estudios recientes muestran que el uso de inhibidores verdes pueden ser una alternativa para la disminución del uso de inhibidores convencionales, incentivando los estudios al respecto.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Realizar un análisis comparativo de la eficacia de un inhibidor verde en diferentes concentraciones en la corrosión de acero API 5L X65, utilizando técnicas electroquímicas.

1.2. Objetivos específicos

- Seleccionar un inhibidor verde y el electrolito a ser utilizado mediante la consulta bibliográfica en revistas especializadas, buscando una opción que sea aplicable a nuestro entorno, es decir, de fácil adquisición en la ciudad.
- Caracterizar metalográficamente el acero API 5L X65 para analizar su microestructura, visualizar los daños causados por el proceso de corrosión.
- Realizar pruebas potenciodinámicas para evaluar la resistencia a la corrosión del acero API 5L X65 en presencia del inhibidor verde en diferentes concentraciones.
- Analizar los resultados obtenidos en las pruebas potenciodinámicas, determinando la concentración que presenta el mejor desempeño.

2. CORROSIÓN Y SU RELACIÓN CON PÉRDIDAS ECONÓMICAS

La norma ISO 8044 define la corrosión como el deterioro de los metales debido a la interacción fisicoquímica entre estos y su entorno o sistema técnico del que forman parte. [1]. Existen varios tipos de corrosión, que pueden variar según el entorno en el que se encuentre el material y las características del material en sí. Algunos ejemplos de tipos de corrosión incluyen la corrosión uniforme, corrosión por picaduras, corrosión intergranular y corrosión galvánica.

Figura 1.

Corrosión generalizada en tubería

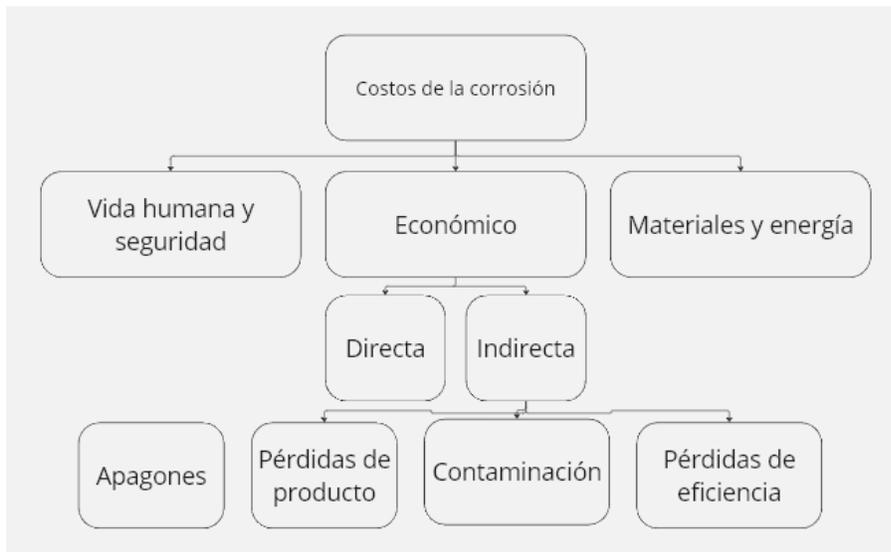


Nota. La figura muestra el efecto de la corrosión en una tubería. Tomado de Techtube. Requisitos. <https://techtube.com.mx/corrosion-en-tuberias/>

La corrosión se puede ver en diferentes áreas, como se presenta en la Figura 2, las tres categorías de pérdidas económicas por corrosión son pérdidas de materiales, energía y seguridad, asociadas a la producción y daño al ambiente y a la salud [5]. Con el resultado de pérdidas anuales significativas en diferentes sectores industriales, las cifras se estimaron a valores entre los \$375 y 875 billones de dólares en el mundo [6], si se tienen en cuenta los costos añadidos de las otras áreas, el monto estimado según la NACE llega a 2,5 trillones y no incluye la seguridad individual y las consecuencias medioambientales [6].

Figura 2.

Costos de la corrosión.



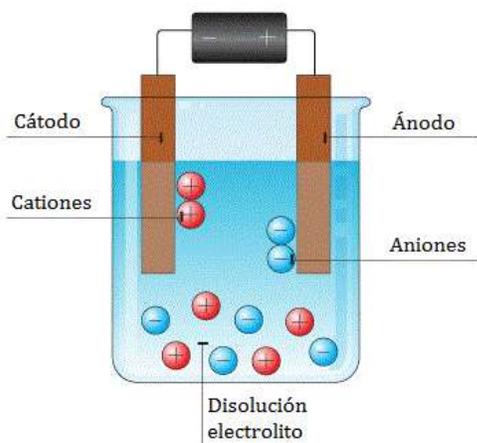
Nota. La figura muestra los costos asociados a la corrosión. Modificado de Journal of cleaner production. Requisitos. Tomado de: S. Z. Salleh et al., "Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review," Journal of Cleaner Production, vol. 304, (2021), DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127030.

El fenómeno de la corrosión se puede presentar por diversos mecanismos como: Corrosión en medios acuosos, oxidación a alta temperatura, corrosión por microorganismos y corrosión debida a metales líquidos, siendo los medios acuosos los que se presentan en mayor proporción, son responsables de alrededor del 90% de los casos [7].

Para que la corrosión en medio acuoso se dé, ocurren reacciones de reducción oxidación, conocidas como reacciones electroquímicas, deben estar involucrados por lo menos estos factores/agentes constituyentes: Electrodo, un ánodo y cátodo, un electrolito que hace de medio iónico (solución acuosa), y una conexión eléctrica entre los electrodos [8].

Figura 3.

Celda electroquímica.



Nota. La figura muestra cómo está conformada una celda electroquímica. Requisitos. Visualavi. Qué es una celda electrolítica y cómo está formada. (S.F). <https://www.visualavi.com/una-celda-electrolitica-esta-formada/>.

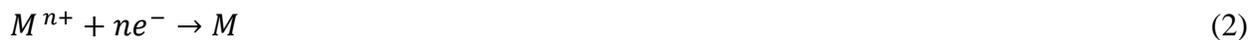
De una forma global, las dos reacciones (oxidación y reducción) que se presentan, se pueden ver de la siguiente manera:

Reacción de oxidación.



En la reacción de oxidación de un metal, se convierte en uno con $n+$ electrones de valencia con carga positiva, para que haya un balance químico, este metal pierde los mismos n electrones y al final se usa el e^{-} como representación de un electrón.

Reacción de reducción.



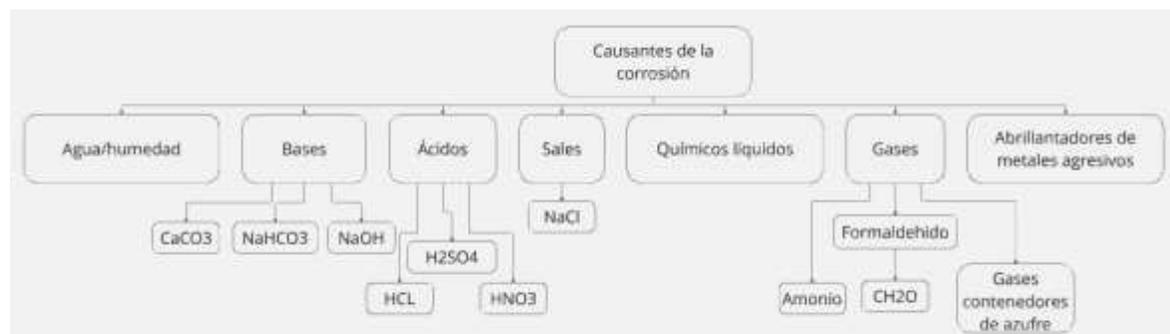
La reacción opuesta a la oxidación es la que el metal con n electrones de valencia acepta un electrón para llegar a un estado metálico neutro.

Como se podrá identificar en la Figura 4, existen varios factores que pueden contribuir a la corrosión de metales y aleaciones. Estos pueden implicar la presencia de humedad, tanto en el aire como a través del agua, así como la exposición a componentes ácidos o básicos, sales, productos químicos líquidos e incluso gases peligrosos que pueden provocar corrosión en la superficie del metal donde se produce [5]. Otro factor como la temperatura del ambiente afecta el proceso de corrosión, así como también existen ciertas cepas de especies bacterianas que se encuentran en la biopelícula de los materiales de acero, las cuales pueden acelerar el desarrollo de la corrosión y contribuir a una mayor degradación.

Durante los procesos industriales es probable que los metales y aleaciones sufran corrosión cuando se ponen en contacto con soluciones ácidas debido a que una solución ácida tiende a disolver la superficie del metal y la transforma en iones cargados positivamente, lo cual se atribuye al hecho de que el ácido ataca la superficie del metal [5].

Figura 4.

Clasificación de causas de la corrosión



Nota. La figura muestra las causas por las cuales se puede dar la degradación en metales y aleaciones. Modificado de Journal of cleaner production. Requisitos. Tomado de: S. Z. Salleh et al., "Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review," Journal of Cleaner Production, vol. 304, (2021), DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127030.

La corrosión metálica se puede presentar en varias formas, divididas en ocho categorías distintas. Entre estas categorías se incluyen el ataque uniforme, la corrosión galvánica, que ocurre cuando dos metales diferentes están en contacto eléctrico en un conductor, la corrosión por aireación diferencial, que se da cuando diferentes áreas del metal están expuestas a diferentes niveles de oxígeno, las picaduras que generan pequeñas cavidades en la superficie metálica, la corrosión

intergranular que afecta las áreas entre granos del metal y la eliminación selectiva donde ciertas áreas del metal están bajo tensión.

Con los años se obtuvo una ecuación clave para entender el comportamiento de la electroquímica, desarrollado como un concepto que abarca la degradación de los materiales estudiada, siendo esta mencionada la Ecuación de Nernst, en donde se relaciona el potencial de una celda electroquímica con la reducción estándar de potencial y la concentración de los agentes involucrados en la reacción. Esta ecuación toma en cuenta la termodinámica de un sistema electroquímico y otorga un recurso cuantitativo para predecir el comportamiento de la celda en diferentes condiciones.

Esta se expresa de la siguiente manera:

Ecuación de Nernst.

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad (3)$$

Donde E es el potencial de la celda en Voltios (V), E_0 es el potencial estándar de la celda en Voltios (V), R es la constante del gas (8.314 J/Kmol), T es la temperatura en Kelvin (K), n es el número de electrones involucrados en la reacción, F es la constante de Faraday (96485 C/mol), Q es el cociente de la reacción, el cual describe la relación entre producto de la reacción y los reactivos.

Otra ecuación clave dentro de la electroquímica es la de Butler-Volmer la cual busca relacionar la diferencia de densidades de corrientes catódica y anódicas con el sobrepotencial.

Ecuación de Butler-Volmer:

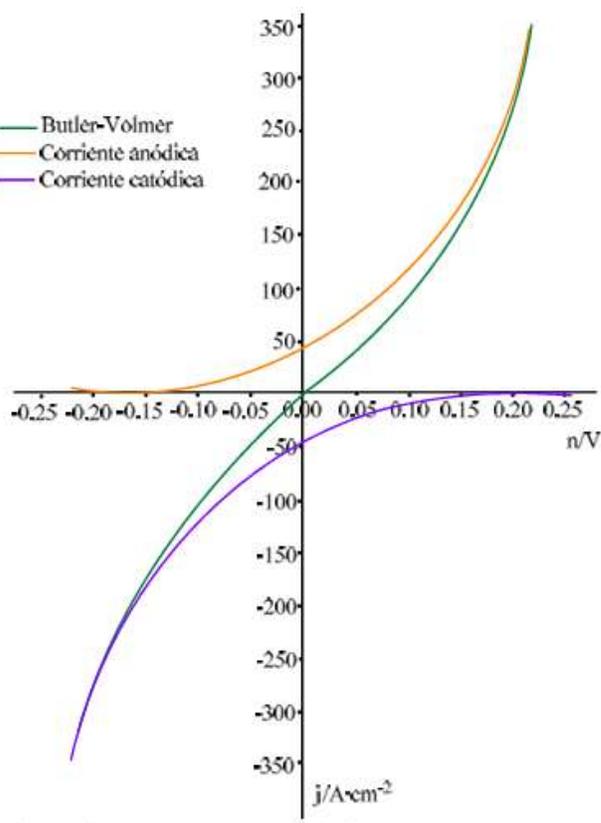
$$j = j_0 \cdot (e^{(1-\alpha)F\eta} - e^{-\alpha F\eta}) \quad (4)$$

Donde j es la densidad de corriente del electrodo en unidades de amperios por metro cuadrado (A/m^2), j_0 la densidad de corriente de intercambio también en unidades de amperios por metro cuadrado (A/m^2), α el coeficiente de transferencia de carga, F es la constante de Faraday y η el sobrepotencial ($E-E_0$). Esto se puede apreciar de mejor forma al graficar esta ecuación y compararla con las corrientes anódicas y catódicas en un escenario teórico, así como lo muestra

la Figura 5, en dónde se puede ver en color verde gracias a la Ecuación de Butler-Volmer, el resultado de la diferencia entre las corrientes catódicas y anódicas en colores morado y naranja respectivamente, así mismo esta es una representación visual de cómo la densidad de corriente en una reacción electroquímica que varía en función del sobrepotencial aplicado.

Figura 5.

Gráfica de las densidades de corriente



Nota. La figura muestra un ejemplo de la relación entre las densidades de corriente con un sobrepotencial. Requisitos. Tomado de: OCW. Apuntes de electroquímica. https://ocw.uca.es/pluginfile.php/2201/mod_resource/content/1/Leccion%202014%20Butler%20Volmer.pdf

3. INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Los inhibidores de corrosión son compuestos químicos que se agregan a los materiales para disminuir su fenómeno de corrosión. Estos actúan de diferentes maneras y estas dependen del tipo de inhibidor que se utiliza. Existen varios tipos de inhibidores, unos ejemplos de estos son catódicos y anódicos, volátiles y no volátiles, orgánicos e inorgánicos [9]. Los inhibidores de corrosión catódicos reducen la velocidad de corrosión en la superficie metálica, mientras que los anódicos aumentan la velocidad de corrosión en una zona localizada, lo que reduce la velocidad de corrosión [9]. Los orgánicos e inorgánicos funcionan de manera diferente: los inhibidores orgánicos actúan formando una capa protectora en la superficie metálica, mientras que los inhibidores inorgánicos se unen químicamente a la superficie del metal para prevenir la oxidación [9]. Los inhibidores volátiles son aquellos que se evaporan fácilmente y se transportan por el aire, mientras que los no volátiles permanecen en la superficie del metal. Los inhibidores también pueden clasificarse según su origen, que pueden llegar a ser naturales, sintéticos o mixtos [10].

Cuando se respecto a los inhibidores de corrosión a lo largo de la literatura, se encuentra en repetidas ocasiones, la obligatoriedad de hablar de la eficacia de dicho inhibidor, esta es expresada con un valor numérico definida por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{\%} = \frac{A_0 - A_1}{A_0} 100 \quad (5)$$

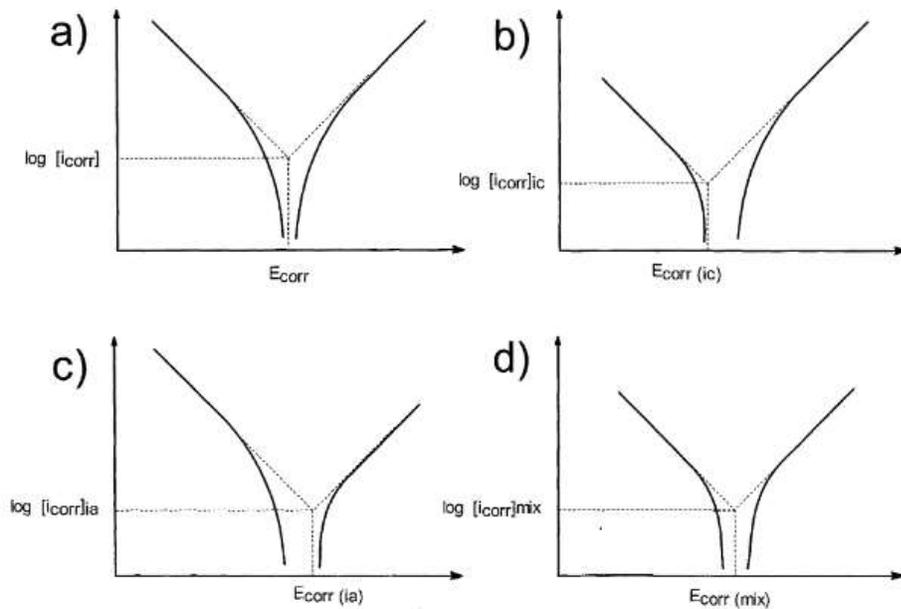
En donde dependiendo del método que se utilice, A_0 puede representar la pérdida de masa, cantidad de hidrógeno formado o la intensidad de la corriente de corrosión del metal inmerso y A_1 la magnitud correspondiente cuando la disolución contiene el inhibidor [10].

3.1. Inhibidores anódicos, catódicos y mixtos

Los inhibidores anódicos ralentizan las semirreacciones anódicas y los catódicos las catódicas, a parte de estos dos inhibidores, están los mixtos que actúan en ambas semi reacciones. Cuando se agrega un inhibidor al sistema, el efecto del inhibidor se puede observar a través de cambios en el potencial de equilibrio del metal a proteger. Por lo tanto, mientras que los inhibidores anódicos

provocarán que el potencial se desplace hacia valores más positivos, los inhibidores catódicos desplazarán el potencial de corrosión hacia valores más negativos [10]. Los inhibidores mixtos, catódicos y anódicos, que pueden suprimir rápidamente la corrosión generalizada, pero se debe tener cuidado en su manipulación, ya que una concentración inferior a la óptima puede generar corrosión por picaduras [10].

Figura 6.
Curvas Tafel



Nota. En la figura se muestran las gráficas de un sistema en: a) ausencia y presencia: b) de un inhibidor catódico; c) un inhibidor anódico y d) un inhibidor mixto. Requisitos. Tomado de revista de metalurgia. (S.F.).

<https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/325/327>

3.2 Inhibidores volátiles

Los inhibidores volátiles, son compuestos particulares debido a que mediante altas presiones de vapor saturan la atmosfera cerrada con la que está en contacto la pieza que se desea proteger [16]. Estos inhibidores se usan para evitar la corrosión atmosférica durante el almacenaje y el transporte de muchos elementos metálicos [10].

La clave de estos inhibidores es la presión de vapor, la cual debe ser suficiente para saturar rápidamente el ambiente del espacio cerrado y también debe ser dosificada para lograr una duración prolongada de este, se debe tener en un espacio hermético para que el efecto de dicho inhibidor pueda alcanzar largos intervalos que pueden ir desde meses hasta años, lo recomendable es que dicha presión vaya de $2 \cdot 10^{-4}$ a 10^{-3} mm de Hg a 21°C [10].

4. USOS INDUSTRIALES

Los inhibidores de corrosión desempeñan un papel vital en el momento de extender la vida útil de equipos y estructuras metálicas, reducir los costos de mantenimiento y aumentar la eficiencia operativa. Por eso son empleados en varias aplicaciones y sectores industriales que pueden prosperar en los agresivos de la industria. Al ser un mundo tan amplio, se hará un enfoque a las principales aplicaciones e industrias para no entrar en una extensión innecesaria.

Al principio se tiene la industria del acero, donde los inhibidores se usan para proteger sus estructuras metálicas contra la corrosión, estas estructuras metálicas pueden estar expuestas al medio ambiente y esto puede resultar ideal para la degradación del material, como los ambientes marinos, donde solo hay agua salada eleva el riesgo a la corrosión. Como se mencionó, se usan inhibidores volátiles para conservar acero y otros metales, en almacenes herméticamente sellados para prolongar su efecto.

En cuanto a estructuras, el acero no es la única industria que emplea inhibidores, también se usan para conservar estructuras de hormigón armado, que pueden afectarse y degradarse consecuentemente, estos inhibidores pueden aplicarse superficialmente o inyectarse, dependiendo del caso, de si es antes o después de hacer la estructura [9]. Las industrias química, petrolera, marítima, de transporte y de comunicaciones, entre otras, son más ejemplos de industrias bien posicionadas.

5. INHIBIDORES VERDES

Anteriormente se habló acerca de los inhibidores naturales, también conocidos como inhibidores verdes, los cuales son una opción ecológica que se puede formular con ingredientes naturales y biodegradables. Algunas propiedades importantes a considerar al elegir un inhibidor verde son su capacidad para formar una capa uniforme sobre toda la superficie del metal, la estabilidad en ambientes corrosivos y la resistencia al lavado [11]. Algunos de los inhibidores verdes más comunes son los derivados de ácidos grasos, extractos de plantas y polisacáridos [11].

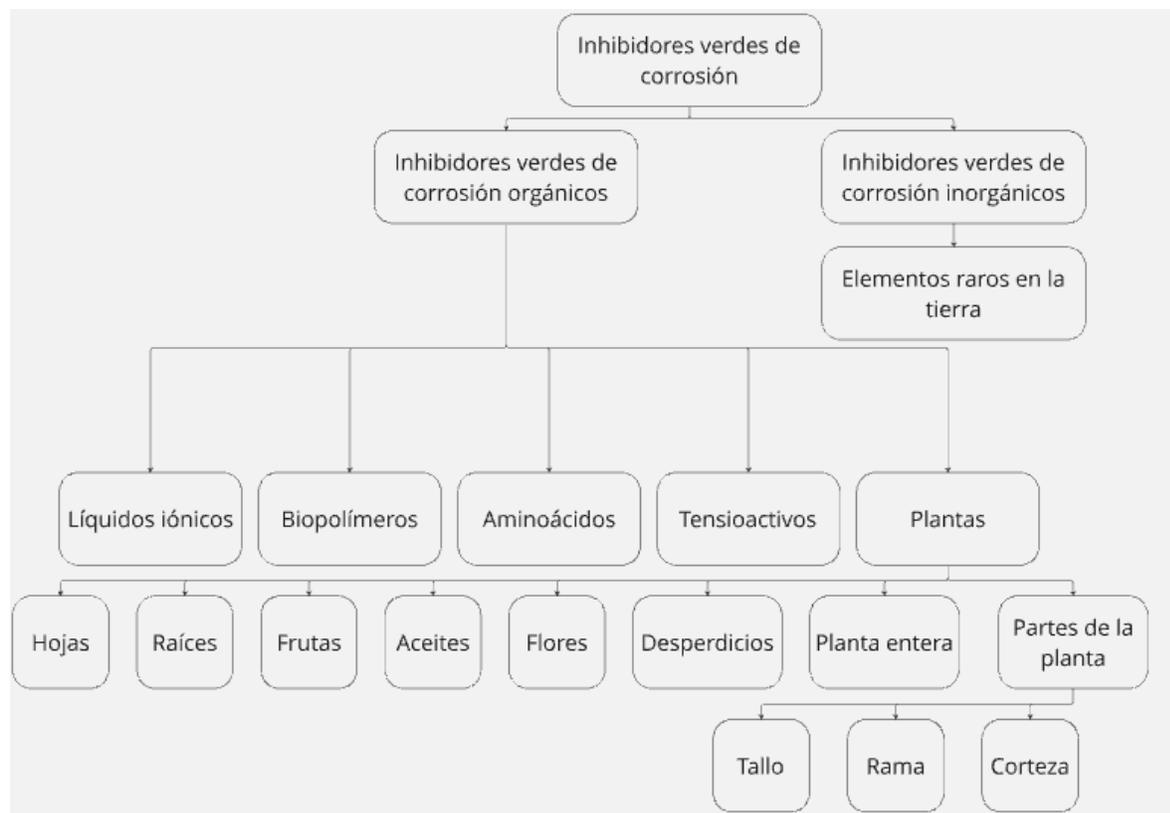
Se ha logrado evaluar la eficacia de un inhibidor verde preparado a partir de extractos de plantas para proteger el acero con bajo contenido de carbono en una solución de hormigón con poros simulados y los resultados mostraron que el inhibidor verde reduce significativamente la tasa de corrosión del acero al carbono [12], lo que sugiere que este tipo de inhibidor es una alternativa prometedora para proteger el acero contra la corrosión en ambientes corrosivos similares. Los autores concluyeron que los inhibidores verdes son una alternativa atractiva para la protección contra la corrosión debido a sus propiedades respetuosas con el medio ambiente y la inhibición de la corrosión.

Los inhibidores verdes pueden catalogarse en dos grupos principales, los orgánicos e inorgánicos, que se desglosan principalmente en los orgánicos, ya que el otro grupo es exclusivo para elementos raros en la naturaleza [11]. Los inhibidores verdes orgánicos se desenvuelven en un grupo extenso, desde aminoácidos, frutas, aceites, flores, etc. También considerando que la mayoría de estos tipos de inhibidores se dividen por tipos de plantas, porque a la mayoría se les pueden extraer varios métodos basados en enfriar, calentar y separar los compuestos bajo un solvente, y facilita la obtención de extractos fitoquímicos [11].

La Figura 7 muestra la composición de los inhibidores de corrosión de base orgánica, OGCI, sintéticos y ambientalmente seguros. El uso de inhibidores de corrosión de base inorgánica en sistemas acuosos está muy extendido debido a su alta productividad. Wei et al. (2020) sugiere que los inhibidores de corrosión orgánicos tienen más beneficios en comparación [13]. Estos inhibidores orgánicos tienen la capacidad de brindar la máxima protección contra medios agresivos al pasivar uniformemente la superficie del metal [13]. Por el contrario, los inhibidores inorgánicos crean una capa pasiva quebradiza en la superficie del metal, haciéndola vulnerable a ataques localizados como la corrosión por picaduras y la corrosión por grietas [9].

Figura 7.

Clasificación de los inhibidores verdes.



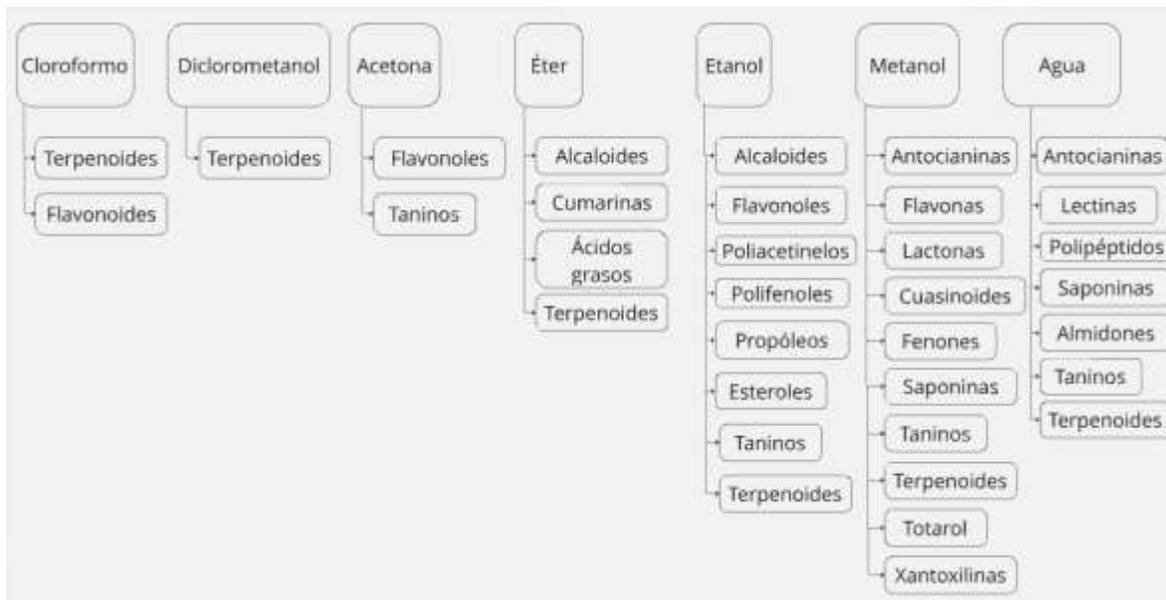
Nota. La figura muestra la agrupación de los tipos de inhibidores verdes. Modificado de Journal of cleaner production. Requisitos. Tomado de: S. Z. Salleh et al., "Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review," Journal of Cleaner Production, vol. 304, (2021), DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127030.

Dependiendo del solvente que se use para obtener los extractos, los fitoquímicos encontrados son de gran variedad, van de diferentes alcoholes a aceites. Se ha podido observar que la mayor cantidad de fitoquímicos obtenidos han sido gracias a cuando se ha usado el metanol como solvente, seguido de este el etanol y el agua, como presentado en la Figura 8, menciona ejemplos de varios solventes de extracción y los extractos activos resultantes de las plantas. Pueden usarse diferentes solventes como medios de extracción para obtener extractos deseados o concentraciones específicas de fitoquímicos. También se reportó que el extracto de etanol mostró un contenido excepcionalmente alto de taninos, flavonoides y fenoles totales en comparación con

el extracto de acetona [8]. Así como varias comparaciones nos dan como resultado el listado de la Figura 8.

Figura 8.

Tipos de fitoquímicos obtenidos con diferentes solventes.



Nota. La figura muestra la agrupación de los tipos fitoquímicos que se logran obtener usando diferentes solventes. Modificado de Journal of cleaner production. Requisitos. Tomado de: S. Z. Salleh et al., "Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review," Journal of Cleaner Production, vol. 304, (2021), DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127030.

5.1. Estudios de inhibidores verdes

La investigación requiere de presentar y analizar diversos casos de estudio existentes y que enfocan su interés en el estudio de inhibidores verdes, haciendo una tabla en donde se considerarán aspectos claves junto con su respectiva referenciación para poder escoger el inhibidor de este trabajo con solidez teórica.

Tabla 1.*Estudios sobre inhibidores verdes*

Inhibidor Verde	Lugares de adquisición	Material	Solución (Electrolito)	Técnica de caracterización	Referencia
Yerba Mate	Argentina, Brasil y Paraguay	Aluminio	HCl 0.1 M	-Pérdida de masa -Polarización potenciodinámica -EIS	[14]
Polivinilpirrolidona (PVPC) dopada con cisteína	N/A	Acero dulce	HCl 1.0 M	-Análisis gravimétrico	[15]
Extracto de hoja de Sonneratia Caseolaris	Senegal, Ghana, Nigeria	Acero dulce	HCl 1.0/0.5/0.1/0.0 1 M	-Polarización potenciodinámica	[16]
Derivado de naftiridina	N/A	Acero dulce	HCl	-EIS	[17]
Extracto hoja de guayaba	Colombia, México, Cuba, Venezuela	Aleación Al-Si-Mg	NaCl al 3,5%	-Análisis gravimétrico -Pérdida de masa -Polarización potenciodinámica	[4]
Combretum glutinosum	Senegal, Ghana, Nigeria	Aleación Al-Si-Mg	NaCl al 3,5%	-Pérdida de masa -Polarización potenciodinámica	[18]
Extracto hoja de guayaba	Colombia, México, Cuba, Venezuela	Zinc	HCl 1.0 M	-Pérdida de masa -EIS -Polarización potenciodinámica	[19]

Extracto de hojas de Bauhinia tomentosa	Asia, África	Acero dulce	HCl 1.0 M	-Pérdida de masa -Polarización potenciodinámica	[3]
---	--------------	-------------	-----------	---	-----

Nota. En esta tabla se filtró información respecto estudios realizados con inhibidores verdes, clasificándolos por el inhibidor verde, país donde se encuentra, el material en el que se usó, la solución (Electrolito) empleada, las técnicas de caracterización del estudio y, al final, la referencia de donde se obtuvo la información.

5.2. Selección del inhibidor verde y solución

Después de haber realizado búsquedas bibliográficas respecto a los estudios respecto al tema, es necesario para este trabajo el determinar el inhibidor verde más conveniente para trabajar con este, basándose también en la solución electrolítica que se va a emplear, esta también debe tener coherencia con la información brindada en la Tabla 1, por otro lado, la técnica de caracterización y el material se determinaron desde el inicio del trabajo y concuerdan con lo encontrado en la literatura.

La solución determinada para el trabajo es el medio salino para obtener uno resultados más detallados debido al propósito original del acero, el cual es para tuberías e industria petrolera, además de buscar no dañar rápidamente el metal a trabajar, por lo que este será otro de los criterios a tener en cuenta.

Se mostrará en la siguiente Tabla 2, una matriz de prioridad, la cual, con base a determinados criterios que serán o no cumplidos, esto dará una suma de puntos que ayudará a la determinación del inhibidor a utilizar para las pruebas que se mostrarán más adelante.

Tabla 2.

Matriz de prioridad para la selección del inhibidor verde

Inhibidor estudiado	Sobre acero	Realizado en NaCl	Polarización Poten.	# estudios	Forma aceitosa	Asequible	Pt
Yerba Mate	0	0	1	1	1	1	4
PVPC	0	0	0	1	0	0	1

Extracto de hoja de Sonneratia Caseolaris	1	0	1	1	1	0	4
Derivado de naftiridina	1	0	0	1	0	0	2
Combretum glutinosum	0	1	1	1	1	1	5
Extracto de hojas de Bauhinia tomentosa	1	1	1	2	1	1	7

Nota. En esta tabla se evidencia una matriz de prioridad que determinó el inhibidor verde a utilizar en el trabajo.

De los factores más importantes a considerar de la Tabla 1, es la adquisición de dicho inhibidor, la forma aceitosa para una mejor manipulación y la popularidad de este, el extracto de hoja de la *psidium guajaba* (Guayaba) fue el inhibidor que cuenta con todas estas características, este ha demostrado cierta popularidad en el tema de estudio y no solamente para la creación de anticorrosivos, sino debido a varias de sus propiedades, como lo son medicinales y para sintetizar compuestos químicos. Se adquirió en una tienda naturista como aceite esencial de hoja de guayaba, se contactó con el fabricante para consultar el proceso de obtención del extracto, y respondió que el extracto se obtenía mediante una destilación por arrastre de vapor y que las cantidades de hojas de guayaba se recogían dentro del mismo negocio. En cuanto a concentraciones el fabricante aclaró que aún no contaban con una ficha técnica del producto debido a que las propiedades y concentraciones del extracto cambiaban constantemente incluso dentro del mismo terreno.

El extracto cuenta con diversos fitoquímicos, basándose en la Figura 8 y el proceso de obtención se logran rescatar fitoquímicos con diversas propiedades antioxidantes como lo son los polifenoles, taninos, etc. Es gracias a estas propiedades que se tiene la teoría de que este extracto puede dar resultados positivos en el efecto inhibitorio de la velocidad de corrosión para este trabajo, además de que este mismo ya ha arrojado resultados positivos en los trabajos anteriormente mencionados en las Tablas 1 y 2. Así mismo, este no ha sido corroborado para este tipo de acero en lo que respecta a lo consultado a lo largo de este trabajo, dándole más peso al realizar esta selección y de esta forma contribuir al número de estudios realizados a base de este extracto y de poder fomentar más estudios respecto a este tema.

6. TÉCNICAS UTILIZADAS EN EL ESTUDIO DE INHIBIDORES VERDES

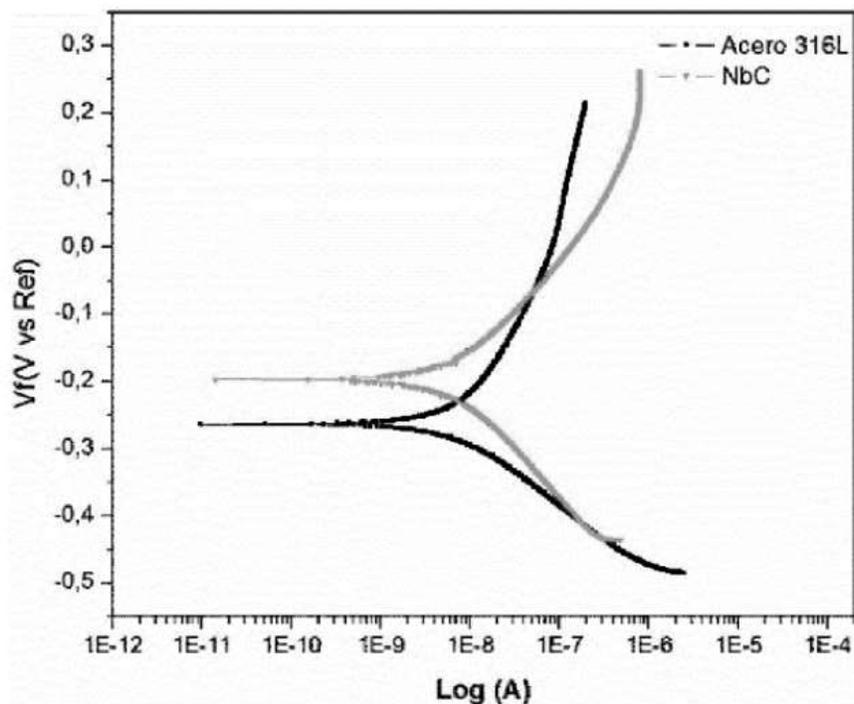
A lo largo de este trabajo se han ido mencionando varias técnicas que son comúnmente practicadas para poder estudiar de diferentes maneras la efectividad de los inhibidores verdes, en este apartado se abarcarán de forma más profunda para una mayor comprensión de lo dicho anteriormente y una gran parte de estas están relacionadas con la electroquímica implicada en el fenómeno de la degradación de los metales.

6.1. Polarización potenciodinámica

Esta primera técnica también conocida como resistencia de polarización potenciodinámica es un método electroquímico, existen entidades internacionales que ven este procedimiento tan necesario en la industria que se ha logrado crear una estandarización de esta prueba, tal es el caso de ASTM (American Society of Testing Materials), en donde su norma ASTM G59-97 nos detalla cómo puede ser realizada esta prueba y sus posibles usos, puede ser utilizada para la verificación del rendimiento de equipos de medición a la resistencia de la polarización que van desde celdas electroquímicas hasta potenciostatos, esta prueba también nos dice que la resistencia a la polarización está comúnmente asociada a la corrosión generalizada y para monitorear esta, se debe llevar a cabo en tiempo real para lograr un resultado más rápido y preciso [20]. Para esta prueba, primero se debe preparar la muestra del material, esta se coloca en una celda electroquímica que permita el flujo del electrolito alrededor de la muestra para posteriormente establecer un potencial inicial durante un periodo de tiempo también inicial, al potencial se le debe aplicar una pequeña variación que puede ser tanto de incremento o decremento y se mide la corriente resultante, lo cual genera una curva de polarización que muestra la relación entre el potencial aplicado y la corriente resultante [20], así como se puede apreciar en la Figura 9 a continuación.

Figura 9.

Ejemplo curvas de polarización



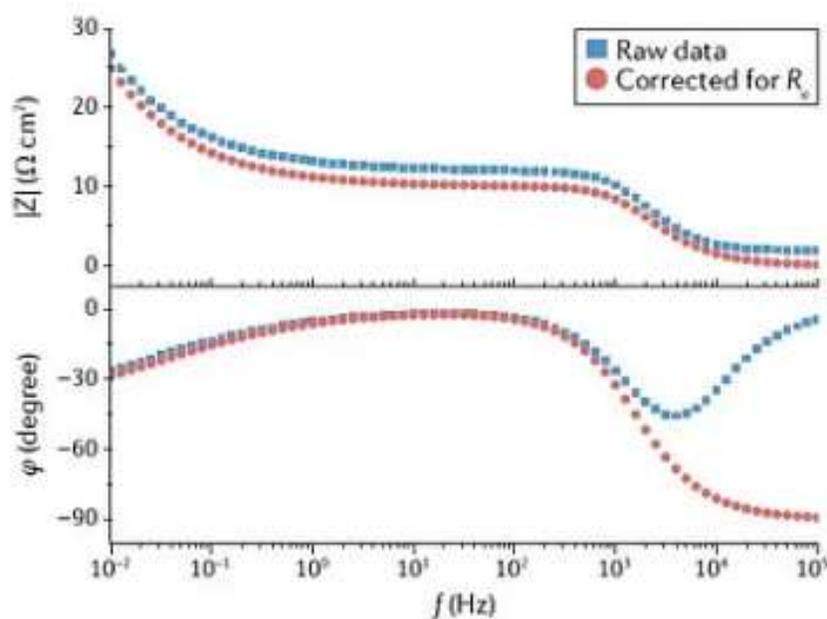
Nota. La figura muestra un ejemplo de las curvas de polarización potenciodinámicas de un acero 316L y un recubrimiento NbC. Tomado de ResearchGate. Requisitos. https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Curvas-polarizacion-potenciodinamica-del-acero-316L-y-del-recubrimiento-NbC_fig2_263859479

6.2. Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) es un sistema donde se evalúa según la frecuencia de una pequeña señal de CA aplicada, donde gracias a equipos que permiten la recopilación de espectros de impedancia, y en los gráficos de Bode, que muestran un ángulo de fase F como un algoritmo del módulo de impedancia, evidenciando valores máximos y mínimos del ángulo de fase, que son los indicadores sensibles de las propiedades del sistema [21], así como lo veremos en la Figura 10.

Figura 10.

Ejemplo EIS visto en gráficos de Bode



Nota. La figura nos muestra un ejemplo de los que sería un EIS visto desde unos gráficos de Bode. Tomado de Medium. Requisitos. <https://medium.com/@biomtis.peru/qu%C3%A9-es-la-espectroscopia-de-impedancia-electroqu%C3%ADmica-eb245997c818>

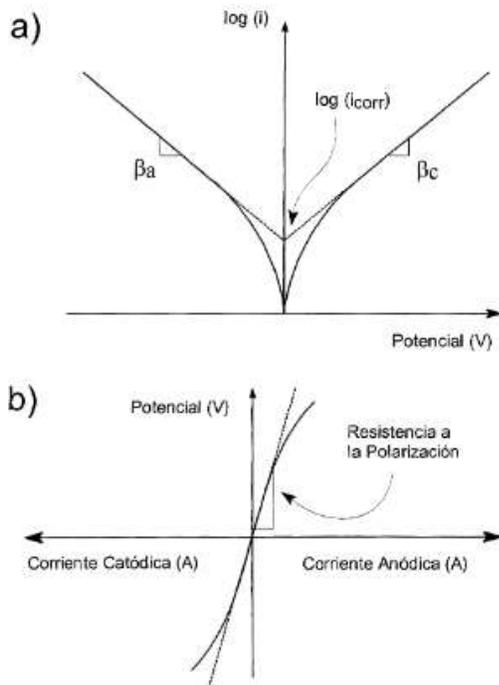
Como se puede apreciar en la Figura 10, están presentes dos conjuntos de datos; los datos crudos, que se asemejan a los puntos azules y reflejan la impedancia medida y sin corrección, y los datos corregidos, que parecen los puntos rojos y reflejan la impedancia posterior a la corrección por una resistencia R_s , que probablemente sea la resistencia de la solución. Esta segunda corrección se lleva a cabo en razón de lograr obtener una imagen mucho más certera de los fenómenos electroquímicos que tienen lugar frente a la convivencia electrodo-electrolito.

6.3. Extrapolación de Tafel

La extrapolación de Tafel fue una de las primeras técnicas vistas en este trabajo, la cual se aprecia en la Figura 6 y en la Figura 11 que viene a continuación, dando como simple anotación que la extrapolación de Tafel es la extrapolación de curvas semilogarítmicas de un estudio potenciodinámico, como lo puede ser la resistencia de polarización [10].

Figura 11.

Ejemplo de la extrapolación de Tafel



Nota. La figura muestra a) Curva teórica de Tafel; b) Curva obtenida mediante resistencia de polarización. Requisitos. Tomado de: revista de metalurgia. (S.F). <https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/325/327>

En estas gráficas, el logaritmo de la densidad de corriente se plotea con el potencial aplicado en donde se pueden apreciar unas regiones lineales presentes en ambos extremos de la curva, es decir, las regiones anódica y catódica. Estas regiones adhieren a la extrapolación que relaciona la densidad de corriente con ella sobre el potencial. La pendiente de estas regiones lineales se relaciona con la transferencia de carga en los procesos de oxidación electroquímica y de reducción, también está presente la corriente de corrosión la cual se trata del punto de intersección de las extrapolaciones de las regiones lineales de reacción anódica y catódica. Representa la densidad de corriente en la que la reacción de oxidación y la velocidad de reacción de reducción son iguales, es decir, un estado estacionario de corrosión.

6.4. Velocidad de corrosión por pérdida de masa

La velocidad de corrosión por pérdida de masa es una de las técnicas más utilizadas en este campo, donde se pretende conocer la velocidad de corrosión de un metal con una ecuación simple que tiene como factor importante la cantidad de masa perdida en la exposición [10].

$$V_c = \frac{K \cdot W}{A \cdot t \cdot D} \quad (6)$$

Donde V_c es la velocidad de corrosión, K la constante del material *D, t el tiempo de exposición, A el área, W la pérdida de masa y D la densidad del material.

Esta velocidad de corrosión suele darse en $\text{gr/m}^2 \cdot \text{h}$, aunque también suele expresarse en $\mu\text{m/año}$.

7. ACEROS MICRO ALEADOS

Alrededor de los años 1950 se implementaron los aceros microaleados para que así se pudiera aumentar la resistencia mecánica de los aceros. Se evidenció la necesidad de disminuir el contenido de carbono, porque los aceros con alta concentración de carbono los hacía más propensos a ser menos soldables, ya que se creaban microfracturas, para lograrlo, era necesario disminuir dicho contenido, pero al disminuirlo, el acero también perdía otras propiedades como su límite elástico, disminuyendo la energía máxima absorbida (impacto) y aumentaba su energía de transición [22].

Cuando se disminuía el contenido de carbono para aumentar sus otras propiedades, se llevaron a cabo diseños de acero de extra bajo carbón, estos tenían contenidos menores al 0.02 %, desarrollando los problemas anteriormente mencionados. Se empezaron a desarrollar aceros con diferentes grados de carbono y se clasificaron según el grado de resistencia elástica, como X52, X55, X60, X65, X70, así mismo este grado de los aceros también indica que entre más alto sea este, mayores son los porcentajes de los microaleantes tales como niobio, vanadio, titanio, etc. y menor contenido de carbono [22].

En sus inicios, la clasificación de los aceros era tan simple como su contenido de carbono: alto carbono, medio carbono y bajo carbono. Sin embargo, con el advenimiento de la era de las aleaciones, el panorama se tornó más complejo y diverso. La incorporación de elementos como el cromo y el níquel dio lugar a una nueva categorización: aceros de alta aleación, media aleación y baja aleación.

Bajo este nuevo sistema, los aceros inoxidable, reconocidos por su resistencia a la corrosión, encontraron su lugar, al igual que los aceros para herramientas, esenciales en una amplia gama de aplicaciones. Cabe destacar que los aceros microaleados surgieron a partir de los aceros de bajo carbono, incorporando pequeñas cantidades de elementos aleantes para mejorar sus propiedades sin comprometer su trabajabilidad.

7.1. Tubería API 5L X65

Las tuberías de acero al carbono API 5L X65 son un componente crucial en la industria del petróleo y gas, utilizada para el transporte de fluidos y gases. Su alta resistencia y durabilidad las

convierten en una opción atractiva para proyectos de infraestructura energética a gran escala [23].

Las tuberías de grado X65 se clasifican en dos niveles: PSL-1 y PSL-2. Esta diferenciación se basa en los requisitos de prueba y los niveles de aceptación de defectos. PSL-1: No requieren pruebas de impacto y no destructivas, lo que reduce los costos de fabricación. PSL-2: Se someten a pruebas de impacto y no destructivas más rigurosas para garantizar un mayor nivel de calidad y seguridad [23].

Las tuberías API 5L X65 se producen mediante dos métodos principales. laminado en caliente o forjado, seguidos de un tratamiento térmico para alcanzar las propiedades deseadas de resistencia y dureza. Laminado en caliente: Este proceso consiste en pasar un tocho de acero incandescente a través de rodillos a alta presión y temperatura, moldeándolo gradualmente hasta obtener la forma y dimensiones deseadas del tubo. Forjado: En este método, se utiliza una prensa o martillo para deformar el acero en bruto, aplicando presión y calor controlados. El forjado permite obtener formas más complejas y una mejor distribución de las propiedades mecánicas en el material [23].

Una vez que el tubo se ha fabricado mediante laminado en caliente o forjado, se somete a un tratamiento térmico para refinar su estructura cristalina y lograr las propiedades mecánicas deseadas. Este tratamiento puede incluir recocido, normalizado, temple y revenido, entre otros procesos.

Los tubos de acero están disponibles tanto en formas sin costura como soldadas. Las tuberías sin costura se fabrican a partir de un tocho macizo de acero, mientras que las soldadas se obtienen uniendo dos láminas de acero mediante un proceso de soldadura. Las tuberías soldadas son más comunes debido a su menor costo de producción y son utilizadas mayormente en tuberías [23].

Todo lo mencionado, hizo que este tipo de acero adquiriera propiedades como la alta resistencia a la tracción, ya que ofrecen una resistencia a la tracción mínima de 450 MPa, lo que las hace más fuertes que otros tipos de tuberías. Durabilidad gracias a que son fabricadas con acero al carbono de alta calidad, estas tuberías resisten el desgaste y la corrosión durante un período prolongado, lo que reduce los costos de mantenimiento y reemplazo. Resistencia a la corrosión dando una alta resistencia a la corrosión, lo que las hace adecuadas para servicios ácidos, como el transporte de petróleo agrio o gas natural con alto contenido de sulfuro [23].

Figura 12.

Composición química y resistencia mecánica de tubería API 5L X65 ofrecida por la empresa HT tuberías Zhengzhou Huitong Pipeline Equipment Co.,Ltd.

Composición química de tuberías de API 5L X65

Grado	C	P	S	Mn
API 5L X65 Máx.	0,26	0,03	0,03	1,45

Resistencia mecánica de los tubos de API 5L X65

Grado	Tensión (mín) Psi	Límite Elástico (mín) Psi	Alargamiento (mín) %
API 5L X65	77 500	65 300	21

Nota. La figura muestra la composición química y resistencia mecánica de la tubería API 5L X65 ofrecida por la empresa HT tuberías Zhengzhou Huitong Pipeline Equipment Co.,Ltd.. Requisitos. HT tuberías Zhengzhou Huitong Pipeline Equipment Co.,Ltd. (2023, marzo 24). Tuberías de acero al carbono API 5L X65, Tuberías de línea API 5L X65, Tuberías de grado X65. <https://www.octalacero.com/norma-api-5l>.

Además de empresas dedicadas a fabricar el material, también se tiene por norma de la API (Instituto Americano del Petróleo) los requerimientos que debe tener el acero para cumplir con la clasificación, dichos requerimientos se mostrarán en las Figuras 13 y 14, donde se podrán apreciar no sólo de la clasificación API 5L X65 y PSL-2, sino también de otros grados diferentes y si son sin costura o tubo soldado.

Figura 13.

Composición química de tuberías API 5L para nivel PSL-2 sin costura según la norma.

Grado del acero (nombre del acero)	Fracción de masa, basada en el análisis térmico del producto(%)			
	C	Mn	P	S
Tubería sin costura				
L415 ó X60	0,28 e	1,40 e	0,03	0,03
L450 ó X65	0,28 e	1,40 e	0,03	0,03
L485 ó X70	0,28 e	1,40 e	0,03	0,03

Nota. La figura muestra la composición química de diferentes grados de aceros API 5L nivel PSL-2 sin costura, las leyendas y sus respectivos significados se encontrarán en la Figura 14. Modificado de API. Requisitos. American Petroleum Institute (API). (2012, December). Especificación para tubería de conducción ESPECIFICACIÓN 5L DE API CUADRAGÉSIMA QUINTA EDICIÓN. (Effective Date: July 1, 2013).

Figura 14.

Composición química de tuberías API 5L para nivel PSL-2 tubo soldado según la norma.

Tubo soldado				
L415 ó X60	0,26 e	1,40 e	0,03	0,03
L450 ó X65	0,26 e	1,45 e	0,03	0,03
L485 ó X70	0,26 e	1,65 e	0,03	0,03

a Cu ≤ 0,50 %; Ni ≤ 0,50 %; Cr ≤ 0,50 % y Mo ≤ 0,15%

b Por cada reducción de 0,01%, por debajo de la concentración máxima especificada para el carbono, un aumento del 0,05% por encima de la concentración máxima especificada para el Mn es permisible, hasta un máximo de 1,65% para los grados ≥ L245 ó B, pero ≤ L360 ó X52; hasta un máximo de 1,75% para los grados > L360 ó X52, pero < L485 ó X70; y hasta un máximo de 2,00% para el grado L485 ó X70.

c A menos que se acuerde otra cosa, Nb + V ≤ 0,06 %.

d Nb + V + Ti ≤ 0,15 %.

e A menos que se acuerde otra cosa.

f A menos que se acuerde otra cosa, Nb + V + Ti ≤ 0,15 %.

g No se permite adición deliberada de B está permitido y el B residual ≤ 0,001%.

Nota. La figura muestra la composición química de diferentes grados de aceros API 5L nivel PSL-2 tubo soldado con las leyendas y sus respectivos significados. Modificado de API. Requisitos. American Petroleum Institute (API). (2012, December). Especificación para tubería de conducción ESPECIFICACIÓN 5L DE API CUADRAGÉSIMA QUINTA EDICIÓN. (Effective Date: July 1, 2013).

Ya que se puede ver según la norma la composición química normativa, se procederá a mostrar en las Figuras 15 y 16, la información de las propiedades mecánicas con clasificaciones de tubería sin costura y tubo soldado.

Figura 15.

Propiedades mecánicas de tuberías API 5L para nivel PSL-1 sin costura y tubo soldado según la norma.

Grado del acero (nombre del acero)	Cuerpo del tubo de tubos sin costura y soldados			Costura de soldadura de tubos
	Límite de elasticidad a Mpa(psi)	Resistencia a la tensión a Mpa(psi)	Elongación	Resistencia a la tensión b Mpa(psi)
L415 ó X60	415 (60200)	520 (75400)	c	520 (75400)
L450 ó X65	450 (65300)	535 (77600)	c	535 (77600)
L485 ó X70	485 (75300)	570 (82700)	c	570 (82700)

a Para los grados intermedios, la diferencia entre la resistencia a la tensión mínima especificada y el límite elástico mínimo especificado para el cuerpo del tubo será el que se da en la tabla para el grado inmediatamente superior.

b Para los grados intermedios, la resistencia a la tensión mínima especificada para la costura de soldadura deberá ser el mismo valor que se determinó para el cuerpo del tubo usando la nota del pie de página a).

c La elongación mínima especificada, A_f , expresada en porcentaje y se redondea al porcentaje más cercano, será la que determine con el uso de la siguiente ecuación:

$$A_f = C \frac{A_{xc}^{0.2}}{U^{0.9}}$$

en donde

- C es 1 940 para los cálculos que utilizan unidades SI y 625 000 para los cálculos que utilizan unidades USC;
- A_{xc} es el área transversal de la pieza de ensayo de tensión aplicable, expresada en milímetros cuadrados (pulgadas cuadradas), como sigue:
 - para piezas de ensayo de sección circular, 130 mm² (0.20 in²) para piezas de ensayo de diámetro 12,7 mm (0.500 in) y 8,9 mm (0.350 pulg); y 65 mm² (0.10 pulg²) para piezas de ensayo de diámetro de 6,4 mm (0.250 pulg);
 - para piezas de ensayo de sección completa, el menor de a) 485 mm² (0.75 pulg²) y b) el área de sección transversal de la pieza de ensayo, derivada del uso del diámetro exterior especificado y el espesor de pared especificado del tubo, redondeado a los 10 mm² (0.01 pulg²); más cercanos
 - para piezas de ensayo de listón, el menor de a) 485 mm² (0.75 pulg²) y b) el área de la sección transversal de la pieza de ensayo, derivada del uso del ancho especificado de la pieza de prueba y el espesor de pared especificado del tubo, redondeado a los 10 mm² más cercanos (0.01 pulg²);
- U es la resistencia mínima de tensión especificada, expresada en megapascales (libras por pulgada cuadrada).

Nota. La figura muestra las propiedades mecánicas de diferentes grados de aceros API 5L nivel PSL-1 sin costuras y tubo soldado con las leyendas y sus respectivos significados. Modificado de API. Requisitos. American Petroleum Institute (API). (2012, December). Especificación para tubería de conducción ESPECIFICACIÓN 5L DE API CUADRAGÉSIMA QUINTA EDICIÓN. (Effective Date: July 1, 2013).

8. MATERIALES Y EQUIPOS

8.1. Materiales

-Acero API 5L X65:

Figura 16.

Imagen del acero API 5L X65



Nota. La figura muestra el lado superior del bloque de acero API 5L X65.

-Moldes:

Figura 17.

Imagen de los moldes



Nota. La figura muestra los moldes utilizados para elaborar las probetas.

-Probetas con las muestras:

Figura 18.

Imagen las probetas con las muestras



Nota. La figura muestra las probetas ya elaboradas conteniendo las muestras.

-Crema de diamante:

Figura 19.

Imagen de la pasta de diamante de 0.03 micras



Nota. La figura muestra la pasta de diamante de 0.03 micras que se le aplicó a las muestras para pulirlas.

-Nital:

Figura 20.

Imagen del Nital



Nota. La figura muestra la imagen del Nital al 2% utilizado para hacer el ataque químico.

-Metanol:

Figura 21.

Imagen del Metanol



Nota. La figura muestra la imagen del Metanol al 5% utilizado para hacer el ataque químico.

-Agua desionizada:

Figura 22.

Imagen del Agua desionizada



Nota. La figura muestra la imagen del agua desionizada utilizada en todos los momentos que fue necesario limpiar instrumentos y materiales.

-Aceite esencial de hoja de guayaba.

Figura 23.

Imagen del aceite esencial de hoja de guayaba



Nota. La figura muestra la imagen aceite esencial de hoja de guayaba usado como inhibidor verde.

-Solución de cloruro de sodio al 3,56%:

Figura 24.

Imagen del cloruro de sodio al 3,56%



Nota. La figura muestra la imagen del cloruro de sodio al 3,56% utilizado para hacer la prueba.

-Resina epóxica 856.

-Lijas 200, 400, 800, 1000, 1200.

8.2. Equipos

-Balanza:

Figura 25.

Imagen de una balanza



Nota. La figura muestra la imagen de la balanza que se usó para saber el peso de las muestras.

-Balanza analítica:

Figura 26.

Imagen de una balanza analítica



Nota. La figura muestra la imagen de la balanza analítica que se usó para medir el peso de las probetas conteniendo las muestras.

-Potenciostato marca Gamry 1010.

Figura 27.

Imagen del potenciostato



Nota. La figura muestra la imagen del potenciostato marca Gamry 1010 utilizado para hacer las pruebas potenciodinámicas.

-Celdas de calibración (2K Ω y Dummy Cell):

Figura 28.

Imagen de las celdas de calibración



Nota. La figura muestra la imagen de las celdas de calibración que se utilizaron para la calibración del potenciostato.

-Microscopio.

Figura 29.

Imagen de las celdas de calibración



Nota. La figura muestra la imagen del microscopio utilizado para tomar las fotos de las microestructuras de las muestras.

-Multímetro:

Figura 30.

Imagen de un multímetro



Nota. La figura muestra la imagen del multímetro que se utilizó para comprobar conductividad.

-Celda electrolítica (Elaborada):

Figura 31.

Imagen de la celda electrolítica elaborada



Nota. La figura muestra la imagen de la celda electroquímica elaborada para correr las pruebas potenciodinámicas

-Pulidora metalográfica:

Figura 32.

Imagen de la pulidora metalográfica



Nota. La figura muestra la imagen de la pulidora metalográfica de la universidad.

-Agitador magnético:

Este se puede evidenciar en la Figura 24.

-Máquina de electroerosión por hilo:

No tiene una imagen de esta debido a que el corte se hizo por encargo.

9. PROCESOS Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

En este proyecto fueron necesarios la realización de procesos y métodos experimentales para que de esta forma fuera posible la obtención de la mejor manera al alcance de registrar los datos necesarios que den respuesta a lo planteado de los objetivos del trabajo.

9.1. Proceso de obtención de muestras

Como se deseaba tener un número de muestras que diera la capacidad de compararlas, se decidió cortar en 9 partes con la mayor similitud posible la muestra original y de igual forma tener muestras de tamaño considerable para hacer las pruebas correspondientes y comparar los resultados.

Como por métodos convencionales como unas sierras sin fin, circular, etc. habría mucha pérdida de material, se decidió usar una máquina de electroerosión por hilo, ayudando así a que no se desperdicie dicho material y a tener una mayor precisión en los cortes, por lo que se llevó la muestra original a un taller mecánico llamado “Mecanizados y troquelados” donde tenían la maquinaria necesaria para hacer los cortes, dando 9 muestras como las que se van a mostrar en la Figura 33.

Figura 33.

Imagen de las muestras ya cortadas



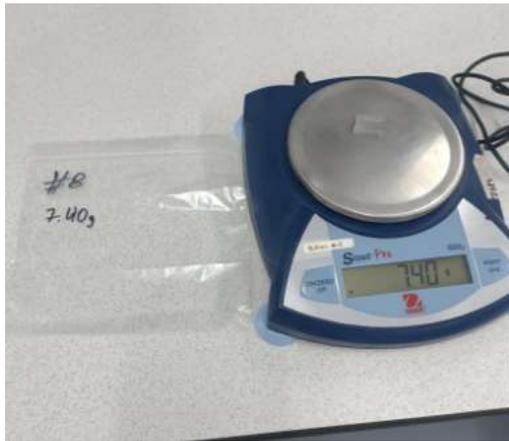
Nota. La figura muestra la imagen de las muestras recién cortadas.

Después, que ya se evidenciaron las piezas cortadas en los cortes, tanto por presentación como para tener los mejores resultados, se realizaron pulidos con diferentes números de lijas 200, 400, 800, 1000 y 1200, hasta un acabado sin erosiones o quemaduras por la electroerosión.

Se procedió a pesar con la balanza presentada en la Figura 25, cada pieza para tener un registro de estas, también se les enumeró a cada una para tener un orden en los datos que se seguirían recopilando durante el trabajo, en la Figura 34 se evidenciará cómo fueron enumeradas las muestras y se mostrará un registro del peso de las piezas en la Tabla 3 que se mostrará a continuación.

Figura 34.

Muestra 8 pesada en la balanza



Nota. La figura muestra cómo fue pesada la muestra número 8 y cómo se llevó el registro de esta.

Tabla 3.

Peso de cada una de las muestras

# Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso (gramos)	7.62	7.46	7.45	7.38	7.44	7.44	7.49	7.40	7.54

Nota. La tabla muestra el peso medido de cada muestra en la balanza de la Figura 25.

Tras registrar estos datos, se hicieron los moldes para hacer probetas con las muestras y así poder hacer las pruebas posteriores. Para esto se cortó con una segueta un tubo de aluminio de 29,35 mm de diámetro interno y 31,90 mm de diámetro externo, a estos cortes se le hizo un agujero 3.31 mm con un taladro a 2 mm del principio de agujero para poner un mezclador que, junto con la muestra, al ser el molde rellenado con resina 856, dejarían un paso para introducir un tornillo después y que se pudiera hacer la prueba, este proceso se hizo para las 9 muestras tomando como referencia una probeta hecha por el caso de estudio anterior en las Figura 35 y 36.

Figura 35.

Probeta del caso de estudio anterior



Nota. La figura muestra una probeta que se usó en el caso de estudio anterior.

Figura 36.

Probeta del caso de estudio anterior



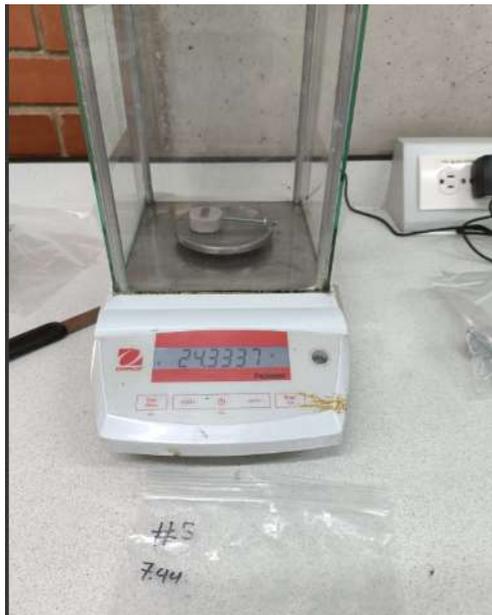
Nota. La figura muestra otro ángulo de la probeta que se usó en el caso de estudio anterior.

Una vez obtenida la probeta, era necesario introducirle algún objeto que ayudara a que hubiera una conductividad desde adentro de la probeta hacia fuera, debido a que este haría de conexión con el potencióstato como la como la conexión de trabajo y sensor de trabajo, ambos deben estar sin entrar en contacto con la solución electrolítica del experimento, dichas partes serán explicadas con mayor detenimiento cuando se explique el funcionamiento del potencióstato.

Se escogieron tornillos $5/32'' \times 2 \frac{1}{2}''$ de largo que había al alcance y se corroboró la conductividad de esta con un multímetro y fueron pesadas con el tornillo para también tener un registro de este, pero en esta ocasión se usó la balanza analítica de la Figura 26, además ya se mostrará una de las probetas ya terminada y siendo pesada, este procedimiento se repitió con cada una de las 9 muestras y se mostrará en la Tabla 4 el registro de estos.

Figura 37.

Probeta siendo pesada



Nota. La figura muestra la probeta #5 siendo pesada en una balanza analítica de la universidad.

Tabla 4.

Peso en balanza analítica

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Muestra									
Peso (gramos)	28.0375	25.9802	24.5141	23.995	24.3337	26.7495	26.3163	24.7963	24.0116

Nota. La tabla muestra el peso medido de cada muestra en la balanza analítica de la Figura 26.

9.2. Proceso de elaboración de la celda electroquímica

Por el tamaño de las probetas no se podía utilizar completamente la celda electroquímica de la que disponía la universidad, por lo que se necesitaba elaborar una que pudiera contener la

solución electrolítica (NaCl 3,56%), la probeta, el contra electrodo (Barra de grafito) y el electrodo de referencia Calomel, que trabaja en ese tipo de solución, si es otro tipo de electrodo arrojarían datos erróneos, tanto el electrodo de referencia como el contra electrodo se mostrarían en la Figura 38.

Figura 38.

Contra electrodo y electrodo de referencia



Nota. La figura muestra la barra de grafito y el electrodo de referencia.

Para cumplir las condiciones anteriores se utilizó un frasco de vidrio de granos de café de Juan Valdéz con una capacidad aproximada de 900ml que ya estaba vacío, se le retiraron las etiquetas y se limpió. Posteriormente con una espuma negra de polietileno, se cortó en forma de corcho para que se adaptara al frasco de vidrio, se le hicieron 3 huecos distribuidos en donde irían la barra de grafito, el electrodo de referencia y la conexión con la probeta.

Para la conexión fue necesario hacer un soporte con una varilla roscada de $\frac{1}{4}$ " x 5", dos tuercas de $\frac{1}{4}$ " y dos arandelas, en cada extremo de la varilla se pegaron 2 caimanes eléctricos, estos se conectaron y soldaron para garantizar la conductividad entre los caimanes, estos caimanes se colocaron con el fin de sostener la probeta del tornillo y garantizar una estabilidad durante la prueba y su conducción eléctrica con el potencióstato, la celda sin conectar se puede apreciar en la Figura 31.

9.3. Caracterización metalográfica

Antes de someter las muestras a la prueba de polarización potenciodinámica, se requiere para cumplir uno de los objetivos, la caracterización metalográfica de las probetas, esto se realizó tanto antes como después de las pruebas para ver también los cambios y afectaciones que tuvo la pruebas sobre las muestras y también como un posible referente para saber si el inhibidor funciona o no.

Cuando se realiza una caracterización metalográfica se deben seguir una serie de pasos para el cumplimiento de este método. Primero debe haber una preparación de la muestra en donde se corta la pieza, se lija y se pule.

Anteriormente se habló del proceso de los dos primeros pasos, además de estos, se realizó un pulido en una de las pulidoras metalográficas de la universidad, la cual se puede apreciar en la Figura 32, posteriormente se pulió con una pasta de diamante 0.03 micras con la cual contaba la universidad y observa en la Figura 19, todo para tener una superficie tipo espejo, finalmente se le realiza un ataque químico para que la misma microestructura se tinte y se pueda observar tonalidades indicativas de la microestructura.

Una vez se realiza el ataque químico, se pasa a observar el material, esto se realizó gracias a un microscopio de la universidad que se registra en la Figura 29, con 4 aumentos diferentes, X5, X10, X20, X50. Este proceso se realizó con las 9 muestras, tanto antes como después de la prueba, con la diferencia que no hubo un desbaste y pulido después de que se tomara la prueba, debido que se quería observar las afectaciones de este.

Para el ataque químico se llevó a cabo una limpieza superficial del material con agua desionizada y algodón (Figura 22), posteriormente se le suministró con un gotero una gota de metanol (Figura 21), se esperó a que actuara por aproximadamente 40 segundos, se retiró delicadamente el metanol con algodón, después se le aplicó con otro gotero una gota de Nital, se esperó un tiempo aproximado de 20 segundos y se limpió con algodón, por último, se terminó de limpiar el rastro de Nital para que no siguiera afectando el metal con agua desionizada y algodón, una parte del proceso se evidencia en la Figura 39 a continuación.

Figura 39.

Ataque químico



Nota. La figura muestra el momento en el que se le estaba realizando el ataque químico a la muestra, específicamente cuando se le estaba suministrando el metanol.

En el microscopio, se tomaron 72 imágenes, resultantes de 4 fotos por muestra, correspondientes a los 4 aumentos del microscopio, antes y después de las pruebas. Con el fin de no saturar el trabajo con todas las fotos en donde hubo varias con desperfectos por errores sobre todo en el pulido final de las muestras, se mencionarán las más relevantes para este proyecto, lo demás irá en los anexos.

En las próximas figuras se mostrarán la que se podrían considerar las mejores imágenes antes de las pruebas potenciodinámicas, en sus respectivas notas se recalcará el porqué de su relevancia.

Figura 40.

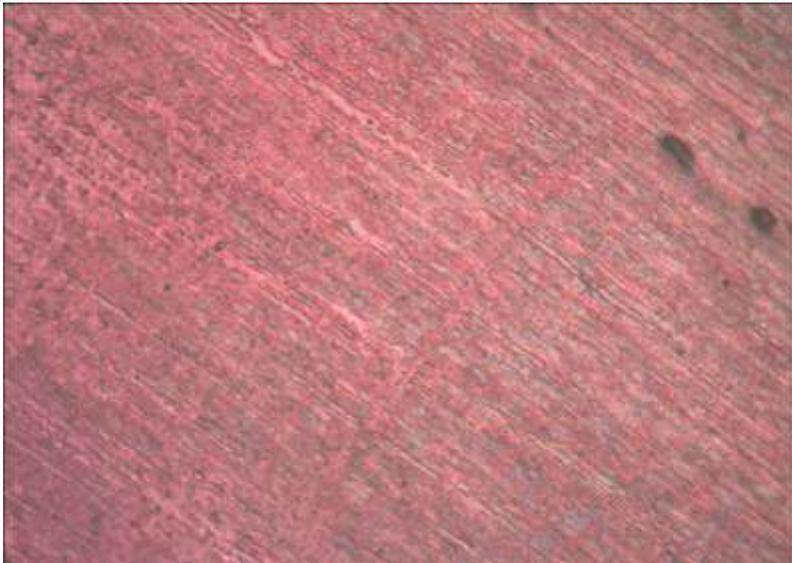
Muestra 1 X50



Nota. La figura muestra cómo actúa el ataque químico al material, en tonalidades más oscuras/grises, siendo la zona más oscura dentro de una semicircunferencia la zona afectada por el ataque química, también se observan varias imperfecciones en el desbaste debidas a las profundas erosiones ocasionadas por el corte.

Figura 41.

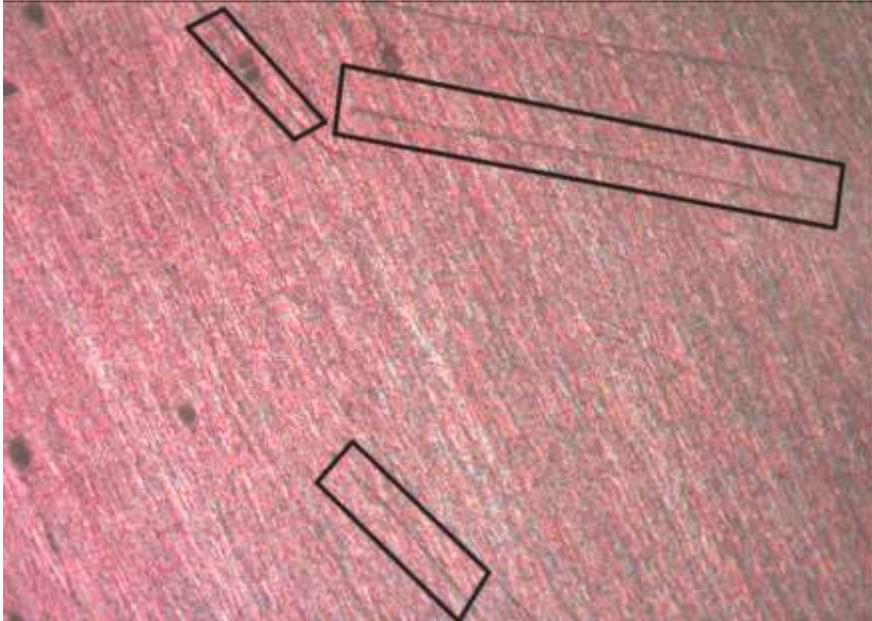
Muestra 5 X50



Nota. La figura muestra de forma más amplia (aunque del mismo aumento de la Figura 40) y limpio de rayones, el aspecto del acero API 5L X65 con un ataque químico de Nital.

Figura 42.

Muestra 6 X50

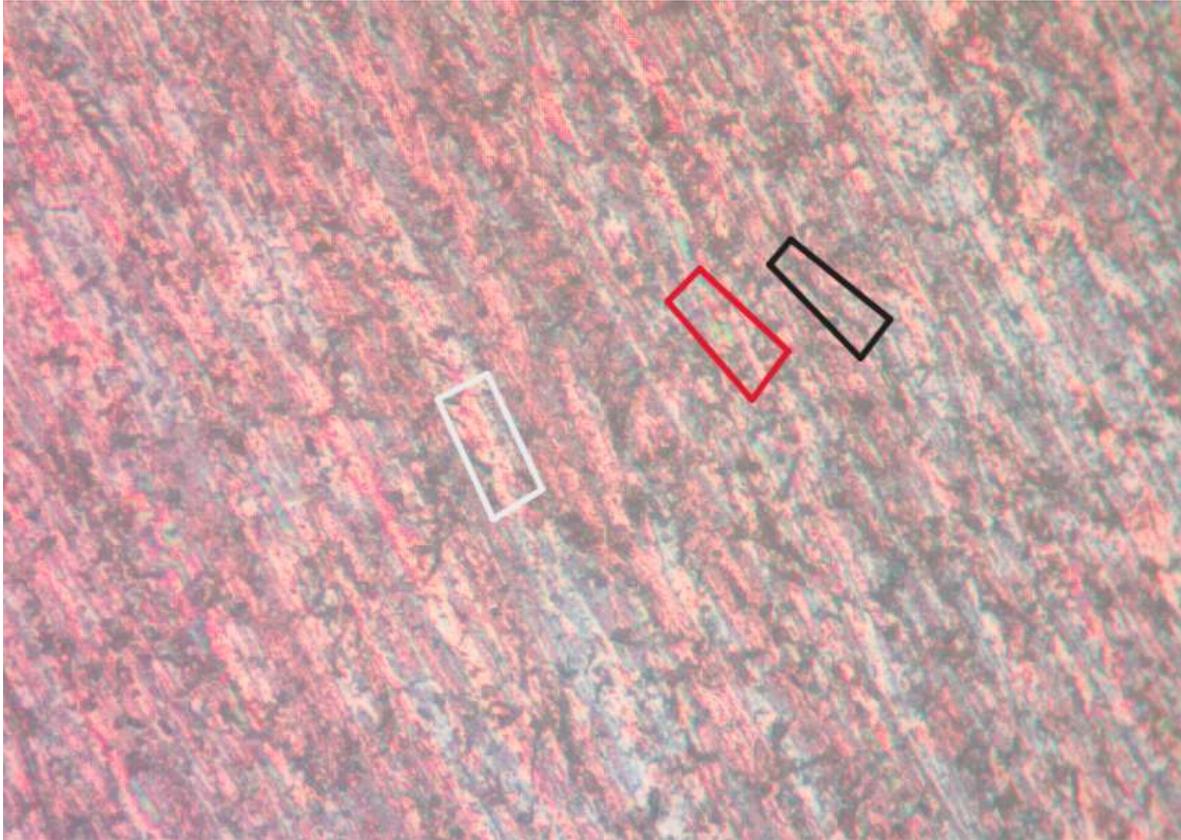


Nota. La figura muestra otro tipo de imperfección, los rayones apreciados dentro de los recuadros de color negro son consecuencia de no haber pulido bien la muestra.

Además de algunas imperfecciones, se logró observar que solo era posible ver de manera clara la microestructura en los aumentos X50, los cuales ya se desglosarán en las próximas figuras.

Figura 43.

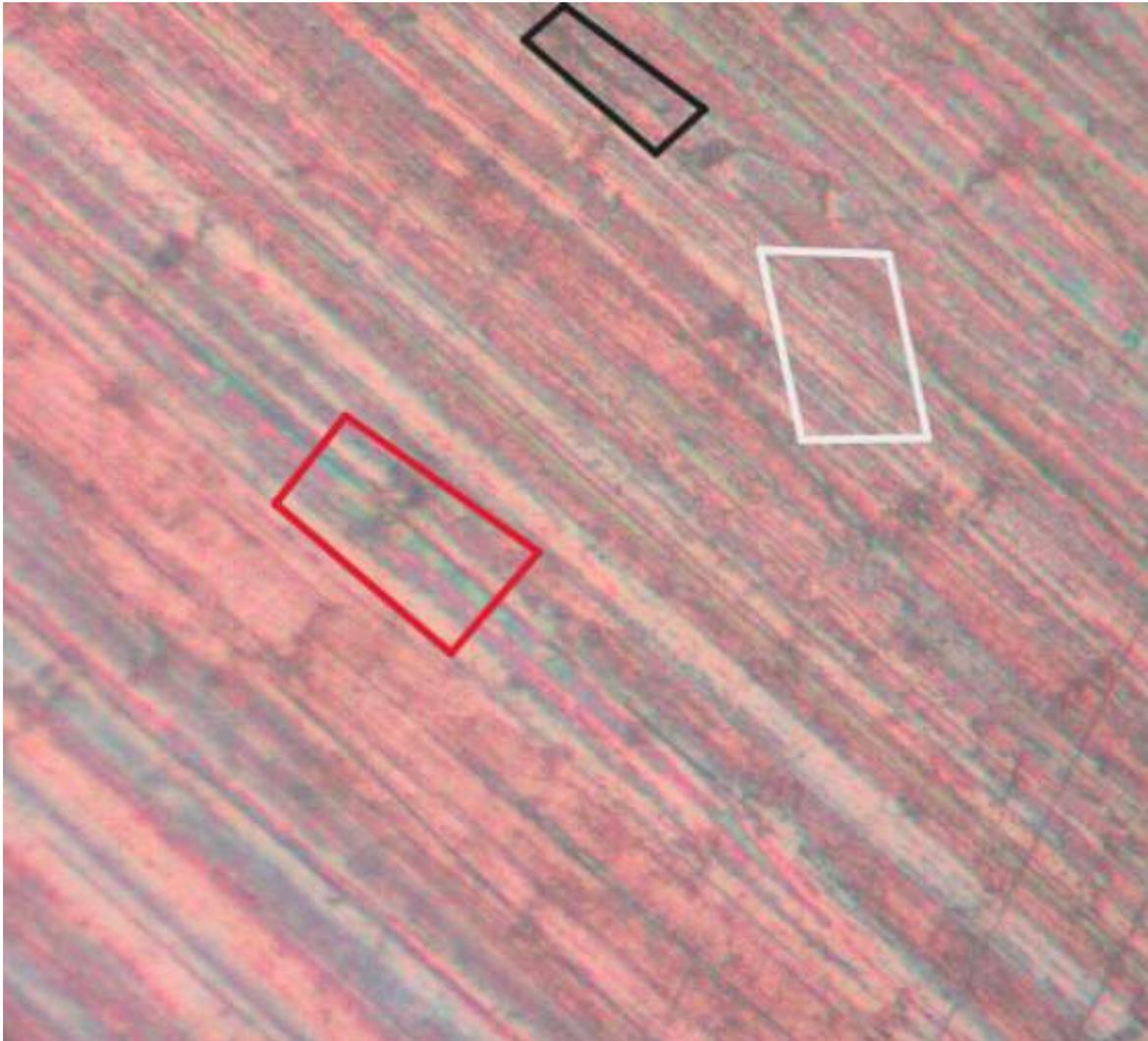
Muestra 6 X500



Nota. En la figura se observa la muestra 6 X500 preprueba, donde se aprecia la perlita, ferrita y carburos de manganeso. La parte clara, también diferenciada como la parte lisa de la superficie sería la ferrita (Encerrada en el cuadro blanco), la oscura sería la perlita diferenciada como las grietas negras incrustadas en la superficie (Encerrada en el cuadro negro) y otras tonalidades prismáticas que serían los carburos de manganeso también incrustadas en la superficie del acero (Encerrados en el cuadro rojo).

Figura 44.

Muestra 9 X500



Nota. En la figura se observa la muestra 9 X500 preprueba, donde se aprecia la perlita, ferrita y carburos de manganeso en las mismas tonalidades de la Figura 43 y señalizadas en los mismos cuadros con sus respectivos colores.

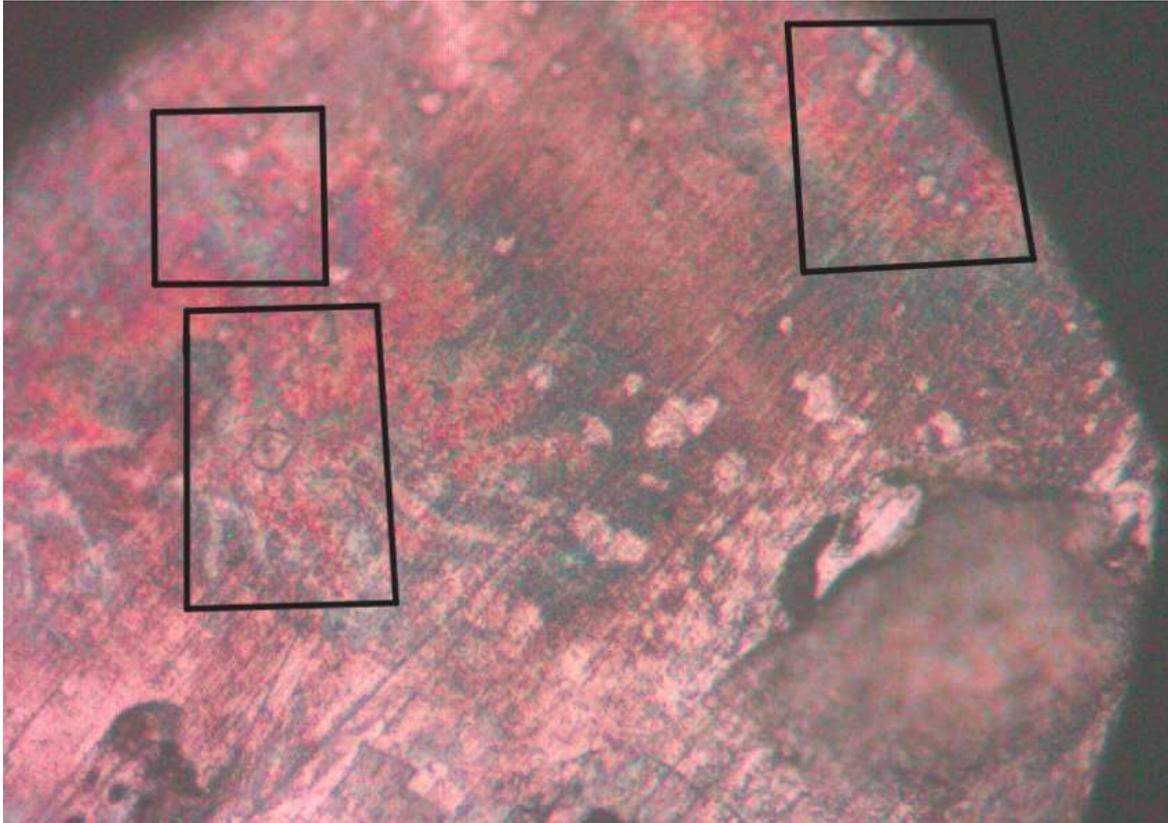
En las figuras anteriores también hay inconsistencia en algunos segmentos de tonalidades porque se requería más tiempo de exposición al ataque químico, pero por las muestras limitadas, no podían ser dañadas antes a la prueba de corrosión.

Ya que se tiene una idea de la microestructura del acero, se procede a la realización de las pruebas de corrosión potenciodinámicas y a hacerles su observación en el microscopio para ver las afectaciones, también se separan en las cuales se aplicó el inhibidor y en las que no. Se tomó

la decisión que las muestras de la 1 a la 4 fueran sin inhibidor y de la 5 a la 9 con inhibidor, al igual que en el caso anterior, sólo se mostrarán las más relevantes.

Figura 45.

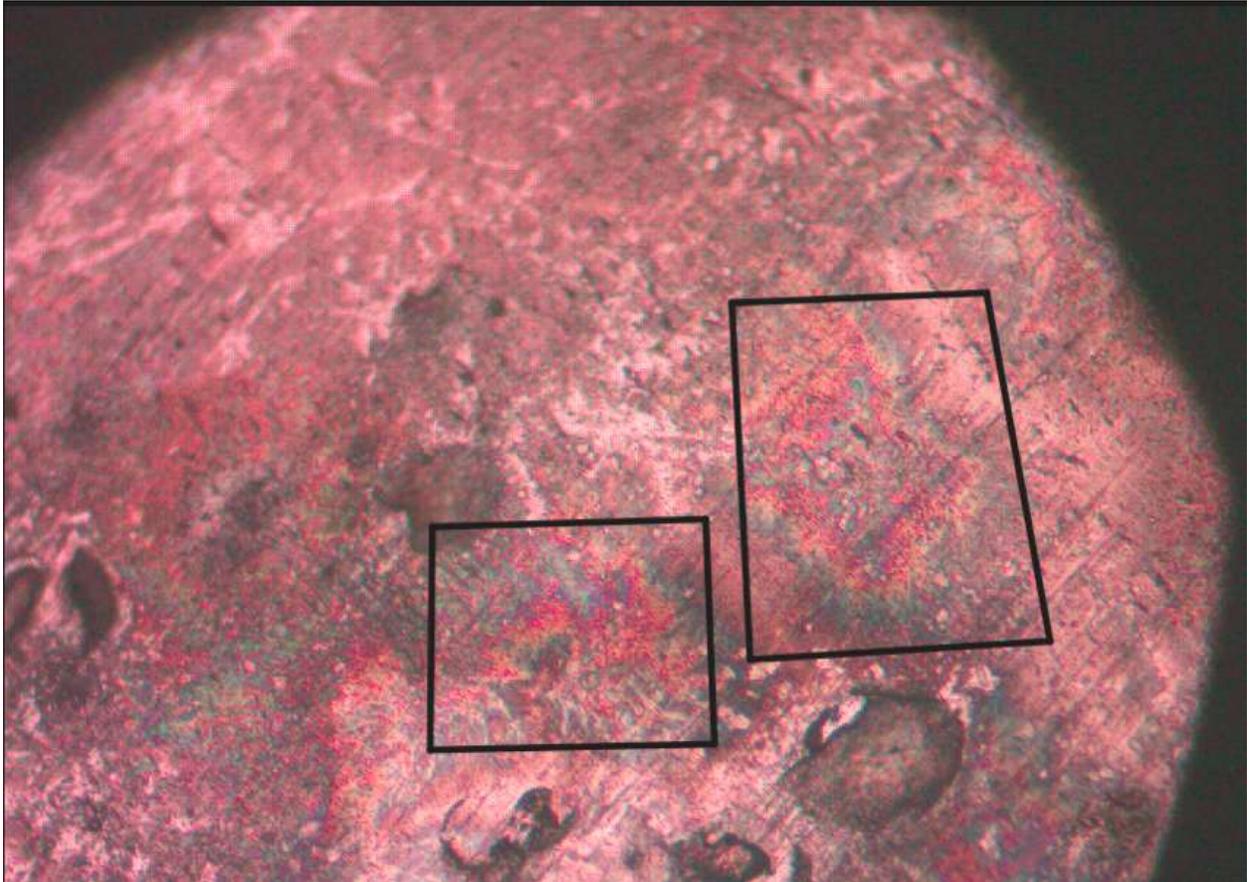
Muestra 2 X500



Nota. En la figura se observa la muestra 2 X 500 posprueba sin inhibidor, donde se aprecia en la microestructura, la corrosión en tonalidades de verde brillante con espectro de azul morado, sobre la matriz perlítica y ferrítica del acero, además de ciertos gránulos de sal en forma de cristal romboide, resultado de la solución salina que quedó adherida a la superficie.

Figura 46.

Muestra 2 X200

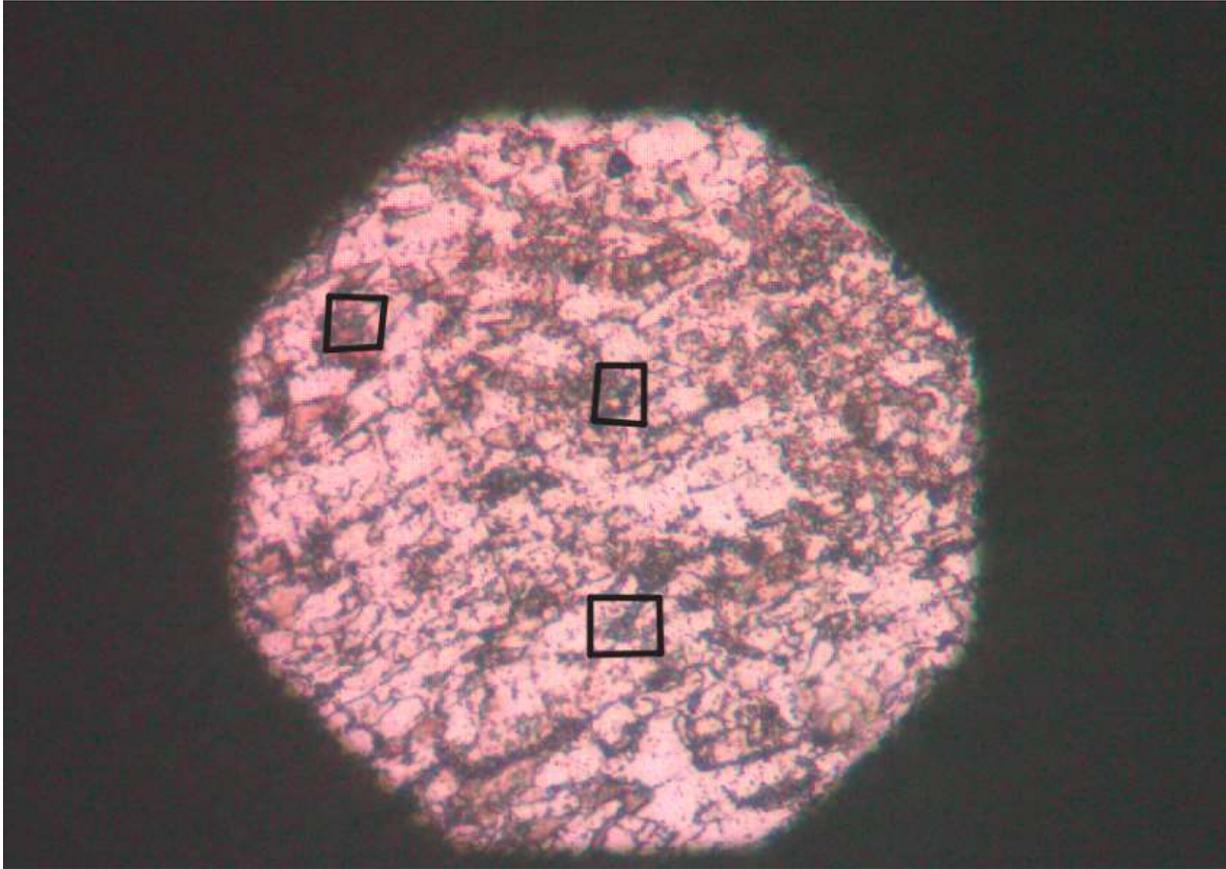


Nota. En la figura se observa la muestra 2 X 200 posprueba sin inhibidor, donde se aprecia la corrosión en tonalidades de verde brillante con espectro de azul morado, debido a que el aumento no es suficiente, no se logra identificar con precisión la microestructura.

Ya que se tiene la idea de cómo luce la corrosión en la microestructura, se procederá a mostrar cómo lucen otras muestras a las cuales, si se les aplicó el inhibidor, para de esta forma tener una referencia visual del efecto del inhibidor de un posible criterio para determinar que dicho inhibidor funciona contra la corrosión, dicho dictamen se dará en el momento en el que también se analicen las gráficas de polarización y se comparen todos los resultados recopilados y se puedan dar conclusiones de peso.

Figura 47.

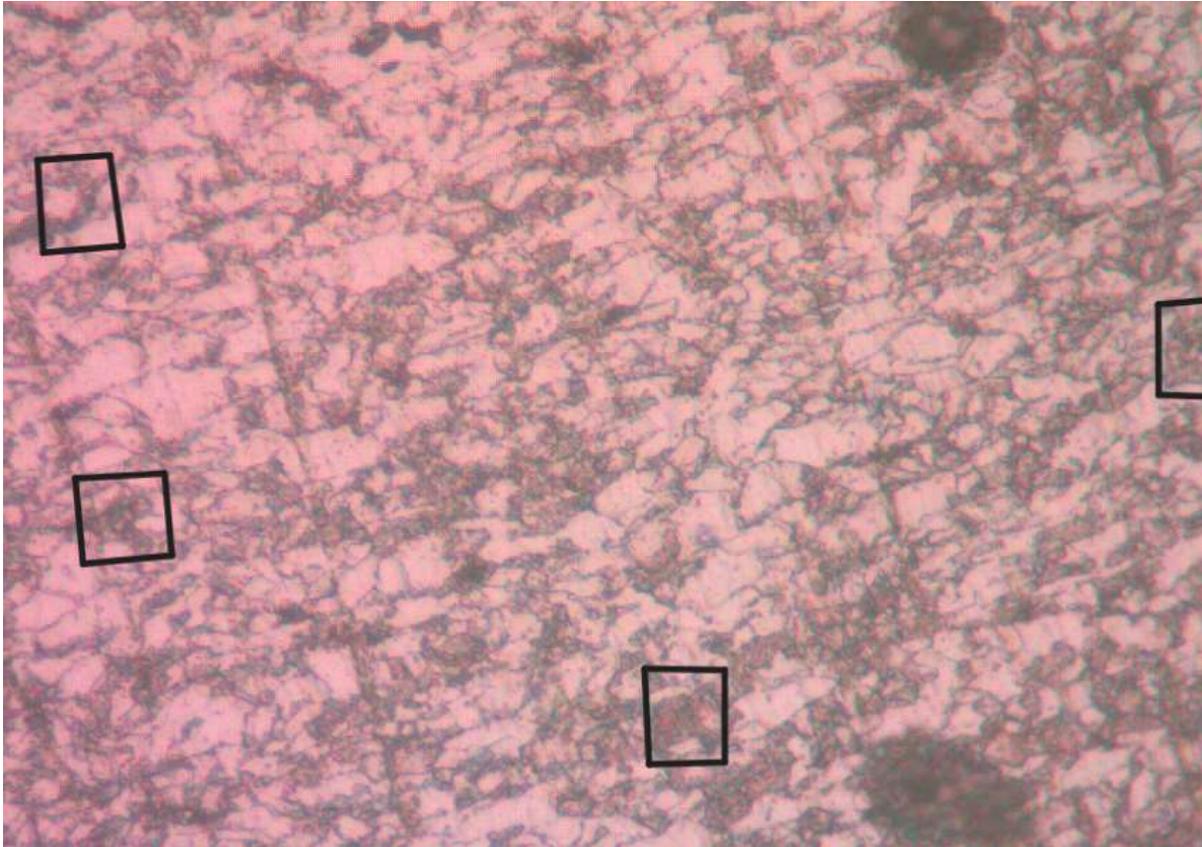
Muestra 5 X500



Nota. En la figura se observa la muestra 5 X500 posprueba con inhibidor, se aprecia en la microestructura la corrosión también en tonalidades de verde brillante con espectro de azul morado en menor cantidad y aleatoriedad en comparación con la muestra 2 X500 y X 200 sin inhibidor.

Figura 48.

Muestra 6 X500



Nota. En la figura se observa la muestra 6 X500 posprueba con inhibidor, se aprecia en la microestructura la corrosión también en tonalidades de verde brillante con espectro de azul morado en menor cantidad y aleatoriedad en comparación con la prueba M2 X500 y X200 sin inhibidor.

9.4. Pruebas de polarización potenciodinámicas

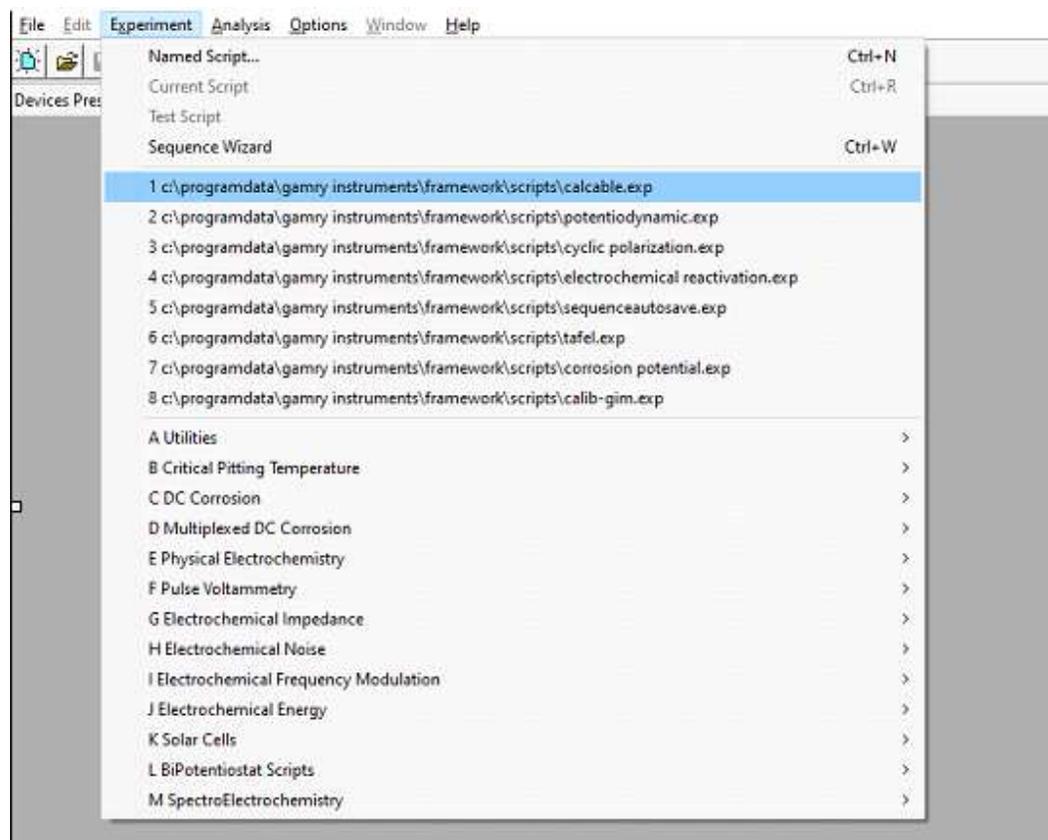
Para las pruebas de polarización potenciodinámicas se requirió de un equipo especializado mostrado en la Figura 27, un potenciostato Gamry referencia 1010, dicho equipo cuenta con varios elementos que son necesarios para su correcto funcionamiento, entre estos se encuentran la fuente de poder, la configuración de electrodos, los cuales son un total de 6, cada uno con un propósito y conexión específica diferenciados por colores, estos son: Verde, electrodo de trabajo.

Azul, sensor del electrodo de trabajo. Blanco, electrodo de referencia. Negro, polo a tierra. Naranja, sensor del contraelectrodo. Rojo, contraelectrodo. Esta diferenciación está preestablecida y se evidencia en las conexiones de las celdas de calibraciones que se muestra en la Figura 28.

Para la calibración del equipo, se procede a conectarlo con la celda de calibración que cuenta con valor de resistencia de $2K \Omega$, esta conexión se debe hacer antes de encender el equipo para evitar daños en el equipo, además se debe conectar el polo a tierra a la caja de Faraday en donde vienen las celdas de calibración para que estén todas las conexiones. Una vez conectado, se enciende el equipo y se abre el software con el que cuenta el equipo para realizar todos los experimentos con los que cuenta este.

Figura 49.

Barra de herramientas

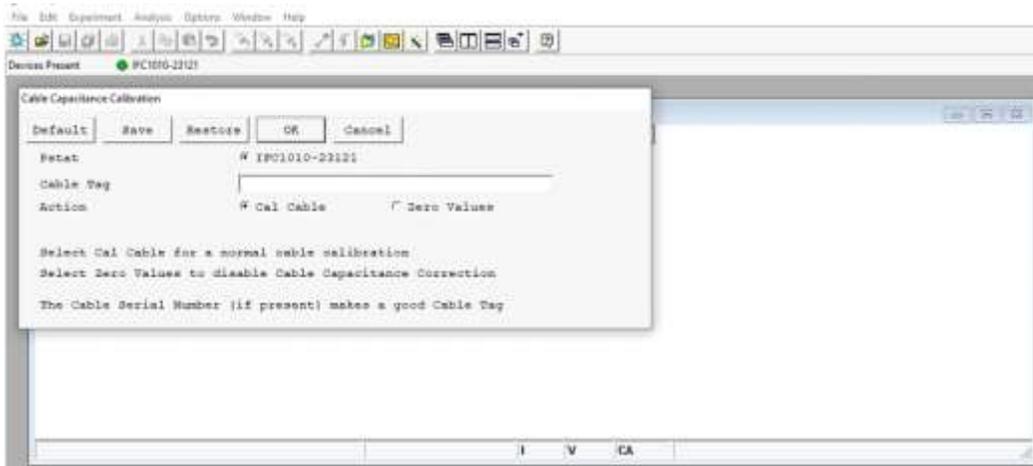


Nota. En la figura se observa la barra de herramientas del software de Gamry Frameworks y los diferentes experimentos que se pueden realizar, con el cursor en el experimento para la calibración del equipo.

Al abrir el programa se abre en la barra de herramientas la opción de experimentos, este despliega múltiples opciones de experimentos, entre ellos la calibración por cable, se selecciona esta opción y se verifican las conexiones según indican las recomendaciones del software para iniciar el experimento y se aceptan las condiciones, esto se puede ver de mejor manera en las Figuras 49, 50, 51 El programa empieza a realizar la calibración con una gráfica en tiempo real del estado del equipo, una vez este termina, arroja un mensaje de que la calibración ha completado, se acepta y el equipo ya puede realizar los demás experimentos que uno requiera.

Figura 50.

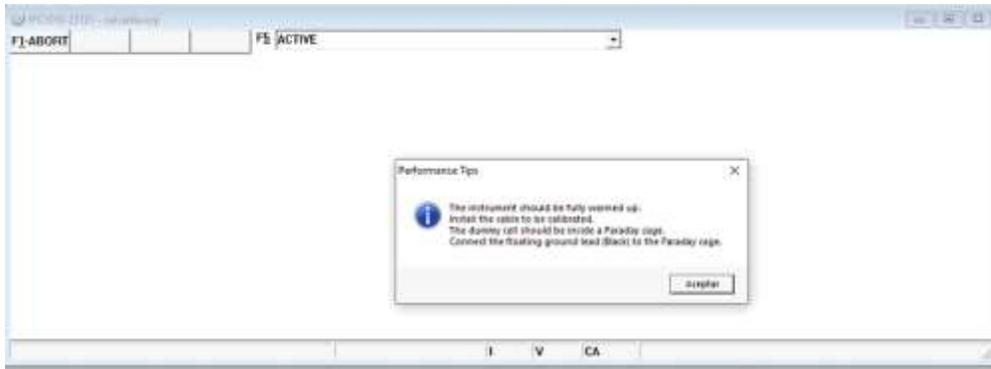
Calibración del equipo



Nota. En la figura se observa el recuadro de respuesta al querer correr la calibración del equipo.

Figura 51.

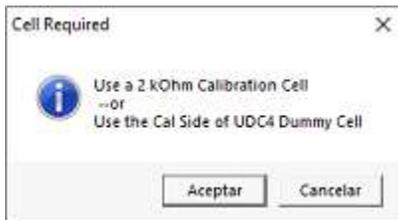
Mensaje de verificación



Nota. En la figura se observa el recuadro de respuesta al darle ok al proceso de calibración.

Figura 52.

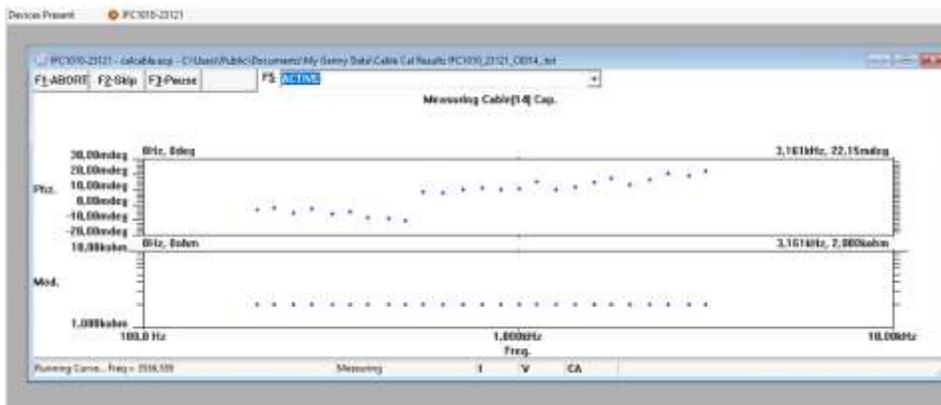
Mensaje de rectificación



Nota. En la figura se observa el recuadro de respuesta al darle aceptar en la Figura 51.

Figura 53.

Comienzo de calibración



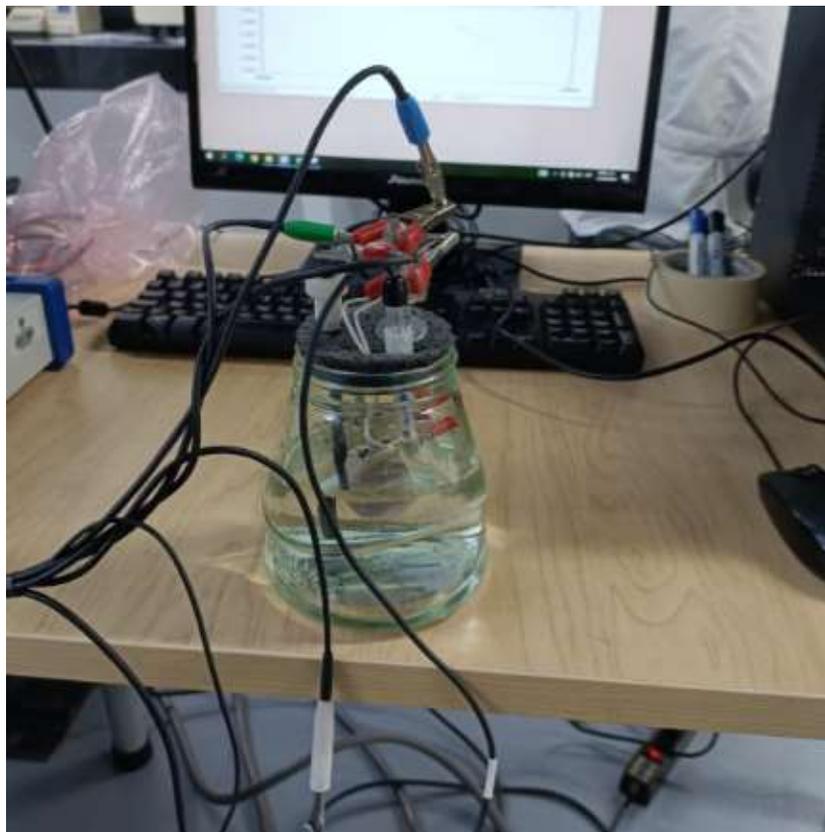
Nota. En la figura se observa el comienzo de la calibración del equipo.

Ya teniendo el potenciostato listo para correr cualquier experimento, se procede a preparar la celda con el electrolito, este se realiza siguiendo las instrucciones de la norma ASTM G61-86 en el apartado 6.2, donde muestra las instrucciones para la elaboración del electrolito de NaCl al 5,56%, se preparan de a cantidades de 920 ml con una concentración de 34 gr de NaCl, toda la preparación se realiza en un beaker y se revuelve con un agitador magnético tal como se muestra en la Figura 24.

Para la configuración de la celda al potenciostato ya con el electrolito, se miden con una balanza 400 ml del electrolito, se toman los electrodos mencionados anteriormente, con excepción que para la polarización potenciodinámica no se requieren todos los conectores, por lo que se conectan el electrodo de trabajo, sensor de trabajo, electrodo de referencia y el contra electrodo tal como se mostrará en la Figura 54.

Figura 54.

Potenciostato conectado a la celda con el electrolito

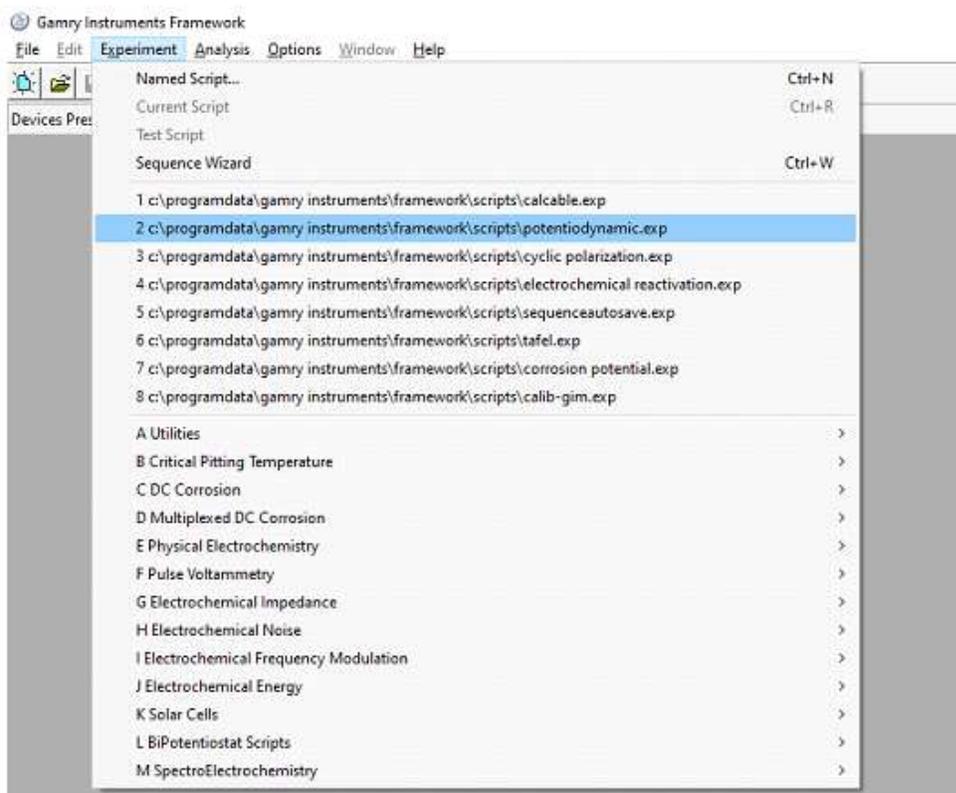


Nota. En la figura se observan las conexiones del potenciostato a la celda con una de las muestras y con el electrolito de NaCl al 3,56%.

Se procede a correr el experimento de polarización potenciodinámica en la barra de herramientas, siguiendo casi todos los mismos pasos de la calibración, pero seleccionando a lo último la opción del experimento de polarización potenciodinámica tal como se mostrará en la Figura 55.

Figura 55.

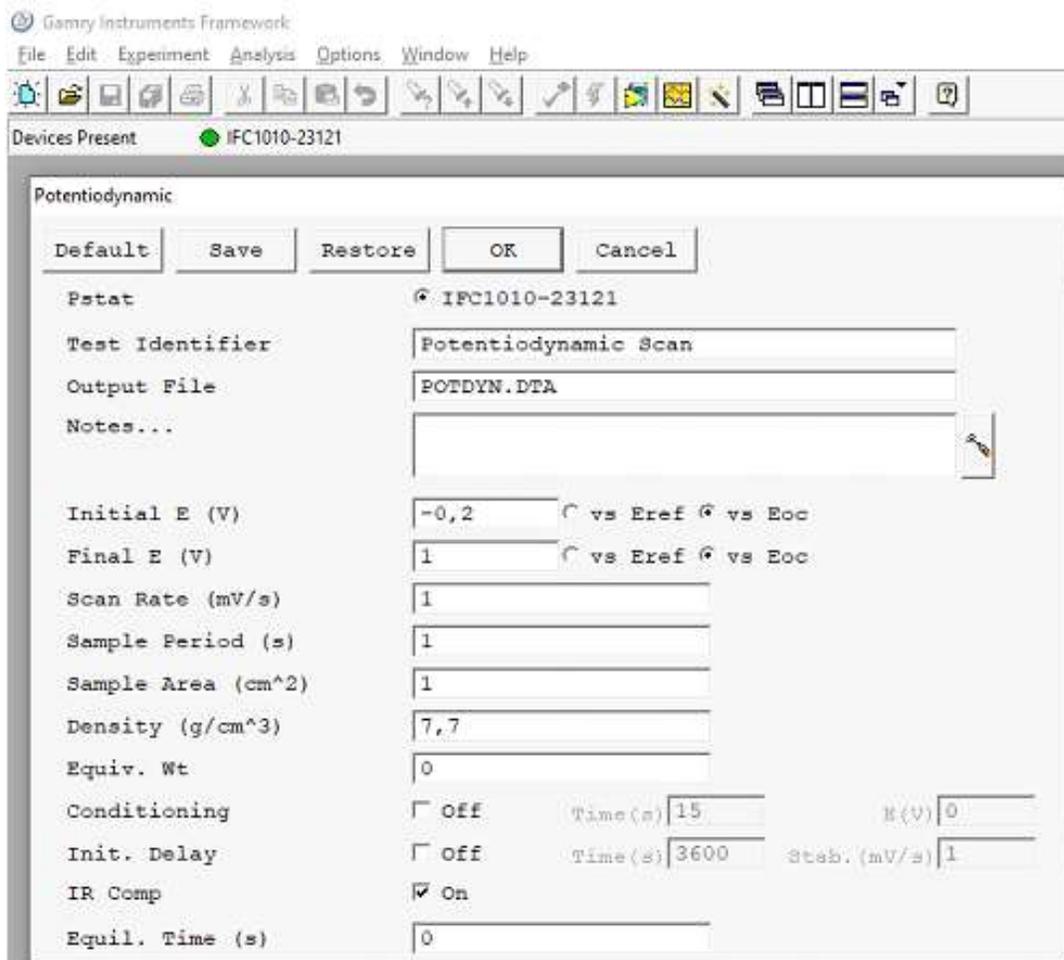
Inicio del experimento



Nota. En la figura se observa el experimento seleccionado para correr en el potenciostato. Al seleccionar el experimento, el programa arroja un cuadro de variables como voltajes finales e iniciales, corriente, densidad del material, etc. Se configura tal cuál aparece en la Figura 56.

Figura 56.

Determinación de variables



Nota. En la figura se observan los datos de las variables a configurar.

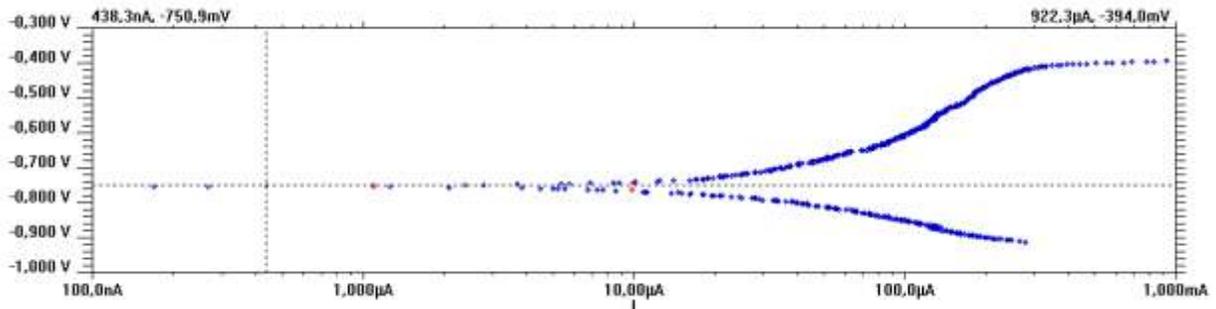
Se selecciona el “ok” mostrado en la Figura 56 y el potencióstato empezará la prueba y a registrar los datos, los cuales quedarán guardados en los archivos del equipo (PC o portátil), este archivo quedará con el nombre de POTDYN.DTA, una vez finalizado el experimento se selecciona la opción de abortar y el experimento finalizará.

En el trabajo, se elaboraron nueve probetas, enumeradas para tener orden en el experimento y llevar mejor los registros. De la muestra 1 a la 4 no hubo adición de inhibidor y se empleó una cantidad de 400 ml de la solución de NaCl al 3,56%, para ver el comportamiento del material sin el inhibidor y poder determinar el potencial de corrosión de este, además de poder ver posibles

fallas en el experimento, fallas dadas y que se desglosarán en las conclusiones de este trabajo, por este motivo se seleccionaron los mejores resultados, estos se mostrarán más adelante, las gráficas estarán compuestas por dos ejes los cuales tomarán los valores de: Voltaje de referencia (Vf), como el eje Y. Corriente (A), como el eje X.

Figura 57.

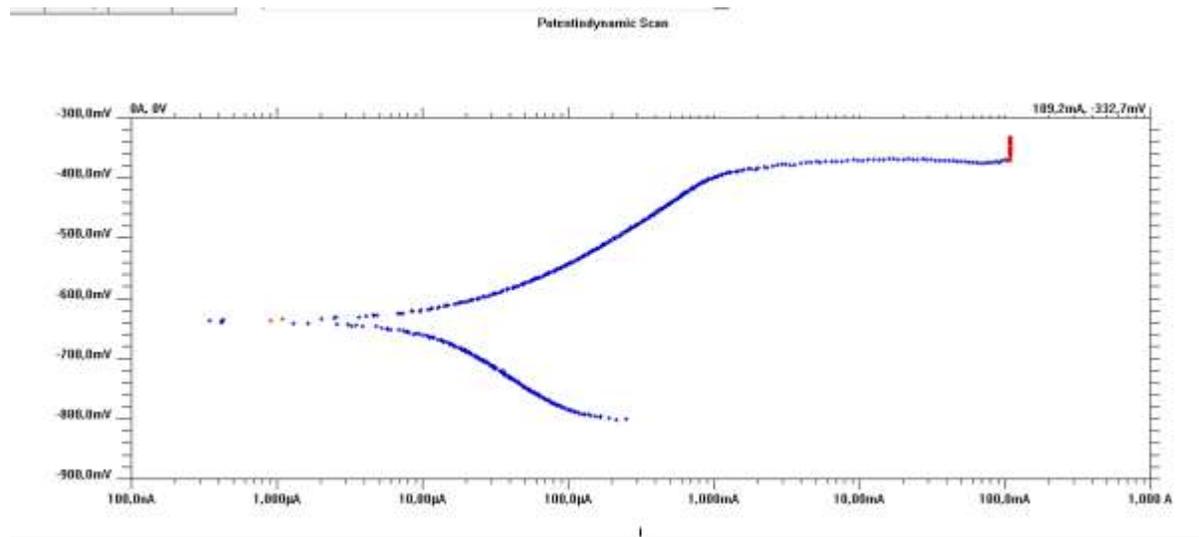
Muestra 2 después de la prueba de polarización potenciodinámica



Nota. En la figura se muestra el gráfico de los resultados del experimento en la muestra 2.

Figura 58.

Muestra 4 después de la prueba de polarización potenciodinámica

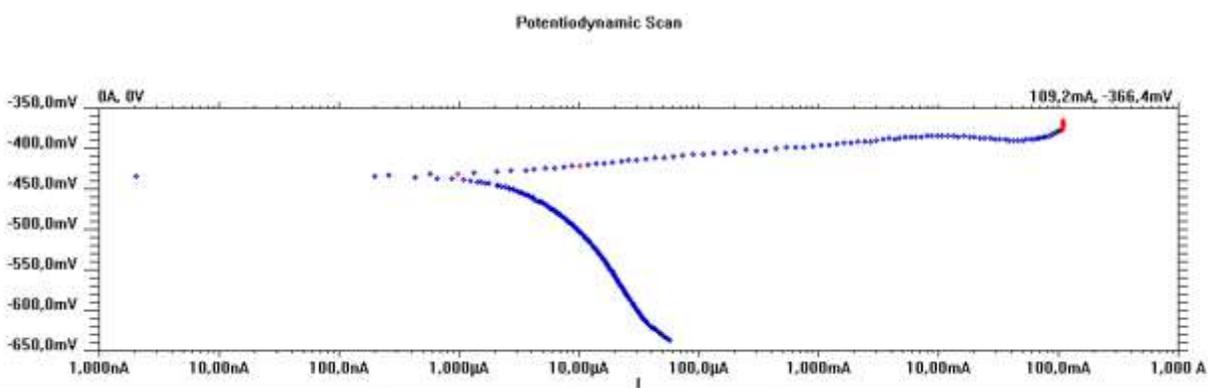


Nota. En la figura se muestra el gráfico de los resultados del experimento en la muestra 4.

Después de las pruebas sin inhibidor, se prepararon soluciones con concentraciones del inhibidor verde seleccionado, por convención se usa el 1% de inhibidor para trabajar, y se prepararon 2 pruebas para las muestras 5 y 6 suministrándoles 4 ml de inhibidor y mezclándolos con un agitador magnético. Después se prepararon otras concentraciones para compararlas con el estándar, estas concentraciones de inhibidor se aplicaron a las muestras 7, 8 y 9 en cantidades del 0.2% (0.8 ml), 0.25% (1 ml) y 0.175% (0.5 ml) respectivamente.

Figura 59.

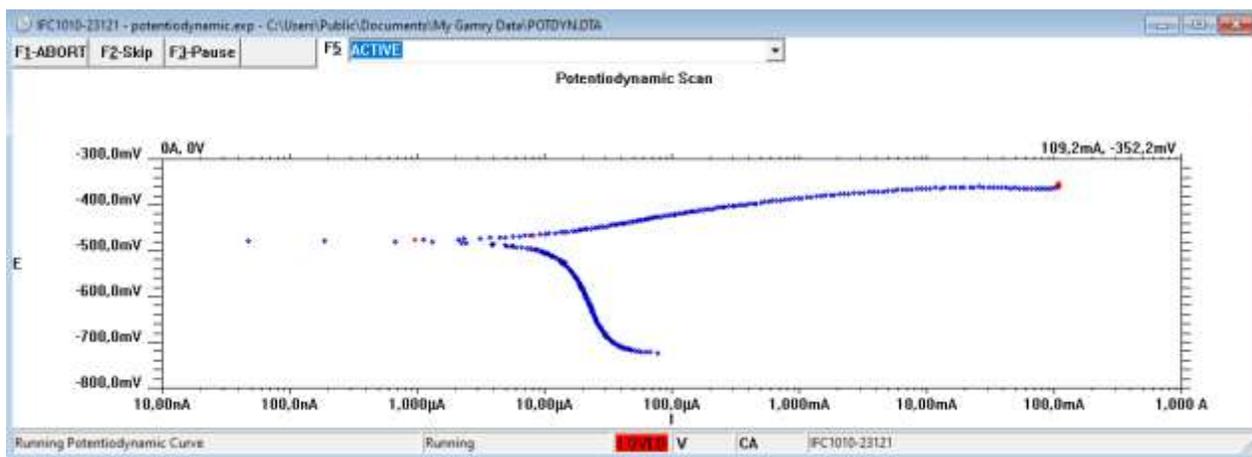
Muestra 6 después de la prueba de polarización potenciodinámica



Nota. En la figura se muestra el gráfico de los resultados del experimento en la muestra 6.

Figura 60.

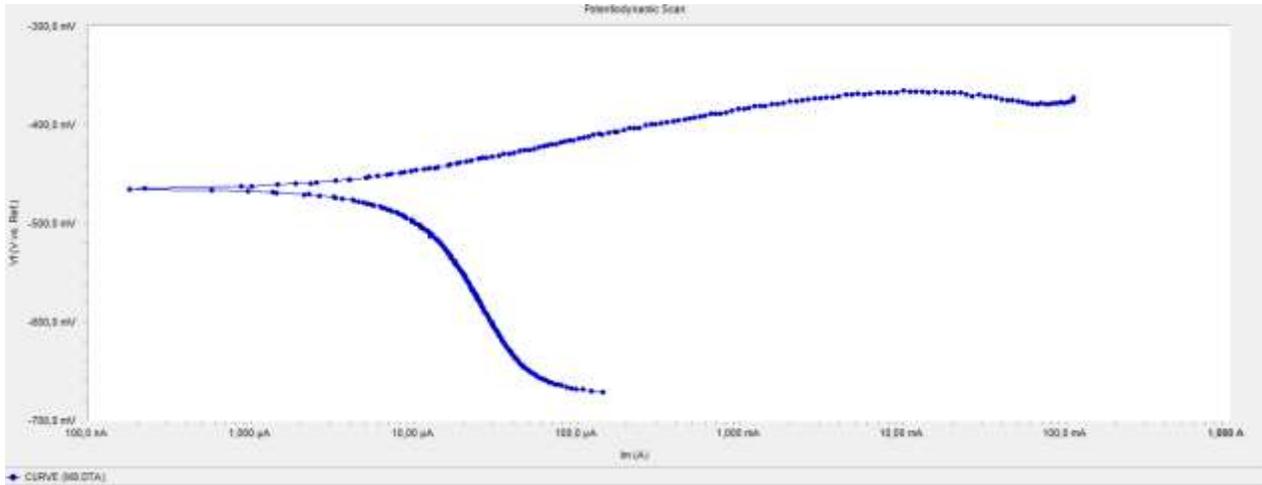
Muestra 7 después de la prueba de polarización potenciodinámica



Nota. En la figura se muestra el gráfico de los resultados del experimento en la muestra 7.

Figura 61.

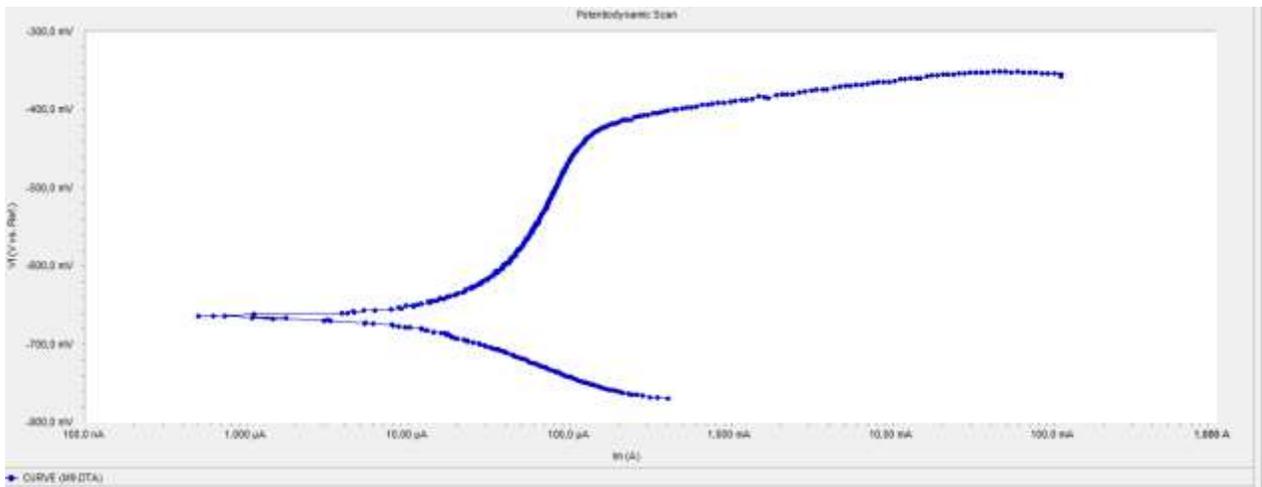
Muestra 8 después de la prueba de polarización potenciodinámica



Nota. En la figura se muestra el gráfico de los resultados del experimento en la muestra 8.

Figura 62.

Muestra 9 después de la prueba de polarización potenciodinámica



Nota. En la figura se muestra el gráfico de los resultados del experimento en la muestra 9.

10. RESULTADOS

Para evaluar la eficacia potenciodinámica de del inhibidor se remonta a la Ecuación 5 y se reemplazan los valores de A_0 como el potencial de referencia determinado como el potencial arrojado por la muestra 2, el cual es de -0.75346 V , el A_1 como el potencial arrojado por la muestra 6, de -0.433637 V y se reemplazan los valores dando a lugar a la siguiente ecuación.

$$\varepsilon\% = \frac{(-0.75346\text{ V}) - (-0.433637\text{ V})}{(-0.75346\text{ V})} \cdot 100\% \approx 42.44724\% \quad (7)$$

Lo que nos arroja un resultado de aproximadamente 44.44724% de eficacia para la concentración de inhibidor estándar para pruebas de corrosión, se procede a realizar el mismo cálculo con las otras concentraciones de las muestras dando a los siguientes resultados:

-Muestra 7.

$$\varepsilon\% = \frac{(-0.75346\text{ V}) - (-0.478368\text{ V})}{(-0.75346\text{ V})} \cdot 100\% \approx 36.5105\% \quad (8)$$

-Muestra 8.

$$\varepsilon\% = \frac{(-0.75346\text{ V}) - (-0.464859\text{ V})}{(-0.75346\text{ V})} \cdot 100\% \approx 38.30343\% \quad (9)$$

-Muestra 9.

$$\varepsilon\% = \frac{(-0.75346\text{ V}) - (-0.664398\text{ V})}{(-0.75346\text{ V})} \cdot 100\% \approx 11.8204\% \quad (10)$$

Ya teniendo los porcentajes de eficacia de cada una de las muestras se puede observar que la muestra que ofrecieron una mayor eficacia en las pruebas potenciodinámicas fue la muestra 6 que cumplía con la concentración estándar para este tipo de metodologías. No se probó una concentración mayor debido a que al momento de correr las pruebas potenciodinámicas con el 1% de concentración del inhibidor, se observó que, en los momentos finales de las pruebas, dentro de la celda empezó a haber una liberación de hidrógeno y una coloración de la solución electrolítica, lo cual indicaba un posible exceso de inhibidor aplicado en la solución.

Con la eficacia ya determinada, se procede a realizar la determinación de la velocidad de corrosión que se detalla en la norma ASTM G59-23 y G102-23 como “corrosion rate”, en donde define esta como:

$$Cr = 3.27 \times 10^{-3} \cdot \frac{i_{corr} \cdot EW}{\rho} \quad (11)$$

Donde i_{corr} es la velocidad de corrosión o densidad de corriente de corrosión, la cual define en este caso como la corriente anódica total que pasa en el área de las muestras (1.3 cm^2).

Considerando la densidad de corriente de corrosión, se determina el EW, que es el peso equivalente de la muestra, igual a los pesos atómicos del material divididos por su valencia.

Teniendo en cuenta que el acero de nuestra muestra es micro aleado, se calculan los pesos equivalentes de cada aleación y su concentración, dando un peso equivalente total del acero 94.8615 g/mol .

Por último, tenemos la densidad del acero dada en 7.85 g/cm^3 , por lo que solo quedaría reemplazar los valores en la ecuación para cada una de las muestras relevantes.

-Muestra 4.

$$i_{corr} = \frac{0.000107238 \mu A}{1.3 \text{ cm}^2} = 82.49076 \times 10^{-6} \frac{\mu A}{\text{cm}^2} \quad (12)$$

$$Cr = 3.27 \times 10^{-3} \cdot \frac{82.49076 \times 10^{-6} \frac{\mu A}{\text{cm}^2} \cdot 94.8615 \text{ g}}{7.85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 3.25966 \times 10^{-6} \text{ mpy} \quad (13)$$

-Muestra 6.

$$i_{corr} = \frac{2.03882 \times 10^{-9} \mu A}{1.3 \text{ cm}^2} = 1.56832 \times 10^{-9} \frac{\mu A}{\text{cm}^2} \quad (14)$$

$$Cr = 3.27 \times 10^{-3} \cdot \frac{1.56832 \times 10^{-9} \frac{\mu A}{\text{cm}^2} \cdot 94.8615 \text{ g}}{7.85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 0.06197 \times 10^{-9} \text{ mpy} \quad (15)$$

-Muestra 7.

$$i_{corr} = \frac{4.69595 \times 10^{-8} \mu A}{1.3 \text{ cm}^2} = 3.61227 \times 10^{-8} \frac{\mu A}{\text{cm}^2} \quad (16)$$

$$Cr = 3.27 \times 10^{-3} \cdot \frac{3.61227 \times 10^{-8} \frac{\mu A}{\text{cm}^2} \cdot 94.8615 \text{ g}}{7.85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 1.42740 \times 10^{-9} \text{ mpy} \quad (17)$$

-Muestra 8.

$$i_{corr} = \frac{2.20348 \times 10^{-7} \mu A}{1.3 \text{ cm}^2} = 1.69498 \times 10^{-7} \frac{\mu A}{\text{cm}^2} \quad (18)$$

$$Cr = 3.27 \times 10^{-3} \cdot \frac{1.69498 \times 10^{-7} \frac{\mu A}{\text{cm}^2} \cdot 94.8615 \text{ g}}{7.85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 6.69780 \times 10^{-9} \text{ mpy} \quad (19)$$

-Muestra 9.

$$i_{corr} = \frac{7.24846 \times 10^{-7} \mu A}{1.3 \text{ cm}^2} = 5,57574 \times 10^{-7} \frac{\mu A}{\text{cm}^2} \quad (20)$$

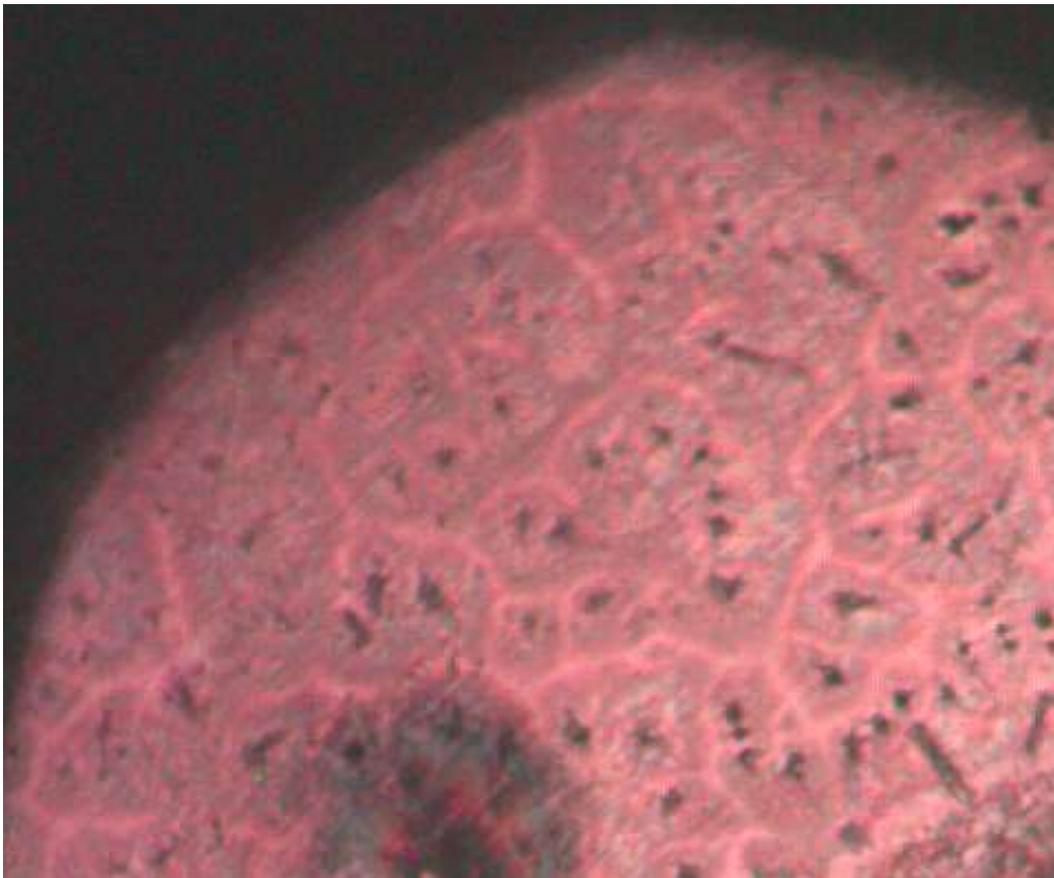
$$Cr = 3.27 \times 10^{-3} \cdot \frac{5,57574 \times 10^{-7} \frac{\mu A}{\text{cm}^2} \cdot 94.8615 \text{ g}}{7.85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 22.03284 \times 10^{-9} \text{ mpy} \quad (21)$$

11. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con respecto a lo observado en las microestructuras de las pruebas, se evidencia visualmente en la superficie de las muestras cómo el inhibidor verde ayudó a proteger grandes partes del material como se puede ver en las Figuras 47 y 48, disminuyendo la corrosión en las Figuras 45 y 46, además de la corrosión por picadura vista en la Figura 63 a continuación.

Figura 63.

Muestra 1 X50



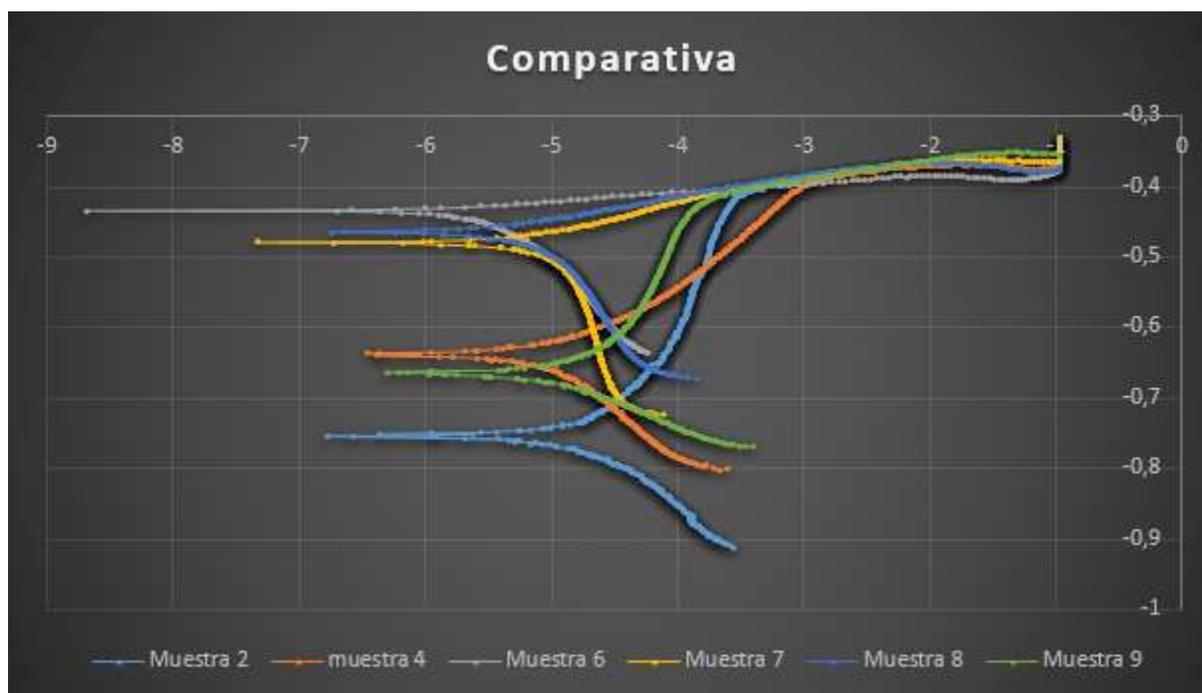
Nota. En la figura se observa la muestra 1 X50 posprueba sin inhibidor y la picadura resultada de la prueba.

Como la corrosión no debe evaluarse completamente por visuales de la superficie, se deben considerar los resultados de las pruebas electroquímicas, reuniendo los valores y mostrándolos en una sola gráfica para que así se puedan ver con mayor precisión valores e información clave

como: Potencial de corrosión de referencia, potencial de corrosión con el inhibidor, el comportamiento del inhibidor e incluso si hubo algún tipo de inhibición, teniendo en cuenta las concentraciones de cada muestra que también están diferenciadas en el gráfico 64 a continuación.

Figura 64.

Comparativa de muestras



Nota. En la figura se observan las 6 pruebas más representativas contrastándose entre sí.

El gráfico fue elaborado en el software de Excel, al exportar los datos guardado en formato .txt de los experimentos, estos datos se tabularon y graficaron por separado dependiendo de cada muestra, a estos datos no se le realizó ninguna modificación a excepción de la obligatoriedad de calcular el logaritmo base 10 de la corriente registrada para que de esta forma se pudieran normalizar los datos y que fueran visualizados de manera correcta.

Se aprecia que el comportamiento de las muestras 2, 4 y 9 son menos electropositivas en sus corrientes catódicas y en su potencial de corrosión, punto de unión entre las corrientes catódicas y anódicas, que las muestras 6,7 y 8, por su falta y poca concentración de inhibidor, así que las

muestras agregadas tienen un comportamiento más electropositivo tanto son sus corrientes catódicas como en su potencial de corrosión. Por el mismo comportamiento mencionado, se evidencia que el inhibidor es anódico al comportarse electropositivamente y arroja un resultado posible de una inhibición exitosa, por lo que se determina el mejor potencial de corrosión y la concentración responsable de evaluar su eficacia.

12. CONCLUSIONES

-Se logró realizar el análisis comparativo de la eficacia del extracto de hoja de guayaba en la corrosión del acero API 5L X65, utilizando la técnica electroquímica de polarización potenciodinámica.

-El inhibidor verde a base del extracto de hoja de guayaba seleccionado para las pruebas electroquímicas de polarización potenciodinámicas, arrojó resultados positivos respecto a su naturaleza anódica en medios acuosos salinos al 3.56%.

-La efectividad del inhibidor se determinó como positiva visualmente gracias a la caracterización metalográfica realizada en las muestras comparando las muestras con y sin el inhibidor evidenciando el daño tanto la corrosión generalizada como por picadura en la microestructura.

-Se realizaron un total de 9 pruebas de polarización potenciodinámicas para evaluar la resistencia a la corrosión del acero API 5L X65, las 4 primeras se realizaron sin el extracto de hoja de guayaba, a las muestras 5 y 6 se les suministró el 1% (4 ml) de inhibidor, después se prepararon otras concentraciones a las muestras 7, 8 y 9 en cantidades del 0.2% (0.8 ml), 0.25% (1 ml) y 0.175% (0.5 ml) respectivamente.

-Gracias al análisis de resultados se logró determinar la concentración con el mejor desempeño, el cual fue el de la muestra 6, en una concentración del 1% (4ml) del inhibidor, con un valor del 42,44%.

-La exposición de este proyecto trae al escenario académico varios temas de ingeniería en varios campos, no solo mecánicos, también químicos, industriales, de materiales, etc. Como caracterizaciones metalográficas microestructurales, ataques químicos, pruebas electroquímicas, procesos y por sobre todo los inhibidores verdes y las ventajas que estos pueden conllevar.

13. RECOMENDACIONES

- Se recomienda probar otros tipos de inhibidores verdes y medios acuosos para posiblemente tener mejores resultados.
- Se recomienda hacer otros estudios electroquímicos con el mismo tipo de acero e inhibidor, como el EIS, extrapolación de Tafel y análisis gravimétrico para ver posibles cambios de comportamiento.
- Se reconoce la posibilidad y la relevancia de hacer estudios más profundos para evaluar la concentración que pueda ser más eficaz para este material e inhibidor.
- Se recomienda siempre poner el electrodo de referencia lo más cerca posible a la muestra para que no haya una variación en los resultados.
- Se recomienda hacer a la par de la polarización potenciodinámica la extrapolación de Tafel para tener cálculos y resultados más exactos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. A. J. Mazumder, "Global Impact of Corrosion: Occurrence, Cost and Mitigation," *Glob. J. Eng. Sci.*, vol. 5, no. 4, pp. 1-6, 2020.
- [2] Xuxiang Wang, Li Chen, Feng Yang, Qing Xiang & Jing Liu, Corrosion inhibition mechanism and extraction technology of plant corrosion inhibitors: a review, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 37:21, 2919-2943, (2023), DOI: 10.1080/01694243.2023.2172993
- [3] Perumal, S., Muthumanickam, S., Elangovan, A. et al. Bauhinia tomentosa Leaves Extract as Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 1M HCl Medium. *J Bio Tribo Corros* 3, 13, (2017), DOI: 10.1007/s40735-017-0072-5
- [4] Abdulwahab, M., L.M. Sani, S.A. Yoro, and O.B. Umaru. (2015). "Inhibitive Effect by Psidium Guajava Leaf Extract on the Corrosion of Al-Si-Mg (SSM-HPDC) Alloy in Simulated Seawater Environment". *Metallurgical and Materials Engineering* 21 (4):241-52. <https://metall-mater-eng.com/index.php/home/article/view/70>.
- [5] S. Z. Salleh et al., "Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 304, (2021), DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127030
- [6] National Association of Colleges and Employers (2013) "Economic Impact". <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>
- [7] Wolyneć, S. (2003). "Técnicas eletroquímicas em corrosão" (Vol. 49). Edusp.
- [8] Salazar-Jiménez, José Alberto. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Revista Tecnología en Marcha*, 28(3), 127-136. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822015000300127&lng=en&tlng=es.

[9] IGESUR (2023, 14 de noviembre). ¿Qué son los inhibidores de corrosión?. Blog de IGESUR. <https://www.igesur.com/blog/que-son-los-inhibidores-de-corrosion/>

[10] L. A. Godínez et al., "Los inhibidores de corrosión," *Revista de Metalurgia*, vol. 39, no. 2, pp. 140–158, (2003), <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2003.v39.i2.325>

[11] B. E. A. Rani and B. B. J. Basu, "Green Inhibitors for Corrosion Protection of Metals and Alloys: An Overview," *International Journal of Corrosion*, vol. 2012, pp. 1–15, (2012), <https://doi.org/10.1155/2012/380217>

[12] P. Wang et al., "Effectiveness Protection Performance of an Internal Blending Organic Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Chloride Contaminated Simulated Concrete Pore Solution," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 116–128, (2020), <https://doi.org/10.3151/jact.18.116>

[13] H. Wei, B. Heidarshenas, L. Zhou, G. Hussain, Q. Li, and K. (Ken) Ostrikov, "Green inhibitors for steel corrosion in acidic environment: state of art," *Mater. Today Sustain.*, (2020), <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2020.100044>

[14] C. M. Méndez, C. A. Gervasi, G. Pozzi, and A. E. Ares, "Corrosion Inhibition of Aluminum in Acidic Solution by *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate) Extract as a Green Inhibitor," *Coatings*, vol. 13, no. 2, p. 434, (2023), <https://doi.org/10.3390/coatings13020434>

[15] Craig. K. Nsakabwe, M. E. Makhatha, G. M. Tsoeunyane, and A. D. Baruwa, "Corrosion Inhibition Efficiency of Polyvinylpyrrolidone-Cysteine on Mild Steel in 1.0 M HCl Solution," *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, vol. 8, no. 2, (2022), <https://doi.org/10.1007/s40735-022-00647-3>

[16] Corrosion Inhibition of Mild Steel in Hydrochloric Acid Environments Containing *Sonneratia caseolaris* Leaf Extract", <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07237.s001>

- [17] Mohammad Salman, K.R. Ansari, Vandana Srivastava, Dheeraj Singh Chauhan, Jiyaul Haque, M.A. Quraishi, “Chromeno naphthyridines based heterocyclic compounds as novel acidizing corrosion inhibitors: Experimental, surface and computational study”, *Journal of Molecular Liquids*, vol 322, 114825, ISSN 0167-7322, (2021), <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114825>
- [18] A. A. Musa, S. A. Yaro, S. M. Adams, and A. A. Adebisi, “Potential of Combretum glutinosum leaf extract as corrosion inhibitor for Al-Si-Mg alloy in artificial seawater environment,” *Nigerian Journal of Technological Research*, vol. 14, no. 3, (2019), <https://doi.org/10.4314/njtr.v14i3.5>
- [19] M. V. Mohamed, A. J. Ahamed, and A. Samsathbegum, “Synthesis of CeO₂ Nanoparticles from Psidium guajava Leaf Extract for Corrosion Inhibition of Zinc in Hydrochloric Acid through Electrochemical Analysis,” (2023), <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2529104/v1>
- [20] ASTM International, "Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements," ASTM G59–23, pp. 1–9, (2023), DOI: 10.1520/G0059-23
- [21] “Electrochemical Impedance Spectroscopy,” *Analytical Methods In Corrosion Science and Engineering*, pp. 477–520, (2005), <https://doi.org/10.1201/9781420028331-17>
- [22] J.A. Fuentes, “Propiedades a impactos de aceros microaleados,” Tesis doctoral, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México, 2003.
- [23] HT tuberías Zhengzhou Huitong Pipeline Equipment Co.,Ltd. (2023, marzo 24). Tuberías de acero al carbono API 5L X65, Tuberías de línea API 5L X65, Tuberías de grado X65. <https://www.octalacero.com/norma-api-5l>.

[24] American Petroleum Institute (API). (2012, December). Especificación para tubería de conducción ESPECIFICACIÓN 5L DE API CUADRAGÉSIMA QUINTA EDICIÓN. (Effective Date: July 1, 2013).