



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA

**ESTUDIO SOBRE LA CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO AISI 1020  
EN UNA SOLUCIÓN ÁCIDA CON BASES DE SCHIFF QUE CONTIENEN  
CISTEÍNA**

Caroline Dayane Saavedra Astudillo

Copiapó, Chile 2025



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA

**ESTUDIO SOBRE LA CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO AISI 1020  
EN UNA SOLUCIÓN ÁCIDA CON BASES DE SCHIFF QUE CONTIENEN  
CISTEÍNA**

Profesores Guías: Dr. Álvaro Soliz Ayala  
Dr. Juan Muena Barria  
Comisión: Ing. Ivonne López Campusano  
Dr. Alexis Guzmán Mendez

Caroline Dayane Saavedra Astudillo

Copiapó, Chile 2025

## AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a Dios, a mi familia y a mi pareja, por ser mis pilares incondicionales durante todo este camino. Su apoyo, cariño y confianza fueron fundamentales para que pudiera llegar hasta aquí, incluso en los momentos más difíciles.

A mi fiel compañera de vida, mi querida perrita Rubi, gracias por acompañarme desde el inicio de esta carrera. Tu presencia constante fue un consuelo diario, una fuente silenciosa de amor, y un recordatorio de lealtad y compañía incondicional. En cada etapa, estuviste ahí, brindándome calma y alegría cuando más lo necesitaba.

También deseo agradecer profundamente a mis amigos, quienes, con su compañía, palabras de ánimo y paciencia, hicieron de este proceso algo más llevadero. Gracias por estar en cada etapa, desde las largas jornadas de estudio hasta las celebraciones más pequeñas.

A los profesores y profesoras a cargo de esta tesis, gracias por su orientación, exigencia y compromiso. Su experiencia y dedicación fueron clave para enriquecer este trabajo y mi formación académica.

A todos, gracias por ser parte de este logro.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1.	Aspectos generales	1
1.2.	Objetivos	1
1.2.1.	Objetivo general	1
1.2.2.	Objetivos específicos	1
1.3.	Hipótesis	2
1.4.	Planteamiento del problema	2
1.5.	Justificación	2
1.6.	Delimitaciones	3
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>4</b>
2.1.	Corrosión	4
2.2.	Mecanismo de corrosión química	5
2.2.1.	Cinética de la corrosión	6
2.3.	Corrosión en los aceros	7
2.4.	Inhibidores de la corrosión	7
2.4.1.	Eficacia de la inhibición de la corrosión	9
2.5.	Base Schiff	9
2.6.	Técnicas de caracterización	11
2.6.1.	Espectroscopia Infrarroja por transformada (FTIR)	11
2.6.2.	Espectrofotometría Ultravioleta-Visible (UV-Vis)	13
2.6.3.	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB o SEM)	14
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>ESTADO DEL ARTE</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>18</b>
4.1.	Caracterización de las bases Schiff	19

4.1.1.	Caracterización con FTIR.....	19
4.1.2.	Caracterización con UV-visible.....	19
4.2.	Electrodos de trabajo.....	19
4.3.	Mediciones electro analíticas.....	20
4.4.	Análisis morfológico.....	21
4.5.	Análisis matemático.....	22
<b>CAPÍTULO 5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>		<b>23</b>
5.1.	Resultados de las Mediciones Electroanalíticas a través de PEIS .....	23
5.1.1.	Diagrama de Nyquist.....	23
5.1.2.	Diagrama de Bode ( $\log Z $ vs $\log(\text{freq})$ ) .....	27
5.1.3.	Diagramas de Bode ( $\text{Phase}(Z)$ vs $\log(\text{freq})$ ).....	29
5.2.	Resultados Mediciones Electroanalíticas VBL.....	30
5.2.1.	Diagramas VBL.....	31
5.3.	Resultados de las Mediciones Voltaje en circuito abierto de OCV.....	33
5.4.	Análisis y comparación de cálculos de Resistencias para las Tres Bases Schiff .....	37
5.5.	Análisis morfológico.....	40
5.6.	Análisis FTIR.....	44
5.7.	Análisis UV-Vis .....	48
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES.....</b>		<b>52</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>53</b>

## TABLA DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipos de bases Schiff .....	10
Figura 2.2. Interferómetro de Michelson. ....	12
Figura 2.3. Diagrama de la absorción de un haz de luz. ....	14
Figura 2.4. Microscopia electrónica de barrido .....	15
Figura 4.1. Esquematización del procedimiento experimental utilizado en el desarrollo de este estudio .....	18
Figura 5.1. Diagramas de Nyquist para el acero al carbono en soluciones 1 M HCl con diferentes inhibidores y concentraciones. (a) Cis-Piridina, (b) Cis-Tiofeno, (c) Cis-Vainillina. ....	24
Figura 5.2. Diagramas de Bode (impedancia-frecuencia) para el acero al carbono en soluciones 1 M HCl con diferentes inhibidores y concentraciones. (a) Cis-Piridina, (b) Cis-Tiofeno, (c) Cis-Vainillina.....	28
Figura 5.3. Diagramas de Bode (ángulo de fase-frecuencia) para el acero al carbono en soluciones 1 M HCl con diferentes inhibidores y concentraciones. (a) Cis-Piridina, (b) Cis-Tiofeno, (c) Cis-Vainillina. ....	30
Figura 5.4. Curvas de voltametría lineal (corriente vs potencial) para el acero al carbono en soluciones 1 M HCl con diferentes inhibidores y concentraciones. (a) Cis-Piridina, (b) Cis-Tiofeno, (c) Cis-Vainillina.....	31
Figura 5.5. Curvas de voltametría lineal (corriente vs potencial) para el acero al carbono en soluciones 1 M HCl con diferentes inhibidores y concentraciones. (a) Cis-Piridina, (b) Cis-Tiofeno, (c) Cis-Vainillina.....	33
Figura 5.6. Curvas de voltametría lineal (corriente vs potencial) para el acero al carbono en soluciones 1 M HCl con diferentes inhibidores y concentraciones. (a) Cis-Piridina, (b) Cis-Tiofeno, (c) Cis-Vainillina.....	35
Figura 5.7. Velocidad de corrosión para el acero al carbono inmerso en solución 1 M HCl en presencia y ausencia de bases Schiff a diferentes concentraciones. ....	36
Figura 5.8. Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) para el acero al carbono inmerso en solución 1 M HCl en presencia y ausencia de bases Schiff a diferentes concentraciones. ....	37

Figura 5.9. Eficiencia de inhibición de la velocidad de corrosión sobre la corrosión de acero al carbono inmerso en solución 1 M HCl en presencia y ausencia de base Schiff Piridina a diferentes concentraciones.....	38
Figura 5.10. Eficiencia de inhibición de la velocidad de corrosión sobre la corrosión de acero al carbono inmerso en solución 1 M HCl en presencia y ausencia de base Schiff Tiofeno a diferentes concentraciones. ....	39
Figura 5.11. Eficiencia de inhibición de la velocidad de corrosión sobre la corrosión de acero al carbono inmerso en solución 1 M HCl en presencia y ausencia de base Schiff Vainillina a diferentes concentraciones. ....	40
Figura 5.12 Imágenes SEM de la pieza de acero AISI 1020 recién pulida sin ataque químico.....	41
Figura 5.13. Acero AISI 1020 luego de estar en presencia de una solución de HCl 1 M con 5% DMF y ausencia de inhibidor (0 ppm). ....	42
Figura 5.14. Imágenes SEM de la pieza de acero AISI 1020 luego de estar en presencia de una solución de 5% DMF HCl 1 M con 80 ppm de la base Schiff Piridina.....	43
Figura 5.15. Imágenes MEB de la pieza de acero AISI 1020 luego de estar en presencia de una solución de 5% DMF HCl 1 M con 80 ppm de la base Schiff Tiofeno.....	43
Figura 5.16. Imágenes MEB de la pieza de acero AISI 1020 luego de estar en presencia de una solución de 5% DMF HCl 1 M con 80 ppm de la base Schiff Vainillina.....	44
Figura 5.17. Espectros del FTIR correspondiente a la base Schiff Piridina analizadas con corrección de línea base. ....	45
Figura 5.18. Espectros del FTIR correspondiente a la base Schiff Tiofeno analizadas con corrección de línea base. ....	46
Figura 5.19. Espectros del FTIR correspondiente a la base Schiff Vainillina analizadas con corrección de línea base. ....	47
Figura 5.20. Comparación de los espectros de UV-Visible realizado a las tres bases Schiff. (a) transiciones presentes en cada base Schiff.....	49
Figura 5.21. Comparación de los espectros de UV-Visible realizado a las tres bases Schiff. (b) bandas de absorción de cada base Schiff.....	50

## INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Técnica de PEIS a diferentes concentraciones de resistencia de solución real e imaginaria de base Schiff Piridina.....	26
Tabla 5.2. Tabla de eficiencia inhibidora comparativa.....	36
Tabla 5.3. Picos correspondientes a los espectros de FTIR de las tres bases Schiff. ....	48
Tabla 5.4. Picos de los espectros UV-Visible de las tres bases Schiff analizadas. ....	51

## RESUMEN

La presente investigación aborda el fenómeno de la corrosión del acero al carbono AISI 1020 en soluciones ácidas, particularmente en ácido clorhídrico (HCl 1 M), evaluando la eficacia de inhibidores orgánicos derivados de bases de Schiff sintetizadas a partir del aminoácido cisteína. El objetivo general fue analizar el comportamiento de tres inhibidores Cis-Piridina, Cis-Tiofeno y Cis-Vainillina en distintas concentraciones (0–200 ppm), para determinar su capacidad de protección frente a la corrosión, mediante técnicas electroquímicas, morfológicas y espectroscópicas.

El estudio inicia con una revisión teórica del proceso de corrosión y el papel de los inhibidores como estrategia de mitigación sustentable. Las bases de Schiff seleccionadas presentan grupos funcionales como C=N, -OH y -SH, que favorecen su adsorción sobre superficies metálicas al formar complejos estables. Estas fueron sintetizadas y caracterizadas mediante espectroscopía FTIR y UV-Visible, confirmando su estructura molecular y propiedades inhibidoras potenciales.

El efecto inhibitor fue evaluado mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y voltametría de barrido lineal (VBL). Los resultados mostraron diferencias relevantes entre los inhibidores: Cis-Vainillina alcanzó eficiencias de inhibición superiores al 88 % a 100 ppm y mantuvo un comportamiento estable incluso a mayores concentraciones, posicionándose como el inhibidor más equilibrado. Cis-Piridina mostró un desempeño excelente a bajas concentraciones (85 % a 25 ppm), pero con pérdida de eficiencia a 200 ppm (60 %), lo que sugiere sobresaturación de la superficie metálica. Por otro lado, Cis-Tiofeno presentó una eficiencia máxima del 85 % a 50 ppm, pero inestabilidad a concentraciones más altas, evidenciando un comportamiento menos consistente.

El análisis morfológico mediante MEB corroboró estos hallazgos, evidenciando una menor degradación superficial del acero en presencia de los inhibidores, en particular con Vainillina. La comparación cuantitativa de los parámetros electroquímicos como la resistencia de polarización y densidad de corriente de corrosión permitió concluir que la efectividad de las bases de Schiff está estrechamente relacionada con su estructura química y la concentración empleada.

Este trabajo contribuye al desarrollo de inhibidores de corrosión más eficientes, menos tóxicos y ambientalmente sostenibles, con aplicaciones potenciales en sectores industriales como la minería, metalurgia y tratamiento de aguas, destacando el valor del diseño molecular en la ingeniería de materiales protectores.

## ABSTRACT

This research addresses the corrosion behavior of AISI 1020 carbon steel in acidic environments, specifically in 1 M hydrochloric acid (HCl), by evaluating the effectiveness of organic corrosion inhibitors derived from Schiff bases synthesized from the amino acid cysteine. The main objective was to analyze the performance of three inhibitors Cis-Pyridine, Cis-Thiophene, and Cis-Vanillin at various concentrations (0–200 ppm) to determine their protective capacity through electrochemical, morphological, and spectroscopic techniques.

The study began with a theoretical review of the corrosion process and the role of inhibitors as a sustainable mitigation strategy. The selected Schiff bases contain functional groups such as C=N, –OH, and –SH, which promote their adsorption on metal surfaces by forming stable complexes. These compounds were synthesized and characterized using FTIR and UV-Visible spectroscopy, confirming their molecular structures and potential inhibitory properties.

The inhibitory effect was evaluated through electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and linear sweep voltammetry (LSV). Results showed that Cis-Vanillin reached inhibition efficiencies above 88% at 100 ppm and maintained stable behavior at higher concentrations, positioning it as the most balanced inhibitor. Cis-Pyridine exhibited excellent performance at low concentrations (85% at 25 ppm), but its effectiveness decreased to 60% at 200 ppm, suggesting surface oversaturation. Meanwhile, Cis-Thiophene reached a maximum efficiency of 85% at 50 ppm, but showed instability at higher concentrations, indicating less consistent performance.

Morphological analysis using scanning electron microscopy (SEM) supported these findings, revealing reduced surface degradation of the steel, especially in the presence of Vanillin-based inhibitors. Quantitative comparison of electrochemical parameters—such as polarization resistance and corrosion current density—confirmed that the effectiveness of Schiff bases is closely related to their chemical structure and concentration.

This work contributes to the development of more efficient, less toxic, and environmentally sustainable corrosion inhibitors, with potential applications in industries such as mining, metallurgy, and water treatment, highlighting the importance of molecular design in protective materials engineering.

# **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1. Aspectos generales**

La corrosión es un proceso electroquímico que implica la degradación de metales debido a la interacción con su entorno, lo que puede generar importantes pérdidas económicas y riesgos para la seguridad (Revie & Uhlig, 2008) (Pedefferri, 2018). Para mitigar estos efectos, se ha propuesto el uso de inhibidores de la corrosión, como los compuestos orgánicos derivados de bases de Schiff que, al adsorberse sobre la superficie metálica, crean una barrera protectora que reduce la velocidad de corrosión (Sastri, 2011).

En este contexto, el trabajo utiliza aminoácidos como la cisteína para sintetizar las bases de Schiff, debido a su capacidad de coordinarse con metales y formar estructuras complejas, lo que mejora la protección del acero contra la corrosión (Raczuk et al., 2022). Las técnicas empleadas para evaluar la eficiencia de estos inhibidores incluyen la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE) y la microscopía electrónica de barrido (MEB), que permiten analizar la formación de películas protectoras sobre la superficie del acero AISI 1020 y su resistencia a la degradación en soluciones ácidas.

Por ello, este estudio busca contribuir al desarrollo de inhibidores más eficaces y con menor toxicidad, empleando compuestos orgánicos derivados de aminoácidos para aplicaciones en la protección de materiales metálicos dentro del ámbito industrial.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Estudiar el efecto inhibitor de nuevas bases de Schiff derivadas de cisteínas sobre la corrosión del acero al carbono AISI 1020 en solución ácida 1 M HCl.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- 1) Analizar el efecto de la concentración de tres bases Schiff derivadas del aminoácido cisteína, el N,N'-Cis Piridina, N,N'-Cis Tiofeno y el N,N'-Cis 4-Hidroxi-3-Metoxibenzaldehído, sobre la inhibición de la corrosión del acero al carbono AISI 1020 en soluciones 1 M HCl.

- 2) Optimizar las condiciones experimentales para la determinación cuantitativa de las tasas de corrosión del acero al carbono AISI 1020 en medio ácido (HCl), utilizando como inhibidores las tres bases Schiff previamente seleccionadas.
- 3) Evaluar mediante análisis morfológico el daño producido sobre la superficie del acero AISI 1020 tras la exposición a soluciones de 1 M HCl en presencia y ausencia de las tres bases de Schiff.

### **1.3. Hipótesis**

El presente trabajo estudia el uso de aminoácidos de cisteína como posibles inhibidores de corrosión para el acero al carbono. Por tanto, se estima que bases de Schiff promoverán la reducción en la velocidad de corrosión del acero al carbono tipo AISI 1020 cuando se encuentre inmersos en soluciones de 1 M HCl con diferentes concentraciones de los inhibidores. La eficiencia de inhibición será respaldada mediante el análisis de parámetros electroquímicos, cinéticos y morfológicos, que evidencian la eficiencia de inhibición frente a diversas concentraciones de estos compuestos.

### **1.4. Planteamiento del problema**

La corrosión del acero al carbono AISI 1020 en medios ácidos como HCl representa un grave problema industrial en diversas empresas de ingeniería tales como industria química, metalúrgica, entre otros. Estos problemas están directamente relacionados a costos de operación que deben ser cubiertos para tener la opción de proseguir con los procesos. Por otra parte, los inhibidores actuales presentan limitaciones en eficiencia y sostenibilidad. Esta investigación busca evaluar bases de Schiff con cisteína como inhibidores orgánicos, analizando su efectividad mediante técnicas electroquímicas, cinéticas y morfológicas, para proponer a éstas como alternativas más eficientes y ecológicas.

### **1.5. Justificación**

Este trabajo nos permitirá comprender la relación entre la inhibición de la corrosión y los sustituyentes de las bases Schiff sobre aceros al carbono, para así poder saber si la base Schiff puede ayudar a evitar la corrosión de estos aceros o la puede perjudicar. La información aportará nuevos conocimientos sobre el entendimiento del control de la corrosión metálica a través del uso de potenciales inhibidores de corrosión. El avance

científico a través de la presente propuesta abrirá las puertas a nuevos estudios en la ingeniería, los cuales podrán escalar a nivel tecnológico y ampliar su aplicabilidad a diferentes áreas industriales tales como la minería, plantas de tratamiento de aguas, plantas de desalinización, plantas de ácido, industria agrícola.

### **1.6. Delimitaciones**

En este estudio se ven involucradas ciertas variables de laboratorio que será delimitadas a:

- Condiciones de temperatura: Todos los ensayos electroquímicos y espectroscópicos se realizaron a temperatura ambiente, específicamente a 25 °C. Solución acida de HCl.
- Se empleó ácido clorhídrico (HCl) como medio corrosivo, ya que permite una adecuada disolución de las bases de Schiff y genera un ambiente suficientemente agresivo para inducir la corrosión en acero al carbono, condición necesaria para evaluar la eficiencia inhibidora.
- El análisis se limitó a tres bases de Schiff: Cis-Piridina, Cis-Tiofeno y Cis-Vainillina. Estas fueron seleccionadas por contener heteroátomos y grupos funcionales que, según literatura previa, presentan potencial inhibidor de la corrosión en medios ácidos.

## **CAPÍTULO 2      MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Corrosión**

La corrosión es definida como el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su entorno (Revie & Uhlig, 2008). En este proceso, los átomos metálicos abandonan el metal o forman compuestos en presencia de agua y gases, a través de un intercambio de electrones. Este desprendimiento de los átomos metálicos promueve fallas estructurales hasta alcanzar un quiebre o acumulación de óxidos, que por ejemplo en el interior de una tubería llegaría a taponar dicha tubería (Pedferri, 2018).

Por lo tanto, la corrosión es un proceso natural mediante el cual un material sólido, generalmente un metal, se deteriora debido a su interacción con el ambiente circundante. En términos generales, la corrosión implica una alteración de la composición e integridad física del material, que puede ocurrir bajo diversas condiciones y mecanismos.

Algunos factores que influyen en la corrosión incluyen a la microestructura del material, el tipo de ambiente, el contenido de oxígeno en el agua, la composición química y temperatura de la solución agresiva, entre otros.

Las razones principales de la importancia de la corrosión son: la economía, la seguridad y la conservación (Revie & Uhlig, 2008). El impacto en la economía en la corrosión es un fenómeno costoso en todas sus formas. En estados Unidos cuesta alrededor de 3% del producto interno bruto (PIB) (es decir, cientos de miles de millones de dólares cada año). La corrosión afecta los sistemas de transporte (puentes, oleoductos, automóviles, aviones, trenes y barcos), servicios públicos (energía eléctrica, agua, telecomunicaciones y plantas de energía nuclear), así como en la producción y manufactura (industria alimenticia, microelectrónica y refinación de petróleo). Los ingenieros deben incorporar características adicionales a sus diseños o elegir materiales más costosos con el fin de evitar la corrosión. Cuando se presenta la corrosión, se deben realizar reparaciones y reemplazar partes. Las fallas que ocurren como consecuencia de la corrosión son costosas y pueden resultar fatales (Askeland & Wright, 2017). Otra área es la seguridad la cual a través de la corrosión esta puede colocar en riesgo la integridad de los materiales, provocando fallas en infraestructuras, causadas por la corrosión, las cuales pueden causar accidentes, y que a

menudo son costosos y potencialmente fatales. Se deben incorporar diseños preventivos o seleccionar materiales más resistentes para minimizar estos riesgos. La corrosión también implica la pérdida y degradación de materiales, lo que lleva a un consumo más rápido de recursos naturales. Al desgastar los materiales, se requiere producir más para reemplazarlos, afectando la sostenibilidad a largo plazo. Además, la oxidación y otros procesos asociados a la corrosión aceleran el desgaste y deterioro de los productos y componentes, lo que impacta la durabilidad de estos.

## 2.2. Mecanismo de corrosión química

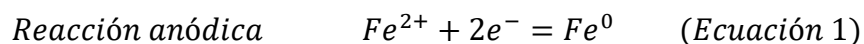
La gran mayoría de los procesos de corrosión tienen una naturaleza electroquímica sobre la superficie metálica, lo que implica una transferencia de cargas eléctricas entre zonas anódicas y catódicas. Esto ofrece amplias oportunidades para el estudio y control de la corrosión mediante la medición de variables eléctricas (Ugaz Lock & Díaz Tang, 1988). Así mismo, los metales existentes en la naturaleza son minerales de óxidos estables, carbonatos y sulfuros, donde la corrosión es la forma natural de estos metales ya procesados, tales como hierro, cobre, cinc, etc., los cuales retornan a su estado nativo, como compuestos químicos o minerales.

Dentro el fenómeno de la corrosión, el cual es de naturaleza electroquímica, comprende tres etapas principales:

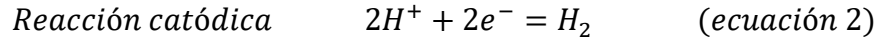
Ocurre una pérdida de parte del metal llamada área anódica (ánodo). En caso de la corrosión del hierro, éste entra al electrolito en forma oxidada de ion  $Fe^{+2}$  o  $Fe^{+3}$ .

Como resultado de la formación de  $Fe^{+2}$ , se liberan dos electrones que fluyen a través del metal al área catódica (cátodo). Por otra parte, el oxígeno presente en la solución agresiva se mueve hacia el cátodo y completa el circuito eléctrico usando los dos electrones que fluyen al cátodo, para formar  $OH^-$  en la superficie del metal (Rey, 2008)

Las reacciones que ocurren son las siguientes:



En ausencia de oxígeno o soluciones de elevada acidez, los iones  $H^+$  reaccionan en el cátodo en lugar del oxígeno y completan el circuito eléctrico a través de la reacción siguiente:



Dado que se trata de un equilibrio, y no hay transferencia neta de especies, y por tanto, tampoco hay transferencia neta de carga (principio de electroneutralidad), debe cumplirse que:

$$|i_a| = i_0 \quad (\text{ecuación 3})$$

En donde,  $i_a$  e  $i_c$ , son densidades de corriente de intercambio. Dado que ambos procesos se verifican con la misma rapidez. Por convención, se asume que  $i_a > 0$  e  $i_c < 0$  (Ugaz Lock & Díaz Tang, 1988).

### 2.2.1. Cinética de la corrosión

La ecuación de Butler-Volmer describe la densidad de corriente electroquímica como función del sobrepotencial, integrando así los aspectos cinéticos de la corrosión (Kuratani et al., 2022), y a través de las siguientes expresiones:

$$i = i_{0,a} \times \exp\left(\frac{\alpha_a n F \eta}{RT}\right) \quad (\text{ecuación 4})$$

$$i = i_{0,c} \times \exp\left(\frac{\alpha_b n F \eta}{RT}\right) \quad (\text{ecuación 5})$$

Donde:

- $i$ : densidad de corriente
- $i_0$ : densidad de corriente de intercambio
- $\alpha_a, \alpha_b$ : Coeficientes de transferencia de carga (anódico y catódico)
- $n$ : número de electrones
- $F$ : constante de Faraday (96485 C/mol)
- $\eta$ : sobrepotencial ( $E - E_{eq}$ )
- $R$ : constante de los gases (8.314 J/mol \* K)
- $T$ : temperatura absoluta (K)
- $E$ : Potencial aplicado

- $E_{eq}$ : *Potencial de equilibrio*

La ecuación de Butler-Volmer es fundamental para interpretar curvas de polarización, permitiendo así determinar la velocidad de corrosión y el comportamiento electroquímico de materiales en distintos medios (Kuratani et al., 2022).

### **2.3. Corrosión en los aceros**

El acero AISI 1020, un acero al bajo carbono se usa ampliamente en ensayos de corrosión debido a su estructura simple y su facilidad de mecanización, que permiten comprender bien los efectos de la corrosión en condiciones controladas. Este material es propenso a la corrosión en medios agresivos como soluciones salinas o ambientes con gases corrosivos (por ejemplo, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S), lo que lo hace un excelente candidato para estudios de corrosión electroquímica y de erosión-corrosión.

En estudios, se han utilizado técnicas electroquímicas como la resistencia a la polarización lineal y la extrapolación de Tafel para medir la velocidad de corrosión en este acero. Estas pruebas indican que la resistencia del acero AISI 1020 disminuye con el tiempo de exposición en medios salinos (ej., NaCl al 3%), mostrando vulnerabilidad al paso de corriente debido a su baja resistencia al ataque corrosivo. Sin embargo, se han probado técnicas de modificación superficial (como la implantación de iones de titanio) que pueden mejorar su resistencia frente a la corrosión en comparación con el acero no tratado, al crear barreras superficiales protectoras que disminuyen el transporte de iones corrosivos hacia la superficie del material (Rey, 2008).

Dada su popularidad en estos estudios, el acero AISI 1020 proporciona una referencia consistente para comparar métodos de protección contra la corrosión y evaluar el impacto de factores ambientales en la durabilidad de los materiales de acero en diversas aplicaciones industriales.

### **2.4. Inhibidores de la corrosión**

Un inhibidor de corrosión es un material que fija o cubre la superficie metálica, proporcionando una película protectora que detiene la reacción corrosiva. En general,

cualquier proceso que retrase la corrosión puede considerarse inhibición de la corrosión. La inhibición de la corrosión se ha logrado mediante la adición de un compuesto químico que inhibe la oxidación del metal. El inhibidor químico añadido al sistema puede estar en forma líquida, de vapor o ambas.

Los dos pasos involucrados en la acción del inhibidor de corrosión son el transporte del inhibidor a la superficie metálica, seguido de la interacción del inhibidor con dicha superficie. La interacción de un inhibidor de corrosión con una superficie metálica es similar a la interacción de una molécula de un medicamento con la fisiología humana, ya que ambas implican el transporte del compuesto hacia el sitio activo, seguido de la interacción con ese sitio (Sastri, 2011).

Se denomina inhibidor de corrosión a una sustancia, que añadida en cantidades muy pequeñas a un metal disminuye o elimina la acción del medio ambiente para corroerlo. Los inhibidores de corrosión actúan formando una película sobre la superficie metálica o bien entregando sus electrones al medio (Igesur soluciones técnicas S.L, 2025). Frecuentemente se intercambian los términos de corrosión y oxidación. El término oxidación normalmente se aplica a los materiales ferrosos, hierro y acero. El término más utilizado es corrosión, porque incluye también los metales no ferrosos. El manchado metálico es una corrosión ligera que resulta en una decoloración o deslustramiento de la superficie metálica. El manchado no necesita de un medio ambiente húmedo para ocurrir. Puede ser de color blanco y polvoriento, verde, negro o café. Este tipo de corrosión normalmente se encuentra en aluminio, latón y materiales de cobre (Suarez, 2018).

Los inhibidores de corrosión cumplen con las siguientes características principalmente:

- Revisten química y/o físicamente las superficies metálicas.
- Forman una barrera que aísla la humedad y el oxígeno de la superficie metálica.
- Pueden neutralizar la alcalinidad o acidez de la superficie.

### **2.4.1. Eficacia de la inhibición de la corrosión**

Las investigaciones sobre la eficacia de inhibidores de corrosión basados en las bases de Schiff han generado un gran interés, analizando cómo las características estructurales de estos compuestos influyen en su capacidad para inhibir la corrosión. Los científicos han experimentado con distintos sustituyentes, configuraciones estructurales y grupos funcionales en las bases de Schiff, evaluando su impacto en la fuerza de adsorción, la formación de capas protectoras y el rendimiento protector global.

Los estudios de relación cuantitativa estructura-actividad (QSAR) han facilitado el desarrollo de modelos predictivos que conectan ciertos atributos estructurales de las bases de Schiff con su eficacia para inhibir la corrosión. Este enfoque proporciona una base sólida para diseñar derivados de bases de Schiff mejorados, orientados a una mayor protección anticorrosiva. En resumen, los avances recientes en la investigación sobre las bases de Schiff destacan su potencial como inhibidores de la corrosión, al integrar una comprensión profunda de sus mecanismos y optimizar compuestos para aplicaciones industriales con alta eficiencia y especificidad (Ahmed A. Alamiery, 2024).

### **2.5. Base Schiff**

Las bases de Schiff son compuestos orgánicos que se caracterizan por la presencia de un doble enlace que une átomos de carbono y nitrógeno ( $C = N$ ), se forman por la condensación de una amina primaria con un aldehído o una acetona, liberando agua durante el proceso (Raczuk et al., 2022).

Las bases de Schiff empleadas en este estudio serán sintetizadas a partir del aminoácido cisteína. Los aminoácidos son compuestos cuyas moléculas contienen un grupo amino ( $-NH_2$ ) y un grupo carboxilo ( $-COOH$ ). Estas moléculas se caracterizan por ser no tóxicas, solubles en agua, biodegradables y de origen natural. Son relativamente baratos y se producen con una pureza superior al 99%. Debido a sus propiedades se han utilizado con éxito como inhibidores de corrosión en muchas aplicaciones prácticas.

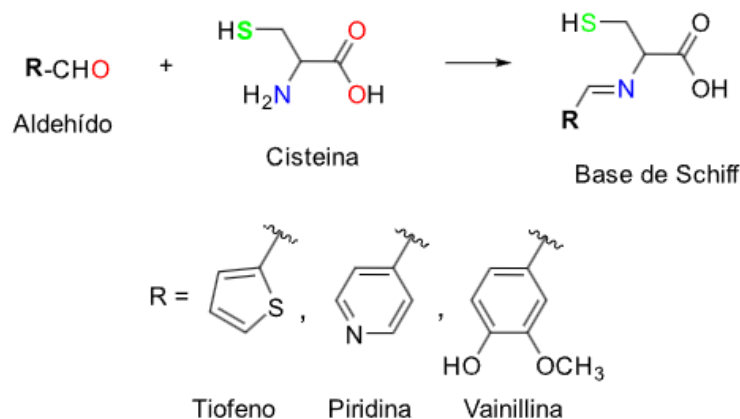
La formación de una base Schiff que contiene el aminoácido de Cisteína puede actuar como un ligando bidentado, debido que puede coordinarse a metales a través de su grupo de amina, en algunos casos a través del grupo tiol. Esto resulta útil en la formación de

complejos metálicos que contienen aplicaciones en catálisis, como en la activación de reacciones de oxidación y reducción (Raczuk et al., 2022).

Dentro de este trabajo se realizará la investigación de tres bases Schiff mostradas en la Figura 2.1, las cuales corresponden a:

- Cisteína-4-Aminopiridina (Cis-Piridina)
- Cisteína-tiofeno-2-carboxaldehído (Cis-Tiofeno)
- Cisteína-4-hidroxi-3-metilbenzaldehído (Cis-Vainillina)

**Figura 2.1. Tipos de bases Schiff**



Creación propia, 2024.

### 2.5.1. Cisteína-4-Aminopiridina (Cis-Piridina)

La base de cisteína en la estructura de la base Schiff añade propiedades únicas debido al grupo tiol que contiene azufre de la cisteína, la cual interactúa con varios iones metálicos, mejorando la capacidad de coordinación de la base Schiff. La piridina es un compuesto orgánico heterocíclico básico con la fórmula química  $C_5H_5N$ . Está estructuralmente relacionada con el benceno, con un grupo metino ( $=CH-$ ) reemplazado por un átomo de nitrógeno ( $=N-$ ) (Academia lab, 2024).

### **2.5.2. Cisteina-4-hidroxi-3-metoxibenzaldehído (Cis-Vainillina)**

La vainillina, metil vainillina o 3-metoxi-4-hidroxibenzaldehído, es un compuesto orgánico con la fórmula molecular  $C_8H_8O_3$ . Sus grupos funcionales incluyen el aldehído, éter y el fenol. Es el compuesto primario de la vaina de la vainilla. La vainilla sintética se emplea como agente saborizante en alimentos, bebidas y elementos farmacéuticos. Es una de las sustancias olorosas más apreciadas para crear aromas artificiales. Es un compuesto cristalino de color blanco soluble en cloroformo y éter con fórmula química  $(CH_3O)(OH)C_6H_3CHO$ .

La metil vainillina es un compuesto empleado en la industria de la alimentación, así como la etil vainillina. La forma etil es mucho más cara, pero por el contrario posee unas notas mucho más fuertes, y se difiere por la existencia de un grupo etosi ( $-O-CH_2CH_3$ ) en vez de un grupo metoxi ( $-O-CH_3$ ) (Hefei Home Sunshine Pharmaceutical Technology Co., 2013).

### **2.5.3. Cisteina-tiofeno-2-carboxaldehído (Cis-Tiofeno)**

El 2-tiofenocarboxaldehído, también conocido como 2-formiltiofeno o 2-thenaldehído, es un compuesto heterocíclico que pertenece a la familia de los tiofenos, caracterizados por un anillo de cinco miembros compuesto por cuatro átomos de carbono y uno de azufre. Este compuesto se distingue por la presencia de un grupo aldehído ( $-CHO$ ) en la posición 2 del anillo, lo que le confiere propiedades químicas particulares.

## **2.6. Técnicas de caracterización**

### **2.6.1. Espectroscopia Infrarroja por transformada (FTIR)**

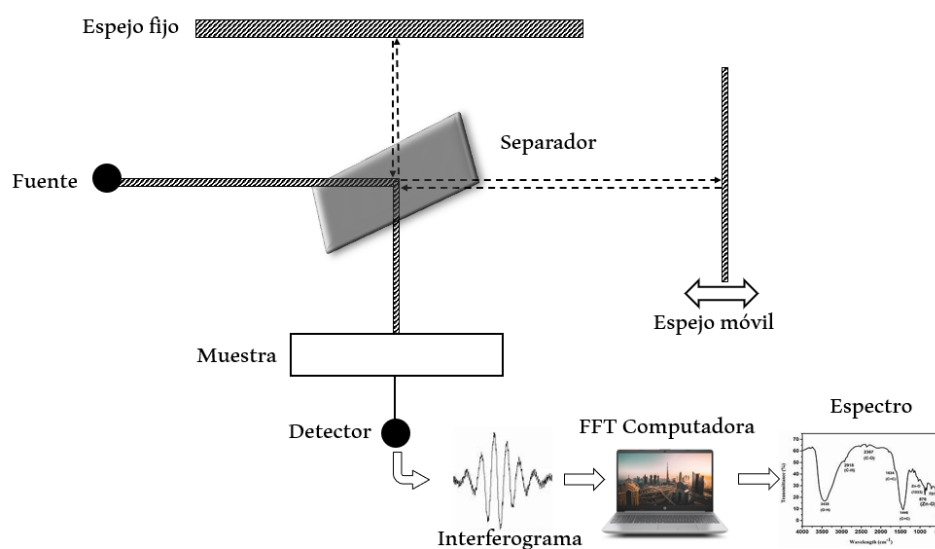
La FTIR es una técnica espectroscópica que mide la absorción de radiación infrarroja por parte de las moléculas, permitiendo identificar grupos funcionales y estructuras moleculares. Se basa en la interferencia de ondas infrarrojas y la transformada de Fourier para obtener el espectro de absorción. Un espectrómetro FTIR utiliza un interferómetro, generalmente de Michelson, para dividir un haz de luz infrarroja en dos caminos. Al recombinar estos haces, se genera un interferograma, el cual, mediante una transformada de Fourier, se convierte en el espectro de absorción del material analizado. El detector mide

la cantidad de energía de cada frecuencia que ha atravesado la muestra, produciendo como resultado un espectro que representa la intensidad de la señal en función de la frecuencia (Ruíz Loyola & Gutiérrez Franco, 2018).

### 2.6.1.1. Proceso de análisis de muestras

En un FT hay tres componentes básicos del espectrómetro: una fuente de radiación, un interferómetro y un detector.

**Figura 2.2. Interferómetro de Michelson.**



Creación propia, 2024.

El interferómetro divide los haces radiantes, genera una diferencia de camino óptico entre los haces y genera señales de interferencia medidas en función de la diferencia de camino óptico por el detector. Como su nombre indica, el interferómetro produce señales de interferencia, que contienen información espectral IR generada tras atravesar la muestra. El interferómetro más utilizado es el interferómetro de Michelson que consta de tres componentes activos: un espejo móvil, un espejo fijo y un divisor de haz. Los dos espejos son perpendiculares entre sí. El divisor de haz es un dispositivo semirreflectante y a menudo se fabrica depositando una fina película de germanio sobre un sustrato plano de bromuro de potasio (KBr). La radiación procedente de la fuente IR de banda ancha se colima y se

dirige hacia el interferómetro e incide en el divisor de haz. (Ruíz Loyola & Gutiérrez Franco, 2018)

### 2.6.2. Espectrofotometría Ultravioleta-Visible (UV-Vis)

La técnica de espectrofotometría ultravioleta-visible es una de las más empleadas en el análisis farmacéutico. Consiste en medir la cantidad de radiación ultravioleta (190-380 nm) o visible (380-800 nm) absorbida por una sustancia en solución. Los instrumentos que miden la relación, o una función de la relación, de la intensidad de dos haces de luz en la región ultravioleta-visible se denominan espectrofotómetros ultravioleta-visible. La absorción de la luz en las regiones ultravioleta y visible del espectro electromagnético se produce cuando la energía de la luz coincide con la necesaria para inducir en la molécula una transición electrónica y sus transiciones vibracionales y rotacionales asociadas. Por lo tanto, es conveniente considerar conjuntamente las técnicas de espectrofotometría ultravioleta y espectrofotometría visible (Smith, 1971).

#### Ley de Beer-Lambert

La Ley de Beer se define del siguiente modo: la intensidad de un haz de radiación monocromática paralelo disminuye exponencialmente con el número de moléculas absorbentes. Más sencillamente se afirma que la absorbancia es proporcional a la concentración. La combinación de ambas leyes da lugar a la ley de Beer-Lambert:

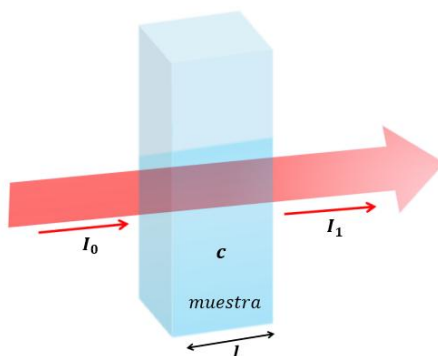
$$A = \log \times \frac{I_0}{I_T} \quad (\text{ecuación 4})$$

$$A = \varepsilon \times C \times l \quad (\text{ecuación 5})$$

Donde:

- $C$  = concentración de la sustancia que absorbe la luz.
- $\varepsilon$  = absortividad molar, o coeficiente de extinción, constante de proporcionalidad.
- $l$  = longitud atravesada por la luz en el medio.
- $A$  = absorbancia, cantidad de luz absorbida.

**Figura 2.3. Diagrama de la absorción de un haz de luz.**



Creación propia, 2024.

### **2.6.3. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB o SEM)**

El Microscopio Electrónico de Barrido (MEB o SEM) es un instrumento de alta resolución que permite obtener imágenes detalladas de la microestructura y morfología superficial de materiales mediante el barrido de un haz de electrones sobre la muestra. Este haz, de diámetro reducido entre 4 y 200 nanómetros mediante lentes electromagnéticas, interactúa con los átomos de la superficie, generando diversas señales (como electrones secundarios, retrodispersados y rayos X), que son captadas por detectores específicos. Estas señales se transforman en imágenes que pueden visualizarse en un monitor y almacenarse de forma digital, lo que convierte al MEB en una herramienta fundamental para el análisis topográfico y composicional en múltiples campos científicos y tecnológicos. (Noguez & Gonzalez, 2006)

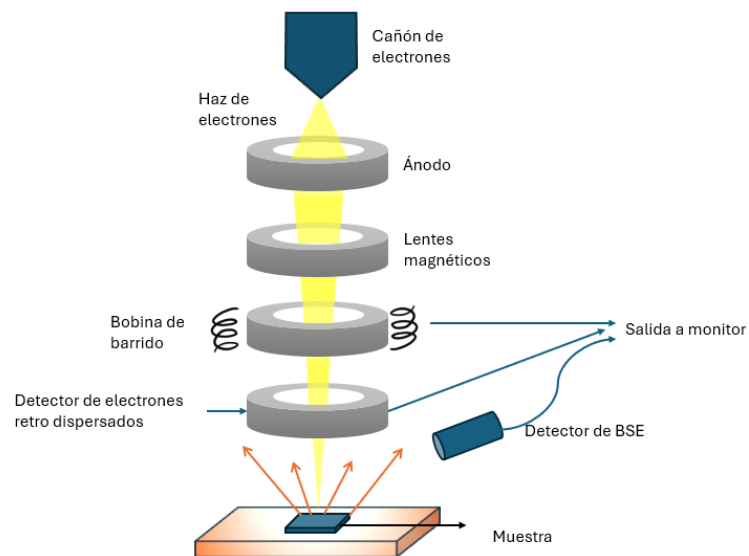
Los microscopios electrónicos de barrido suelen estar diseñados para detectar numerosas señales, incluso más allá de los electrones reflejados. Los rayos X, por ejemplo, también se producen cuando el haz de electrones de alta energía impacta en la muestra, y éstos aportan información adicional sobre la muestra. Sin embargo, las dos señales electrónicas principales que se obtienen con el MEB son los electrones retrodispersados y los electrones secundarios.

Los electrones retrodispersados (BSE) son electrones de alta energía procedentes del haz que son expulsados tras interactuar con los átomos de la muestra. Al dispersarse elásticamente, abandonan la muestra sin apenas pérdida de energía. Cuanto más pesado sea

el átomo (mayor número atómico), mayor será la retrodispersión de electrones. Por lo tanto, las imágenes de BSE proporcionan la composición relativa de la muestra, correspondiendo las zonas más brillantes a los átomos más pesados.

Por su parte, los electrones secundarios (SE) son el resultado de la dispersión inelástica entre los electrones de la muestra y el haz de electrones. Estos electrones atómicos son desplazados por los electrones del haz y expulsados de la muestra. Como su energía es relativamente baja, sólo pueden escapar de la muestra y alcanzar el detector si son expulsados cerca de la superficie de la muestra. Por este motivo, las imágenes de electrones secundarios se utilizan para revelar la topografía de una muestra. Muchos electrones pueden escapar por los bordes, que aparecen brillantes, y menos por los huecos, que aparecen más oscuros (Perrusquia, 2025).

**Figura 2.4. Microscopia electrónica de barrido**



Creación propia, 2024

### **CAPÍTULO 3      ESTADO DEL ARTE**

Respecto a trabajos realizados en conjunto con el tema a estudiar, los estudios se centran en el análisis de las características y métodos de inhibición de la corrosión en diferentes tipos de acero en ambientes ácidos. En primer lugar, se destaca el estudio de la velocidad de corrosión de un acero AISI-SAE 1020 en un sistema salmuera-aceite refinado-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S utilizando un electrodo de cilindro rotatorio (ECR). Este trabajo analiza la velocidad de corrosión en condiciones que simulan la industria petrolera, revelando que la presencia simultánea de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S incrementa significativamente la tasa de corrosión, especialmente a mayores velocidades de flujo. Asimismo, se observó que la formación de películas protectoras en la superficie del acero es limitada, sugiriendo la necesidad de estrategias de mitigación más efectivas. (Rey, 2008)

Por otro lado, en el estudio del comportamiento corrosivo del acero AISI 1020 en petróleo crudo ácido mediante técnicas microscópicas y espectroscopía Raman, (Dias et al., 2018) se evaluó la formación de capas protectoras y su evolución con el tiempo y la temperatura. Específicamente, se identificó una degradación de la película protectora de FeS tras 48 horas de exposición a 320 °C, lo que aumentó la susceptibilidad a la corrosión, evidenciando la necesidad de comprender los mecanismos de transformación de las películas protectoras en condiciones agresivas.

Asociado a lo anterior, el estudio de la velocidad de corrosión del acero austenítico AISI-317L expuesto a un sistema ácido aporta información relevante sobre el comportamiento de aceros inoxidable en medios ácidos. A pesar de la reconocida resistencia del AISI-317L, se demostró que, en ambientes altamente ácidos, se forman productos de corrosión que afectan su integridad, particularmente en zonas con heterogeneidades superficiales. Este hallazgo resalta la importancia de utilizar inhibidores adecuados y tratamientos superficiales para mejorar el desempeño de los materiales (Figueroa, 2023).

En la misma línea, el análisis de las propiedades de inhibición a la corrosión del acero API-X60 mediante líquidos iónicos derivados de amonio en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 M, mostró que la

utilización de líquidos iónicos (LIs) puede ser una estrategia eficaz para reducir la tasa de corrosión en soluciones ácidas, actuando como barreras físicas que previenen las reacciones de óxido-reducción en la superficie metálica (Cortes, 2024).

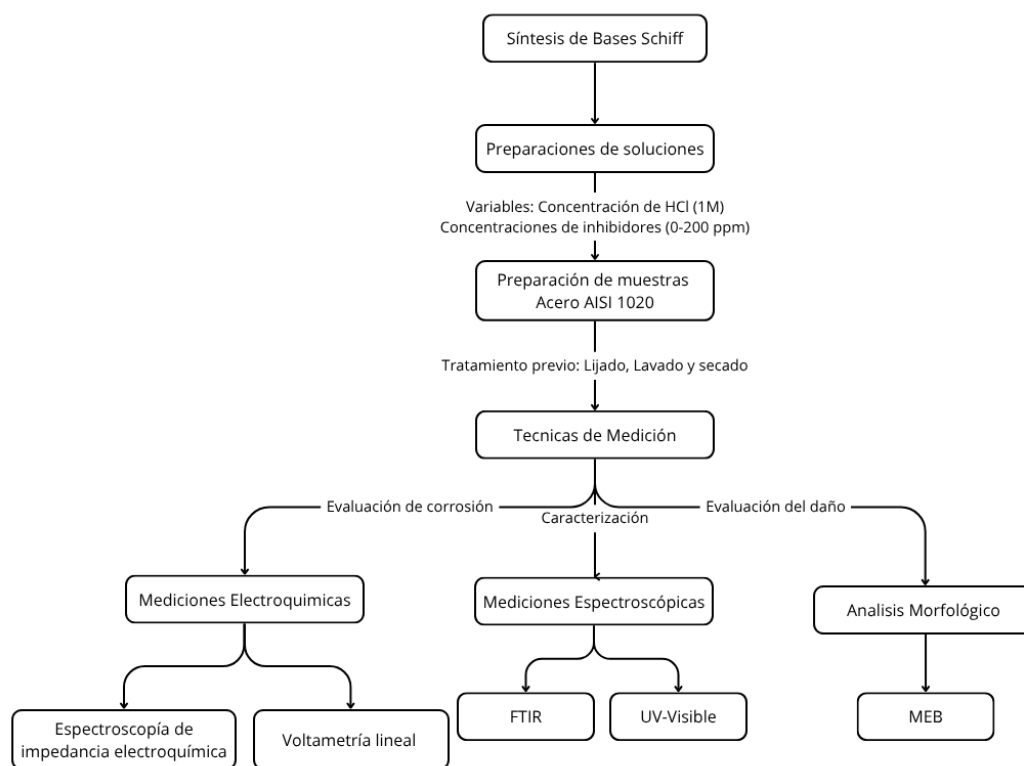
Finalmente, el estudio sobre el desempeño de bases Schiff ecológicas como inhibidores de corrosión en acero al carbono en una solución de ácido clorhídrico ofrece un importante avance hacia soluciones sostenibles. Se demostró que las bases Schiff forman una capa adsorbida que protege eficazmente al acero, al mismo tiempo que promueven prácticas más ecológicas dentro de la industria de inhibidores de corrosión (Valbon et al., 2023).

En conjunto, estos estudios reflejan la evolución en la comprensión de los mecanismos de corrosión en aceros y las estrategias para su mitigación. Desde la identificación de factores que aceleran la corrosión en ambientes específicos hasta el desarrollo de inhibidores más efectivos y respetuosos con el medio ambiente, queda de manifiesto que la investigación en este campo sigue siendo crucial para la preservación de materiales industriales. Así, el "Estudio sobre la corrosión del acero al carbono AISI 1020 en una solución ácida con bases de Schiff que contienen cisteína" se inserta en una línea de investigación actual y de gran relevancia tecnológica, buscando contribuir al desarrollo de inhibidores más eficientes y sostenibles.

## CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA

Las metodologías utilizadas para el estudio de bases Schiff como inhibidores de la corrosión para el acero al carbono tipo AISI 1020 inmerso en solución 1 M HCl corresponden primeramente a la síntesis de las bases Schiff, las cuales ya fueron previamente sintetizadas, en el Departamento de Química y Biología, y caracterizadas a partir de sus ligandos-base, llevando posteriormente la preparación de las soluciones para luego realizar las pruebas. Por otra parte, la evaluación de la velocidad de corrosión se realizó mediante técnicas electroanalíticas de voltametría de barrido lineal (VBL) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE). Lo que corresponde a las velocidades de corrosión, estas fueron calculadas mediante una modelación numérica de los resultados experimentales, y la determinación de la eficiencia de inhibición. Finalmente, el daño morfológico del acero al carbono tanto en presencia como en ausencia de las bases Schiff se analizó a través de microscopia electrónica de barrido (MEB).

**Figura 4.1. Esquematación del procedimiento experimental utilizado en el desarrollo de este estudio**



## **4.1. Caracterización de las bases Schiff**

### **4.1.1. Caracterización con FTIR**

Para la caracterización mediante espectroscopia infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR), se fabricaron pastillas mediante la mezcla de 0.120 g de KBr y entre 0.001-0.002 g de la respectiva base Schiff a analizar. La mezcla de ambos compuestos se pulverizó con la ayuda de un mortero, y posteriormente se introdujo en una prensa hidráulica para formar la pastilla. Una vez obtenida la pastilla, esta fue introducida dentro del espectrofotómetro infrarrojo (Thermo Scientific IS50) en donde se realizaron los análisis correspondientes.

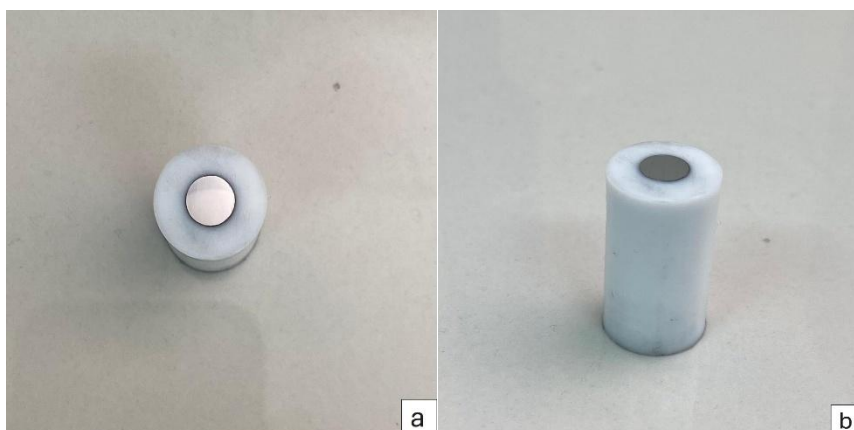
### **4.1.2. Caracterización con UV-visible**

Para la caracterización mediante espectrofotometría de UV-visible se utilizó una solución de N,N-dimetilformamida (DMF) mezclada con la respectiva base Schiff a analizar, la cual se introdujo dentro de un contenedor de cuarzo y se posicionó dentro del equipo de UV-visible (Shimadzu UV-mini 1240).

## **4.2. Electrodo de trabajo**

Los electrodos de trabajo se fabricaron desde barras comerciales de acero al carbono tipo AISI 1020, con una composición nominal teórica de (% masa.) 0.18–0.23 C, 0.1–0.35 Si, y 0.3–0.6 Mn con trazas de S, Si, Cu, Ni, Cr, Sn, P, Mo, y Fe como balance, utilizando un torno mecánico, y manteniendo una geometría cilíndrica de 0.6 cm de diámetro y 1 cm de largo. Estos cilindros fueron insertados en una vaina de teflón con el objetivo de mantener solo la cara inferior expuesta a la solución agresiva, tal como se muestra en la Figura 4.1. Antes de la realización de cada prueba electroanalítica, se realizó un proceso de pulido a la cara visible del acero del electrodo con la ayuda de papel lija de grano #800, #1200, #2500 utilizando una pulidora ECOMET 3, para posteriormente enjuagarlo con agua desmineralizada.

**Figura 4.1. Electrodo de trabajo de acero al carbono tipo AISI 1020, a) cara superior, b) cara lateral.**

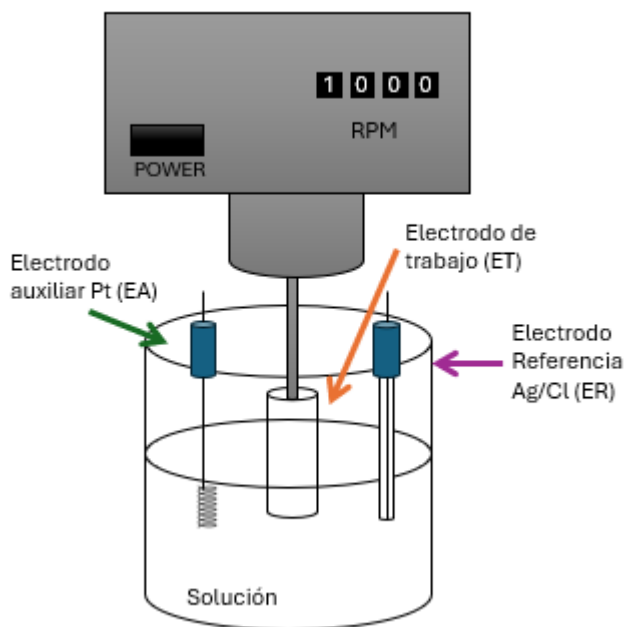


Por otro lado, la solución agresiva usada en los ensayos de corrosión fue una solución 1 M HCl con la adición de N,N-Dimetilformamida (DMF) al 5% el cual sirve como co-solvente. Todas las soluciones se prepararon con reactivos de grado analítico y agua destilada y en orden de evaluar el efecto inhibidor de las bases Schiff se prepararon soluciones agresivas con concentración de inhibidor iguales a 0, 25, 40, 80, 100 y 200 ppm.

### **4.3. Mediciones electro analíticas**

Los estudios de corrosión se realizaron mediante el uso de una celda electroquímica compuesta por un electrodo de referencia de Ag/AgCl, un contraelectrodo de platino y un electrodo de trabajo de acero al carbono AISI 1020, como se muestra en la Figura 4.2. Las mediciones por voltametría de barrido lineal se realizaron a una velocidad de barrido de 2 mV/s en dirección anódica considerando un rango de +200 mV y -200 mV respecto del potencial de circuito abierto. Por otra parte, los ensayos por espectroscopía de impedancia electroquímica se realizarán entre un rango de 100 kHz a 100 mHz considerando una amplitud de 20 mV. Todos los ensayos electroquímicos se realizaron utilizando un potenciostato/galvanostato BioLogic VSP-300, acoplado a una interfaz rotatoria la cual mantuvo una velocidad de 0 rpm durante cada ensayo.

**Figura 4.2. Sistema de tres electrodos para estudios de corrosión electroquímica.**



Creación propia (2024).

Para garantizar la conexión eléctrica, al electrodo de trabajo se le introdujo un trozo de alambre de cobre por la parte superior y luego se enroscó en la interfaz rotatoria, para posteriormente posicionar el electrodo de trabajo dentro del vaso precipitado de 50 mL junto con los otros dos electrodos de referencia y auxiliar, sumergiéndolo parcialmente en un volumen de entre 30-40 mL de la solución a estudiar.

Ya posicionado el electrodo de trabajo, se conectaron los cables a sus respectivos electrodos y se inició la toma de datos.

#### **4.4. Análisis morfológico**

Para la evaluación del daño morfológico sobre el acero al carbono, se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) (Zeiss EVO MA 10), en donde se evaluaron muestras de acero en presencia y ausencia de bases Schiff como inhibidor, además de considerar una muestra totalmente pulida como referencia inicial.

#### 4.5. Análisis matemático

Los resultados experimentales que se obtuvieron por ensayos de voltametría de barrido lineal se ajustaron a modelos cinéticos de transferencia de carga y masa acorde a las ecuaciones cinéticas de Butler-Volmer descritos por las ecuaciones 3, 4 y 5, y siguiendo el procedimiento de ajustes no-lineales descrito en literatura (Soliz & Cáceres, 2015). Las tasas de corrosión se determinaron acorde a la teoría del potencial mixto, donde para una densidad de corriente total igual a cero, las densidades de corrientes anódicas y catódicas son iguales. Para los resultados experimentales obtenidos por impedancia electroquímica, las resistencias en su escala Imaginaria y Real se ajustaron a circuitos eléctricos equivalentes, considerando circuitos con resistencias y capacitancias dispuestas serie y/o paralelo.

La evaluación de la capacidad de inhibición se determinó a partir de la siguiente expresión:

$$\eta_{inh} \% = \left( \frac{i_{corr}^0 - i'_{corr}}{i_{corr}^0} \right) * 100\% \quad (\text{ecuación 6})$$

donde,  $i_{corr}^0$  y el  $i'_{corr}$  corresponden a las velocidades de corrosión en ausencia y presencia del inhibidor, respectivamente, y determinadas desde los ensayos por voltametría de barrido lineal.

## CAPÍTULO 5 ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante técnicas analíticas de corrosión aplicadas al acero AISI 1020, con el propósito de evaluar su comportamiento en presencia de diferentes bases de Schiff. Asimismo, se incluyen las técnicas matemáticas empleadas para estudiar el proceso de corrosión en la superficie del acero, junto con los métodos de caracterización de las bases de Schiff.

### 5.1. Resultados de las Mediciones Electroanalíticas a través de PEIS

Los resultados de la técnica PEIS entregaron diagramas de Nyquist (Figura 5.1) y de Bode (Figura 5.2) para cada muestra y concentraciones de 0, 25, 40, 80, 100 y 200 ppm, de las bases Schiff.

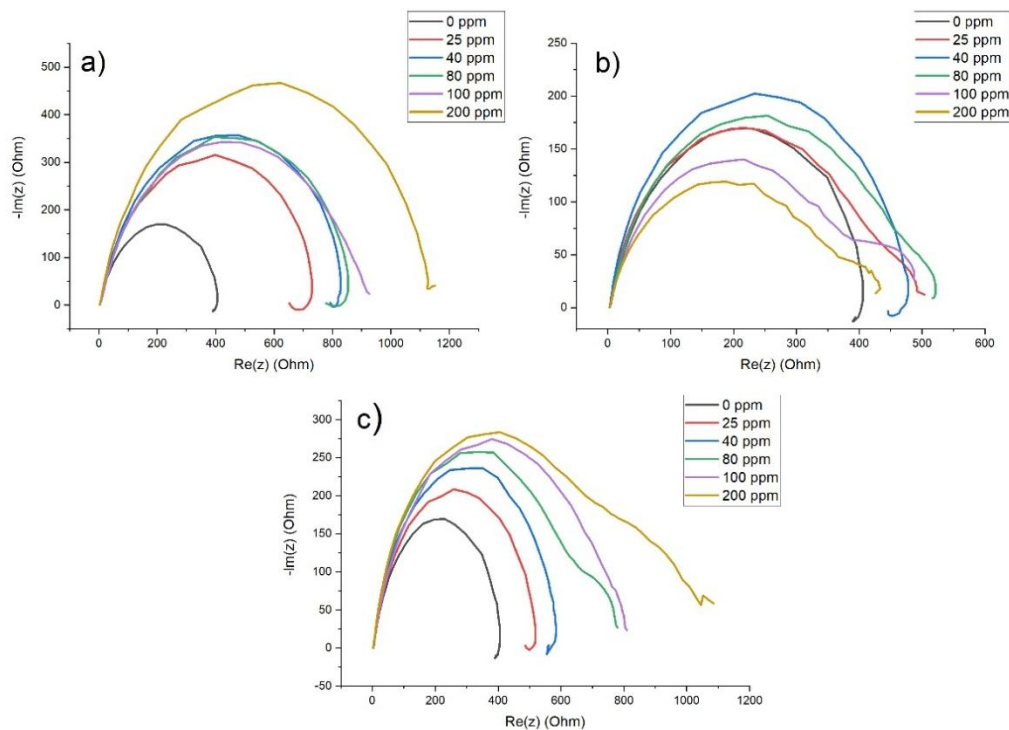
En el caso de los diagramas de Nyquist, los resultados se presentan en formato de resistencia imaginaria ( $-\text{Im}(Z)$ ) vs resistencia real ( $\text{Re}(Z)$ ), ambas con unidad de medida Ohm. Los diagramas se juntaron para cada base Schiff y cada concentración con el fin de crear un solo diagrama el cual permite divisar la manera en que varían las curvas a diferentes concentraciones.

En el caso de los diagramas de Bode, los resultados se presentan en dos formatos, un diagrama que indica el logaritmo de la magnitud de la impedancia ( $\log|Z|$ ) vs el logaritmo de la frecuencia ( $\log(\text{freq})$ ), y otro diagrama que indica la variación de fase ( $\text{Phase}(Z)$ ) vs el logaritmo de la frecuencia ( $\log(\text{freq})$ ). Estos diagramas se dividieron en dos gráficos distintos, obteniendo de esa manera dos diagramas de Bode para cada muestra, los cuales se juntaron para cada base Schiff y así poder estudiar su comportamiento.

#### 5.1.1. Diagrama de Nyquist

Los diagramas de Nyquist obtenidos para el acero al carbono inmerso en solución 1 M HCl a través de la técnica PEIS se pueden observar en la Figura 5.1, donde se aprecian los cambios para las curvas a diferentes concentraciones de las bases Schiff Cis-Piridina (Figura 5.1.a), Cis-Tiofeno (Figura 5.1.b) y Cis-Vainillina (Figura 5.1.c).

**Figura 5.1. Diagramas de Nyquist para el acero al carbono en soluciones 1 M HCl con diferentes inhibidores y concentraciones. (a) Cis-Piridina, (b) Cis-Tiofeno, (c) Cis-Vainillina.**



Creación propia, 2024.

Los resultados en los diagramas de Nyquist mostraron diferentes comportamientos de inhibición sobre la corrosión del acero al carbono, según la base Schiff estudiada. Para la base Cis-Piridina (Figura 5.1.a), a medida que aumenta la concentración del inhibidor, los diámetros de los semicírculos tienden a aumentar, respecto al diámetro del semicírculo obtenido en solución sin inhibidor, lo que sugiere un incremento en la resistencia a la corrosión, pudiéndose observar un mayor diámetro del semicírculo a 200 ppm de inhibidor indicando un mejor desempeño inhibitor al ofrecer mayor resistencia a la transferencia de carga. Sin embargo, para el caso de la base Schiff Cis-Tiofeno (Figura 5.1.b), se observa el diámetro del semicírculo incrementa con la concentración del inhibidor, respecto del valor sin inhibidor, hasta una concentración de 40 ppm, lo cual va disminuyendo a concentraciones mayores de los 40 ppm. Estos resultados indican que concentraciones mayores de 100 y 200 ppm, la base Schiff promueve la oxidación en vez de inhibirla.

Finalmente, el compuesto Cis-Vainillina (Figura 5.1.c) revela un incremento continuo en los valores de la impedancia, indicando una mayor resistencia a la corrosión del acero en HCl.

Bajo estas consideraciones, la Tabla 5.1 presenta los valores de las resistencias bajo condiciones de impedancia imaginaria nula ( $-Im = 0$ ), que representa la resistencia de la solución de electrolitos ( $R_{sol}$ ), y bajo una condición de frecuencia máxima de 10 mHz que representa la resistencia a la transferencia de carga en la corrosión metálica ( $R_{tc}$ ), para las tres bases Schiff utilizadas. Desde la tabla, se observa que, para todos los casos, las resistencias de la solución son menores a 3 Ohm, lo que revela que el HCl solo, así como con la presencia de bases Schiff no perjudica el paso de corriente a través de la solución de electrolitos.

**Tabla 5.1. Técnica de PEIS a diferentes concentraciones de resistencia de solución real e imaginaria de base Schiff Piridina.**

<b>Concentraciones, ppm</b>	<b><math>R_{tc}</math> (<math>f = 10</math> mHz), Ohm</b>	<b><math>R_{sol}</math> (<math>-Im = 0</math>), Ohm</b>
	Cis-Piridina	
<b>0</b>	394	3
<b>25</b>	652	0
<b>40</b>	792	0
<b>80</b>	777	0
<b>100</b>	927	0
<b>200</b>	1152	0
	Cis-Tiofeno	
<b>0</b>	394	3
<b>25</b>	247	0
<b>40</b>	274	0
<b>80</b>	320	0
<b>100</b>	361	0
<b>200</b>	426	0
	Cis-Vainillina	
<b>0</b>	394	3
<b>25</b>	486	0
<b>40</b>	556	0
<b>80</b>	779	0
<b>100</b>	811	0
<b>200</b>	1085	0

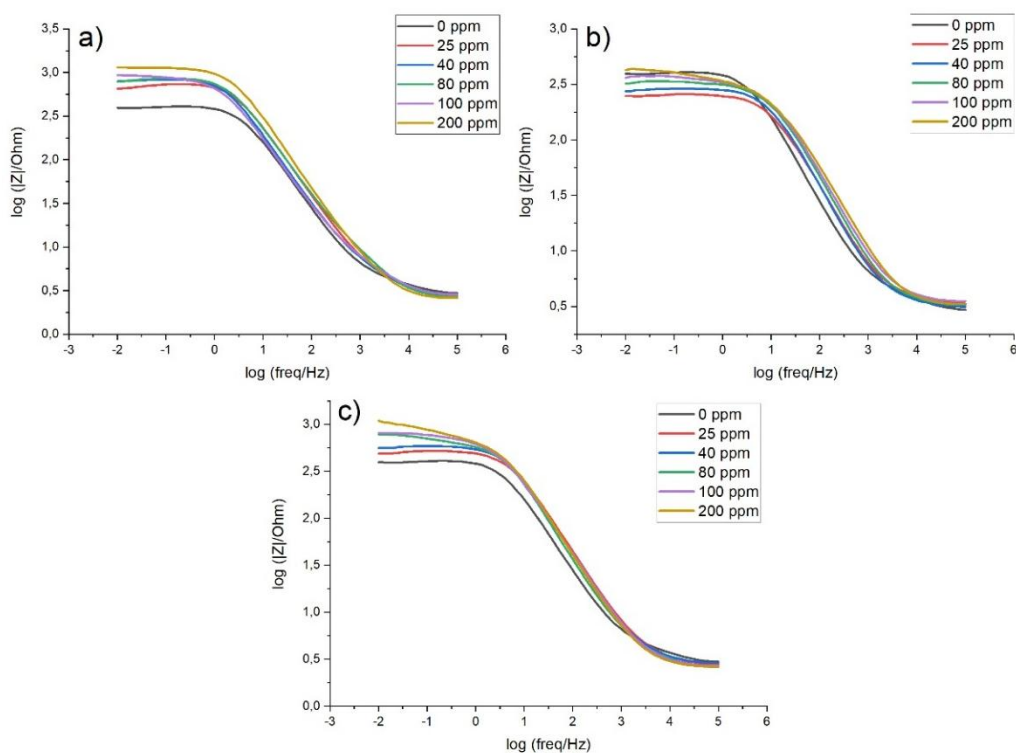
Por otra parte, para la base Cis-Piridina, la resistencia a la transferencia de carga ( $R_{tc}$ ) aumenta con la concentración del inhibidor, ósea que hay una disminución en la transferencia de electrones existente en el acero al carbono. Por ende, se puede inferir que una mayor barrera sobre en la superficie del metal, debido a la adsorción del inhibidor, lo que hace que disminuya el paso de corriente, esto quiere decir menor corrosión. Para la base Cis-Tiofeno, la resistencia  $R_{tc}$  no sigue una tendencia lineal, la resistencia suele disminuir inicialmente hasta los 100 ppm, esto se puede interpretar como a una menor protección a bajas concentraciones, para finalmente aumentar a 200 ppm. A simple vista podemos observar que Cis-Tiofeno tiene una eficiencia de inhibición menos consistente que la Cis-Piridina. Por último, para la base Cis-Vainillina, la resistencia a la transferencia de carga aumenta con la concentración de forma más continua. Esto indica un comportamiento estable del inhibidor, con una protección progresiva a la corrosión y menor intensidad de corriente a mayor concentración.

### 5.1.2. Diagrama de Bode ( $\log|Z|$ vs $\log(\text{freq})$ )

Los diagramas de Bode correspondientes a  $\log|Z|$  vs  $\log(\text{freq})$  de las tres bases Schiff se pueden ver en la Figura 5.2 para las bases Schiff Cis-Piridina, Cis-Tiofeno y Cis-Vainillina.

Los diagramas de Bode en dos de ellos presentaron tendencias similares, en los tres gráficos, donde a medida que aumenta la concentración del inhibidor, se observa un aumento en el módulo de impedancia ( $|Z|$ ), especialmente a frecuencias más bajas. Se puede realizar una comparación de los gráficos; Tal como el grafico (a) donde se muestra un rango más amplio de impedancias ( $\log|Z|$ ) alcanzando un valor de 3.5 Ohm aproximadamente, lo que podría representar una solución menos agresiva o una superficie más protegida inicialmente; gráfico (b) presenta impedancias más bajas, posiblemente bajo condiciones de mayor agresividad corrosiva; gráfico (c) exhibe un patrón intermedio entre (a) y (b), sugiriendo una variación en las condiciones experimentales como pH, temperatura o el tipo de base Schiff.

**Figura 5.2. Diagramas de Bode (impedancia-frecuencia) para el acero al carbono en soluciones 1 M HCl con diferentes inhibidores y concentraciones.**  
**(a) Cis-Piridina, (b) Cis-Tiofeno, (c) Cis-Vainillina.**



Creación propia, 2024.

El análisis de la impedancia electroquímica en acero al carbono en medio ácido (1 M HCl) revela la efectividad de varios inhibidores orgánicos basados en cisteína. Desde la Figura 5.2 podemos indicar que la Cis-Piridina muestra un aumento significativo en la impedancia con concentraciones de 100 y 200 ppm a bajas frecuencias, indicando alta resistencia a la corrosión. La ausencia de inhibidor (0 ppm) resulta en la menor impedancia. Cis-Tiofeno exhibe un comportamiento similar al Cis-Piridina, pero con un efecto menos marcado; las diferencias entre 25 ppm y 200 ppm no son tan evidentes, sugiriendo menor eficacia. Por último, la Cis-Vainillina presenta un efecto inhibitor notable, superior al Cis-Tiofeno, con mayores valores de impedancia a bajas concentraciones que sugieren buena protección.

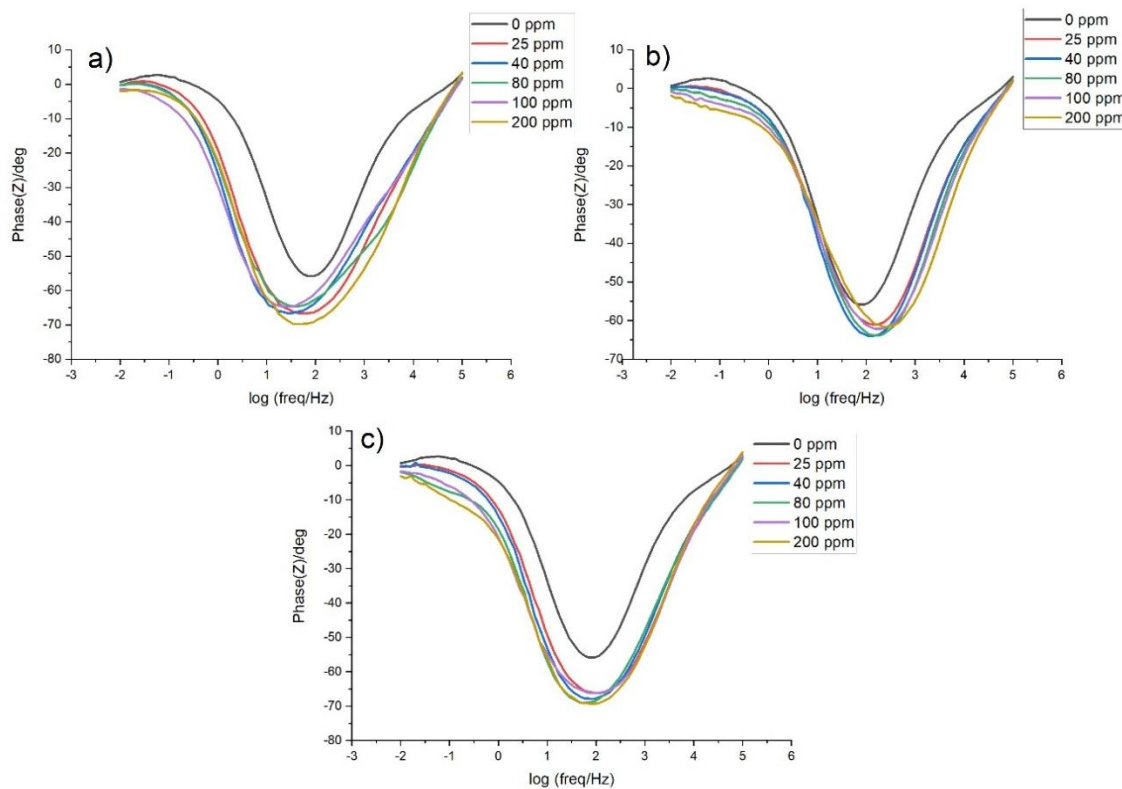
Como conclusión podemos indicar que la Cis-Piridina es el más eficaz, seguido de Cis-Vainillina y, en última posición, Cis-Tiofeno. Todos los inhibidores, a excepción del Cis-Tiofeno a ciertas condiciones de concentración, aumentan la impedancia con concentración, lo que indica una mejora en la protección contra la corrosión.

### **5.1.3. Diagramas de Bode (Phase(Z) vs log(freq))**

Los diagramas de Bode son presentados para los tres casos en la Figura 5.3, donde se indica que el ángulo de fase alcanza un valor mínimo alrededor de frecuencias intermedias, mostrando un comportamiento capacitivo típico de sistemas corroídos. Sin embargo, a medida que se incrementa la concentración de inhibidor, el ángulo de fase se amplía y el valle se hace más simétrico y profundo, indicando una mejor formación de la película protectora sobre la superficie del acero. En el gráfico (a), correspondiente a Cis-Piridina, se evidencia un cambio notable entre 0 ppm (línea negra) y 200 ppm (línea amarilla); a altas concentraciones, el ángulo de fase es más negativo, lo que sugiere una mayor capacitancia de doble capa y un mejor efecto inhibidor, indicando que Cis-Piridina es altamente efectivo en la formación de una barrera contra la corrosión. Por su parte, en el gráfico (b), correspondiente a Cis-Tiofeno, se observa un comportamiento similar, aunque con una menor diferenciación entre concentraciones; si bien existe una mejora al aumentar la cantidad del inhibidor, la variación del ángulo de fase es más limitada, lo que refleja una eficiencia inferior en comparación con Cis-Piridina. Finalmente, en el gráfico (c), correspondiente a Cis-Vainillina, se aprecia una mejora significativa respecto a la condición sin inhibidor, destacando que la curva para 200 ppm presenta un ángulo de fase más negativo que las demás, lo cual evidencia un buen desempeño inhibidor, aunque ligeramente inferior al de Cis-Piridina.

**Figura 5.3. Diagramas de Bode (ángulo de fase-frecuencia) para el acero al carbono en soluciones 1 M HCl con diferentes inhibidores y concentraciones.**

**(a) Cis-Piridina, (b) Cis-Tiofeno, (c) Cis-Vainillina.**



Creación propia, 2024.

## 5.2. Resultados Mediciones Electroanalíticas VBL

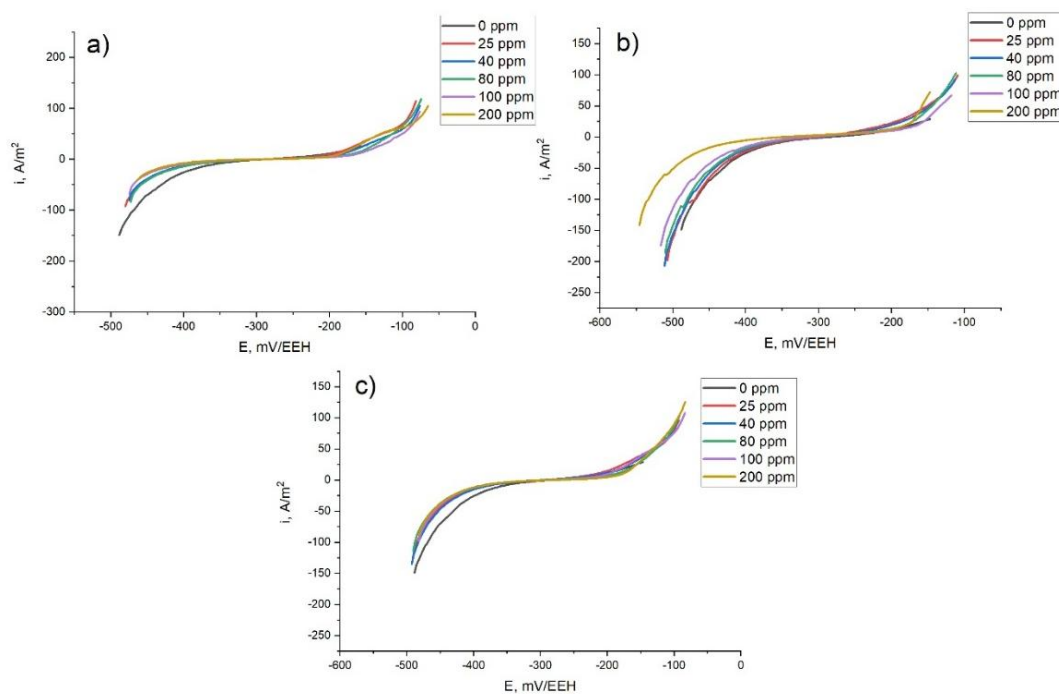
Los resultados obtenidos para el acero al carbono mediante la técnica VBL para las distintas concentraciones de inhibidor de 0, 25, 40, 80, 100 y 200 ppm, entregaron diagramas con un patrón sigmoideo en todas las muestras, los cuales se juntaron para generar una sola gráfica de densidad de corriente  $i$  ( $A/m^2$ ) vs potencial del electrodo  $E$  (V vs. EEH) (curvas de polarización) que logró mostrar con mayor facilidad su comportamiento.

### 5.2.1. Diagramas VBL

La Figura 5.4 muestra curvas de polarización para el acero al carbono AISI 1020 en HCl y en presencia y ausencia de inhibidores.

**Figura 5.4. Curvas de voltametría lineal (corriente vs potencial) para el acero al carbono en soluciones 1 M HCl con diferentes inhibidores y concentraciones.**

**(a) Cis-Piridina, (b) Cis-Tiofeno, (c) Cis-Vainillina.**



Creación propia, 2024.

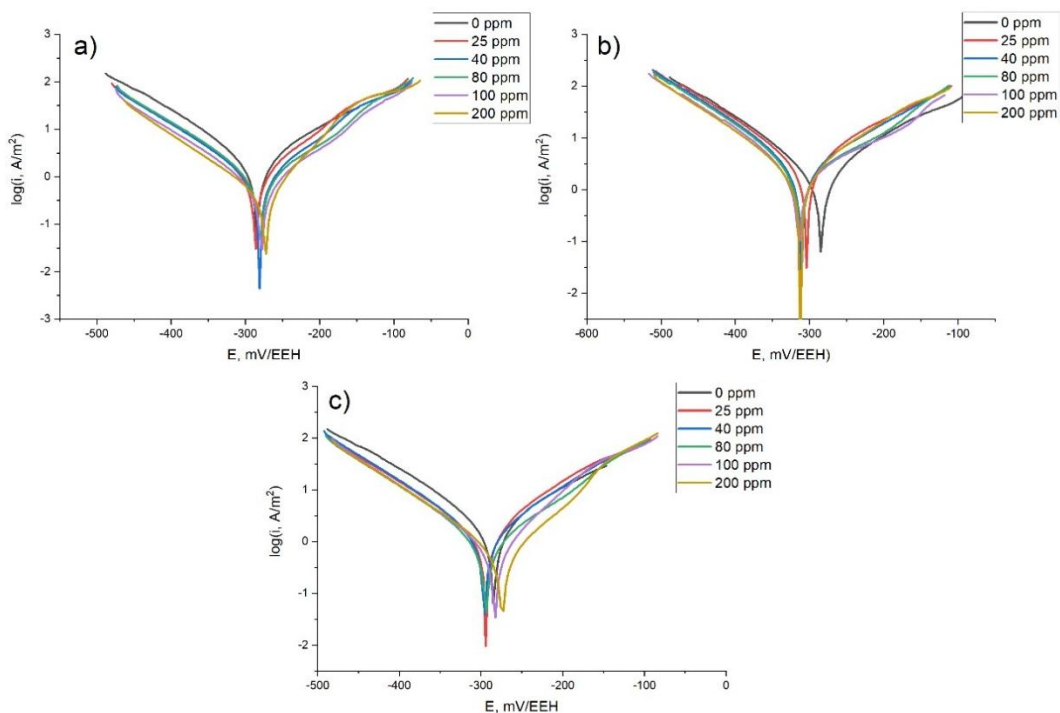
Las curvas comparan el comportamiento electroquímico en función de diferentes concentraciones del inhibidor (0 a 200 ppm). El comportamiento en general nos indica que, para todas las concentraciones, el incremento en la concentración del inhibidor disminuye la densidad de corriente ( $i$ ), indicando una menor tasa de corrosión. Las curvas muestran desplazamientos en el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y reducción en la corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), lo que confirma el efecto inhibitor. En la zona catódica se observa una disminución en la pendiente de la región catódica al aumentar la concentración del inhibidor, sugiriendo un control sobre la reducción de oxígeno o la reducción de protones (hidrógeno). Esto podría indicar una adsorción del inhibidor sobre los sitios catódicos, bloqueando el transporte de electrones. Por otra parte, la zona anódica con respecto a las

pendientes en la región anódica también disminuye al aumentar la concentración del inhibidor. Esto señala una inhibición sobre las reacciones de disolución del acero al carbono, probablemente debido a la formación de una película protectora en la superficie metálica. El desplazamiento de  $E_{corr}$  es pequeño (cercano al equilibrio), indicando que el inhibidor actúa como un inhibidor mixto (afectando tanto reacciones catódicas como anódicas). Sin embargo, algunos gráficos (especialmente b) muestran un desplazamiento más notable hacia potenciales más positivos, lo que podría sugerir un leve carácter predominantemente anódico.

Por otra parte, la Figura 5.5 presenta un conjunto de curvas de voltametría lineal en formato de curvas de Tafel, donde se representa la densidad de corriente logarítmica ( $\log(i)$ , en  $A/m^2$ ) en función del potencial ( $E$ , en  $mV/EEH$ ), para el acero al carbono en un medio ácido (1 M HCl), y en presencia de distintas concentraciones de inhibidores de corrosión. El objetivo es analizar el efecto inhibidor de tres compuestos orgánicos en diferentes concentraciones (0, 25, 40, 80, 100 y 200 ppm). Se puede notar que la Cis-Piridina presenta una reducción en la densidad de corriente a medida que aumenta la concentración del inhibidor, además, se observa un desplazamiento del potencial de corrosión hacia valores más positivos. Esto indica que la Cis-Piridina funciona como un inhibidor eficaz, disminuyendo la actividad de corrosión al adherirse a la superficie del acero. En el caso de la base Cis-Tiofeno, se registra un comportamiento similar: las curvas correspondientes a mayores concentraciones muestran densidades de corriente más bajas, y el potencial de corrosión también se desplaza ligeramente hacia valores más nobles, sin embargo, la región anódica presenta una mayor densidad de corriente respecto las curvas sin inhibidor, lo que sugiere que, bajo condiciones de mayor potencial, la base Schiff podría ayudar a la corrosión. El Cis-Tiofeno exhibe una eficiencia inhibidora que aumenta con la concentración, aunque en algunas curvas la diferencia es más sutil en comparación con la Cis-Piridina. En el caso de la Cis-Vainillina, también se observa una inhibición clara ya que hay una disminución significativa en la densidad de corriente a medida que aumenta la concentración del inhibidor. El cambio en el potencial de corrosión es notable, y las curvas con mayor concentración muestran una pendiente anódica y catódica más baja. La Cis-Vainillina parece proporcionar un efecto inhibidor sólido y estable incluso en concentraciones bajas.

**Figura 5.5. Curvas de voltametría lineal (corriente vs potencial) para el acero al carbono en soluciones 1 M HCl con diferentes inhibidores y concentraciones.**

**(a) Cis-Piridina, (b) Cis-Tiofeno, (c) Cis-Vainillina.**



Creación propia, 2024.

Se puede deducir que las tres sustancias (Cis-Piridina, Cis-Tiofeno y Cis-Vainillina) tienen propiedades que inhiben al disminuir la tasa de corrosión del acero al carbono en HCl 1 M, especialmente debido a un efecto en la región catódica. El efecto de inhibición se incrementa con la concentración del compuesto. A simple vista, la Cis-Vainillina parece ser la más eficaz, seguida de cerca por la Cis-Piridina, aunque sería necesario un análisis cuantitativo (por ejemplo, la eficiencia de inhibición) para confirmarlo.

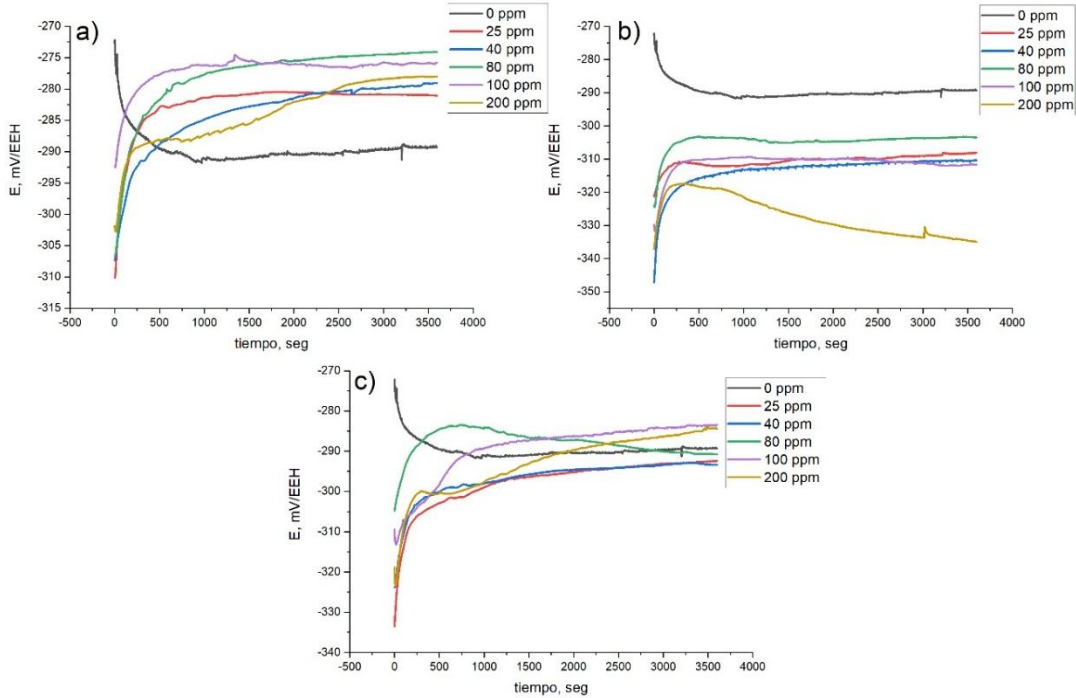
### 5.3. Resultados de las Mediciones Voltaje en circuito abierto de OCV

La Figura 5.6 representa curvas de potencial de circuito abierto ( $E$ ) vs tiempo de exposición, utilizadas para evaluar la estabilidad de sistemas de acero al carbono en soluciones corrosivas. Para el inhibidor de Cis-Piridina, se observa que el potencial en ausencia de inhibidor (0 ppm, curva negra) es más negativo, alrededor de -300 mV, lo cual indica una mayor tendencia a la corrosión, y a medida que aumenta la concentración del

inhibidor, el potencial se desplaza a valores más positivos, acercándose a -280 mV a 200 ppm. Esto sugiere que la Cis-Piridina reduce la tendencia del acero al carbono a corroerse, desplazando el potencial a valores más nobles. La curva de 200 ppm muestra una estabilización rápida y clara, indicando buena formación de capa protectora. El inhibidor Cis-Tiofeno en este caso, la curva sin inhibidor muestra un comportamiento muy estable, pero en un potencial altamente negativo, cercano a -270 mV. A concentraciones intermedias (40 y 80 ppm), el potencial se estabiliza en torno a -310 mV, mientras que a 200 ppm (curva amarilla), el potencial desciende hasta -345 mV antes de estabilizarse. Esta caída indica un efecto menos favorable a altas concentraciones, posiblemente por desorción o formación inestable de película. En general, el comportamiento del Cis-Tiofeno parece menos eficiente en comparación con la piridina. El inhibidor Cis-Vainillina la curva sin inhibidor comienza en valores menos negativos, pero desciende hasta -330 mV, indicando rápida corrosión inicial. Con inhibidor, el potencial de corrosión mejora significativamente, especialmente a 100 y 200 ppm. La curva de 100 ppm muestra el comportamiento más estable y noble (-285 mV aprox.), lo que sugiere que esta concentración es óptima para este inhibidor.

**Figura 5.6. Curvas de voltametría lineal (corriente vs potencial) para el acero al carbono en soluciones 1 M HCl con diferentes inhibidores y concentraciones.**

**(a) Cis-Piridina, (b) Cis-Tiofeno, (c) Cis-Vainillina.**



Creación propia, 2024.

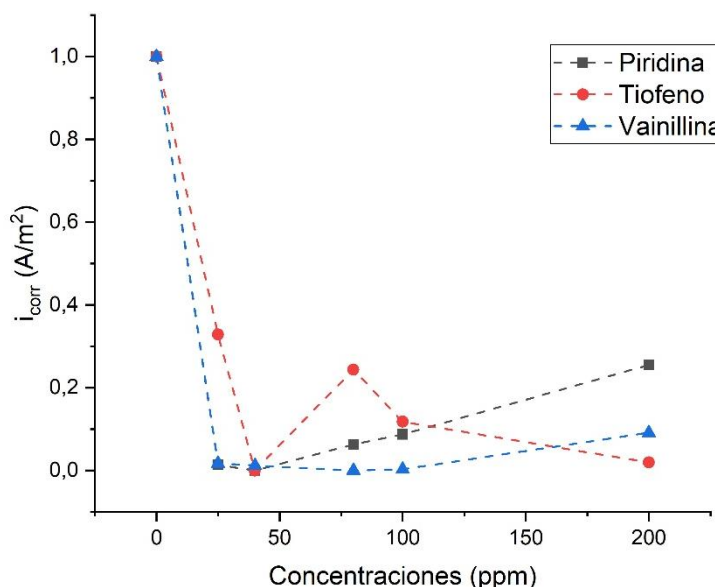
La Tabla 5.2 presenta una comparación de la eficiencia inhibidora de tres bases Schiff Cis-Piridina, Cis-Tiofeno y Cis-Vainillina utilizadas como inhibidores de corrosión en acero al carbono AISI 1020 en medio ácido HCl 1 M. Los resultados indican que Cis-Piridina ofrece la mejor protección, con una concentración óptima de 200 ppm, excelente estabilidad en el tiempo y una respuesta de fase más negativa y simétrica, lo que refleja una alta eficiencia inhibidora. Por otra parte, Cis-Tiofeno presenta una concentración óptima más baja (100 ppm), pero muestra inestabilidad a 200 ppm y una protección moderada con mayor dispersión en la respuesta de fase. Por su parte, Cis-Vainillina alcanza un buen desempeño entre 100 y 200 ppm, con una estabilidad muy buena y una fase negativa estable, lo que la posiciona como un inhibidor eficiente, aunque ligeramente inferior a Cis-Piridina.

**Tabla 5.2. Tabla de eficiencia inhibidora comparativa.**

Inhibidor	Concentración óptima (ppm)	Estabilidad (E vs tiempo)	Protección (Bode)
Cis-Piridina	200	Muy alta	Excelente (fase más negativa y simétrica)
Cis-Tiofeno	100	Inestable a 200 ppm	Moderada (fase menos negativa y dispersión)
Cis-Vainillina	100-200	Muy buena	Muy buena (fase negativa estable)

**Determinación de tasas de corrosión y eficiencias de inhibición**

**Figura 5.7. Velocidad de corrosión para el acero al carbono inmerso en solución 1 M HCl en presencia y ausencia de bases Schiff a diferentes concentraciones.**



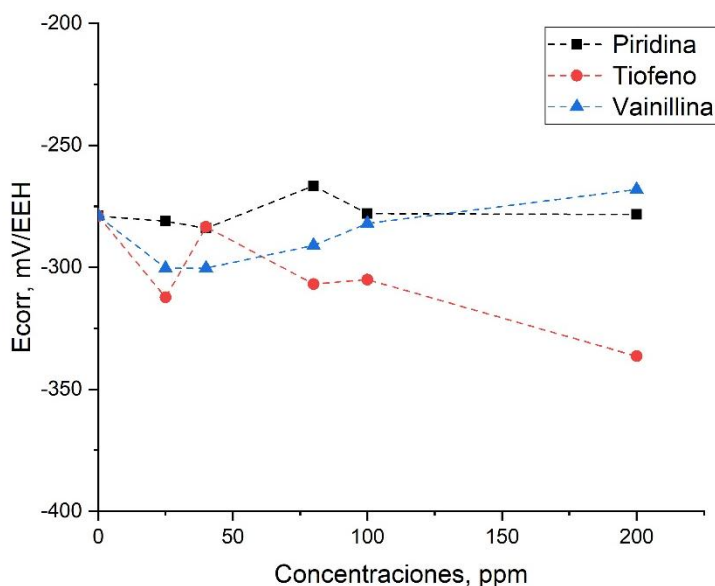
La Figura 5.7 se analizó la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) del acero AISI 1020 en HCl 1 M con bases de Schiff. Sin inhibidores,  $i_{corr}$  fue cercano a 1 A/m<sup>2</sup>. A 25 y 50 ppm, hubo una notable reducción, especialmente con Vainillina, que mostró alta eficiencia. A 75 ppm, Tiofeno mostró incremento en  $i_{corr}$ , sugiriendo saturación, mientras

que Piridina presentó un aumento progresivo en  $i_{corr}$ , indicando baja efectividad en altas dosis. Vainillina mantuvo bajo  $i_{corr}$ , siendo el inhibidor más eficiente en el medio ácido.

#### 5.4. Análisis y comparación de cálculos de Resistencias para las Tres Bases Schiff

A continuación, se analiza los cálculos obtenidos según las técnicas correspondientes para cada una de las bases Schiff.

**Figura 5.8. Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) para el acero al carbono inmerso en solución 1 M HCl en presencia y ausencia de bases Schiff a diferentes concentraciones.**



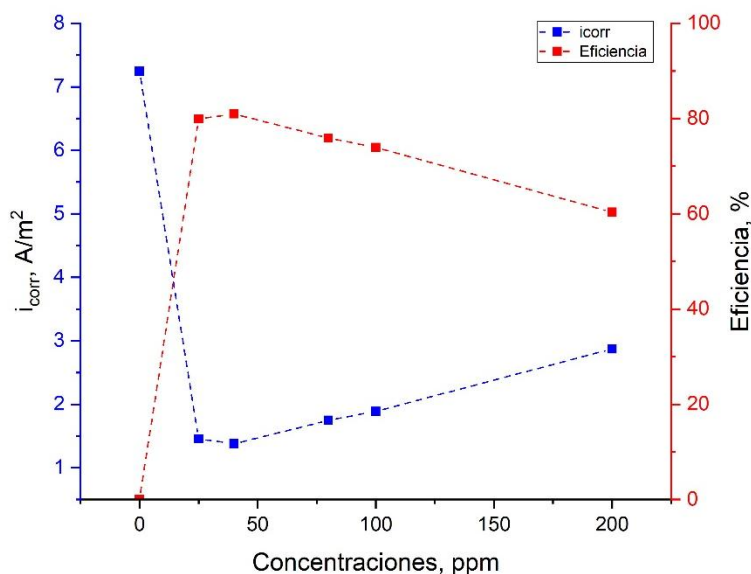
La Figura 5.8 muestra el análisis del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero AISI 1020 en solución HCl 1 M, evaluando la influencia de bases Schiff. Al haber una ausencia de inhibidores, se observa que  $E_{corr}$  se sitúa en torno a -300 mV/EEH, indicando alta reactividad. Al agregar bases Schiff, se observan diversos desplazamientos en  $E_{corr}$ .

Para la base de Piridina existe un desplazamiento moderado hacia -270 mV a 75 ppm, con función de inhibidor mixto, pero limitado en eficacia. La estabilidad del potencial a mayores concentraciones sugiere saturación en la superficie metálica. En el caso de Tiofeno el  $E_{corr}$  se desplaza a -360 mV a 200 ppm, indicando mayor actividad anódica y menor resistencia a la corrosión. Su efecto inhibitor es limitado y podría desestabilizar la película protectora. Finalmente, la Vainillina muestra un desplazamiento hacia -270 mV a 200 ppm,

evidencia mejora en la protección del metal como inhibidor catódico, tendiendo a formar una barrera protectora eficaz.

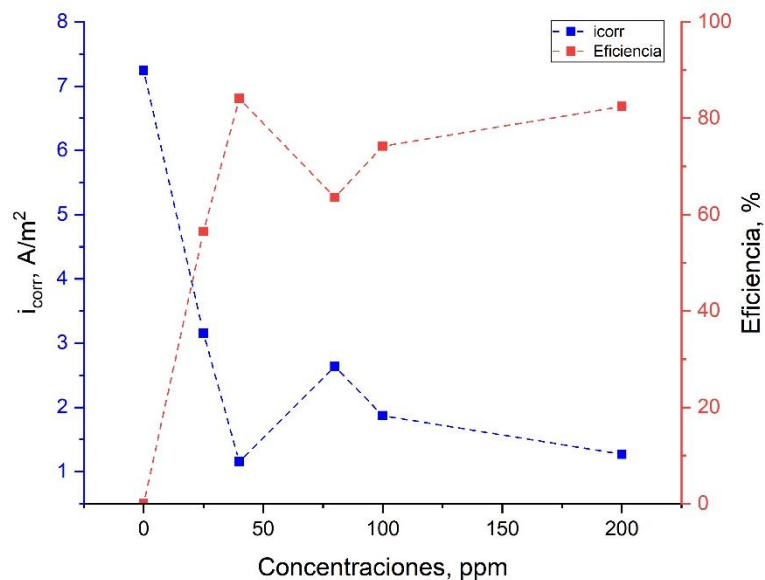
En conclusión, Vainillina es el inhibidor más efectivo, seguido por Piridina, mientras que Tiofeno muestra disminución en eficiencia a altas concentraciones, corroborando los resultados de corriente de corrosión.

**Figura 5.9. Eficiencia de inhibición de la velocidad de corrosión sobre la corrosión de acero al carbono inmerso en solución 1 M HCl en presencia y ausencia de base Schiff Piridina a diferentes concentraciones.**



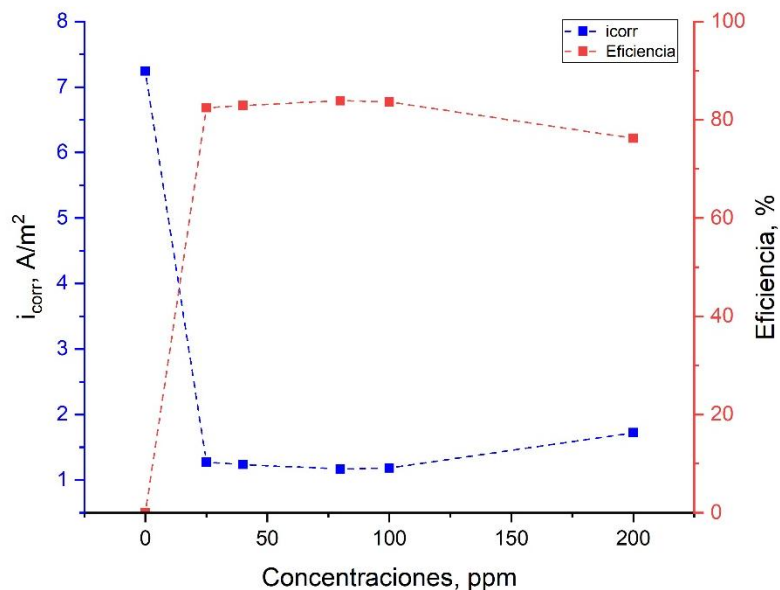
La Figura 5.9 muestra el análisis de la corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) del acero AISI 1020 en HCl 1 M revela un comportamiento significativo dependiendo de la concentración de la base Schiff Piridina. Sin inhibidor (0 ppm),  $i_{corr}$  alcanza 7,5  $A/m^2$ , evidenciando alta corrosión. A 25 ppm, se reduce a 1  $A/m^2$ , con una eficiencia de inhibición del 85 %, mostrando buena adsorción y protección. A 50 ppm, la eficiencia se mantiene alta, indicando una capa protectora efectiva. Sin embargo, al aumentar a 100 ppm,  $i_{corr}$  vuelve a aumentar y la eficiencia baja a 60 % a 200 ppm. Esto sugiere que un exceso de inhibidor puede generar desorden en la capa adsorbida, reduciendo su efectividad. Por lo tanto, es crucial controlar la concentración del inhibidor para optimizar la protección contra la corrosión.

**Figura 5.10. Eficiencia de inhibición de la velocidad de corrosión sobre la corrosión de acero al carbono inmerso en solución 1 M HCl en presencia y ausencia de base Schiff Tiofeno a diferentes concentraciones.**



La Figura 5.10 muestra la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) y la eficiencia de inhibición del acero AISI 1020 en HCl se evaluaron con el inhibidor basado en Tiofeno. Sin el inhibidor (0 ppm),  $i_{corr}$  supera 7 A/m<sup>2</sup>, indicando un entorno corrosivo. A 25 ppm,  $i_{corr}$  disminuye a aproximadamente 2 A/m<sup>2</sup>, logrando una eficiencia de inhibición del 70 %. Con 50 ppm, se registra un valor mínimo de  $i_{corr}$  (1 A/m<sup>2</sup>) y máxima eficiencia de más del 85 %, sugiriendo una buena capacidad de protección. Sin embargo, al llegar a 75 y 100 ppm,  $i_{corr}$  aumenta y la eficiencia cae por debajo del 70 %, lo que puede indicar desestabilización de la capa protectora. A 200 ppm, se recupera una eficiencia cercana al 85 %. Se concluye que el Tiofeno es efectivo como inhibidor, aunque su eficacia depende de la concentración utilizada, siendo más fiable en niveles específicos. Esto resalta la necesidad de ajustar la concentración para aplicaciones industriales efectivas.

**Figura 5.11. Eficiencia de inhibición de la velocidad de corrosión sobre la corrosión de acero al carbono inmerso en solución 1 M HCl en presencia y ausencia de base Schiff Vainillina a diferentes concentraciones.**



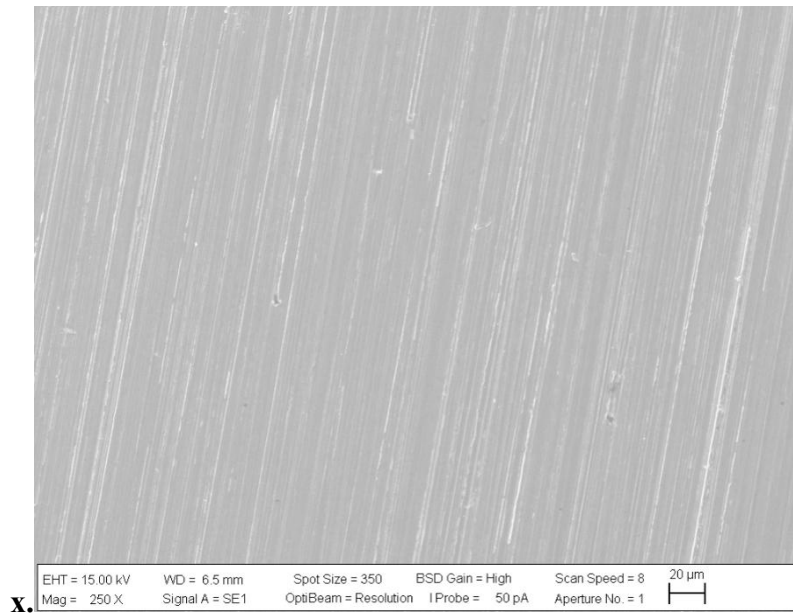
La Figura 5.11 muestra la eficiencia de inhibición de la corrosión del acero al carbono en HCl 1 M se evalúa con una base de Schiff derivada de vainillina. Sin inhibidor 0 ppm, la densidad de corriente ( $i_{corr}$ ) es alta (7,3 A/m<sup>2</sup>). Con solo 25 ppm del inhibidor,  $i_{corr}$  se reduce a 1,2 A/m<sup>2</sup>, logrando más del 80 % de eficiencia. A concentraciones de 100 ppm, la eficiencia se estabiliza cerca del 90 %. A niveles superiores (150 y 200 ppm), hay una ligera disminución en la eficacia, posiblemente por saturación o agregados del inhibidor. Estos resultados demuestran que la base de Schiff derivada de vainillina actúa como un inhibidor eficaz contra la corrosión del acero al carbono en medio ácido, siendo más efectiva a concentraciones moderadas (50–100 ppm).

### 5.5. Análisis morfológico

Para el análisis morfológico se realizó la toma de imágenes con el equipo SEM a cinco muestras, obteniendo dos imágenes de cada una correspondientes a imágenes con detector de electrones secundarios (SE), el cual nos entrega imágenes de relieve que son de fácil análisis, y a una magnitud de 100x, 200x, 500x, 1000x.

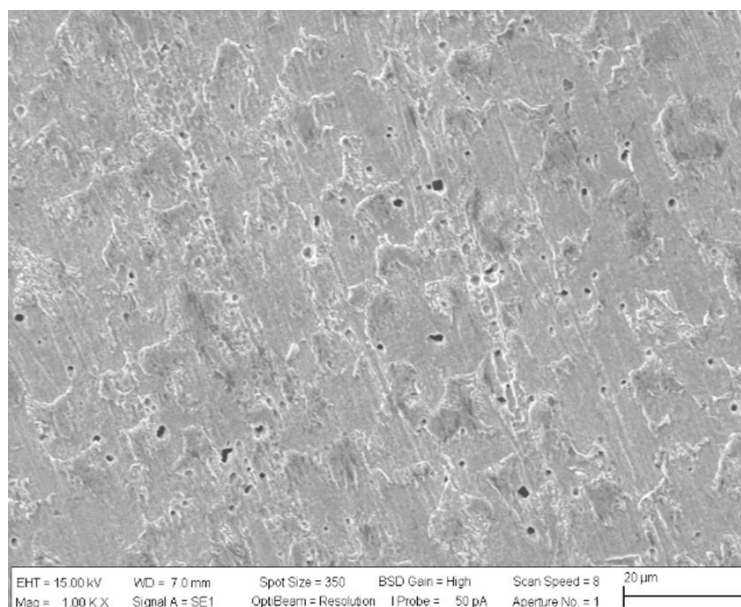
En la Figura 5.12 se puede apreciar la imagen correspondiente a un acero AISI 1020 recién pulido el cual no ha pasado por ningún tipo de fenómeno corrosivo y en el cual solo se puede observar la presencia de surcos a través del acero, los cuales corresponderían a marcas dejadas por la lija usada al pulirlo.

**Figura 5.12 Imágenes SEM de la pieza de acero AISI 1020 recién pulida sin ataque químico.**



La Figura 5.13 corresponde a un acero AISI 1020 luego de estar en presencia de una solución de HCl 1 M con 5% DMF y ausencia de inhibidor (0 ppm), en el cual se puede apreciar la presencia de corrosión en la superficie del acero caracterizada por la presencia de picaduras (puntos negros) y corrosión generalizada.

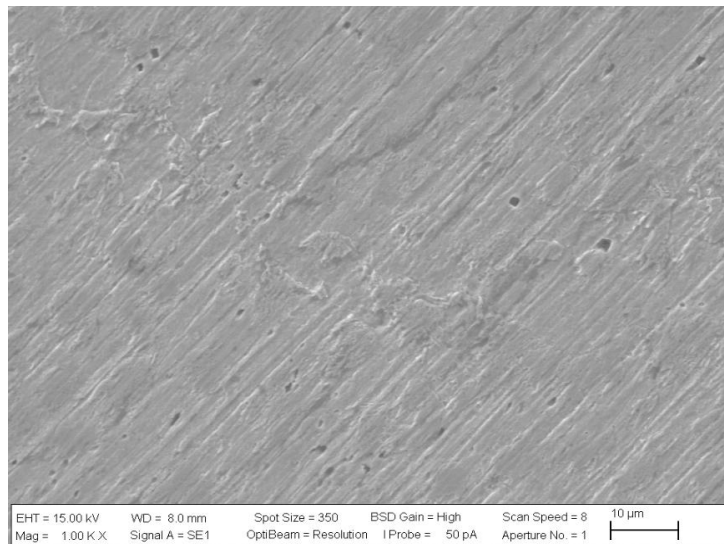
**Figura 5.13. Acero AISI 1020 luego de estar en presencia de una solución de HCl 1 M con 5% DMF y ausencia de inhibidor (0 ppm).**



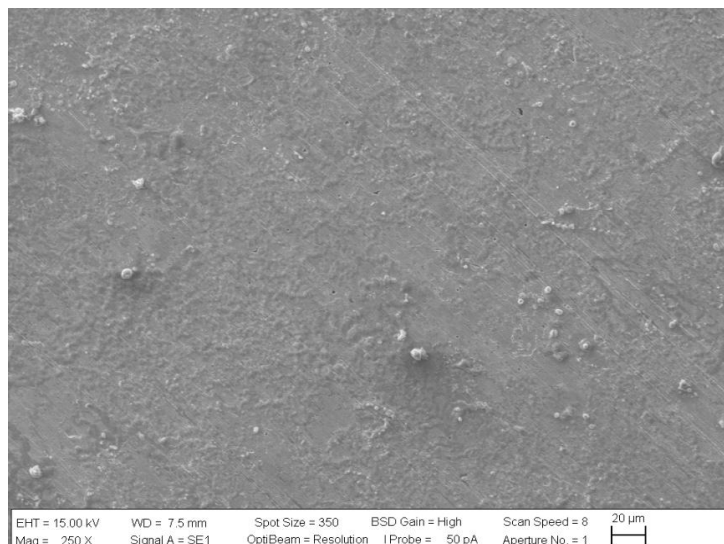
La Figura 5.14 muestra un acero AISI 1020 luego de estar en presencia de una solución con HCl 1 M con 5% DMF y en presencia de 80 ppm de la base Schiff Piridina. Se observa una buena cobertura superficial sin corrosión localizada severa, a la vez se puede observar que se conserva la estructura superficial original del metal, con un mínimo daño visible, siendo adecuado para aplicaciones donde se requiere una protección básica o moderada en ambientes ácidos, esto quiere decir que demuestra ser un inhibidor moderadamente eficiente para el acero AISI 1020 en un medio fuertemente ácido como HCl 1 M con DMF.

La Figura 5.15 muestra un acero AISI 1020 luego de estar en presencia de una solución con HCl 1 M con 5% DMF y en presencia de 80 ppm de la base Schiff Tiofeno. La película formada sobre la superficie del acero es parcialmente uniforme, con evidencia de protección significativa, aunque con pequeñas áreas donde podría haber una leve exposición al ataque corrosivo. La base Schiff con tiofeno a una concentración de 80 ppm mostró una efectiva acción inhibidora sobre la corrosión del acero AISI 1020 en medio ácido (HCl 1 M con 5% DMF).

**Figura 5.14. Imágenes SEM de la pieza de acero AISI 1020 luego de estar en presencia de una solución de 5% DMF HCl 1 M con 80 ppm de la base Schiff Piridina.**



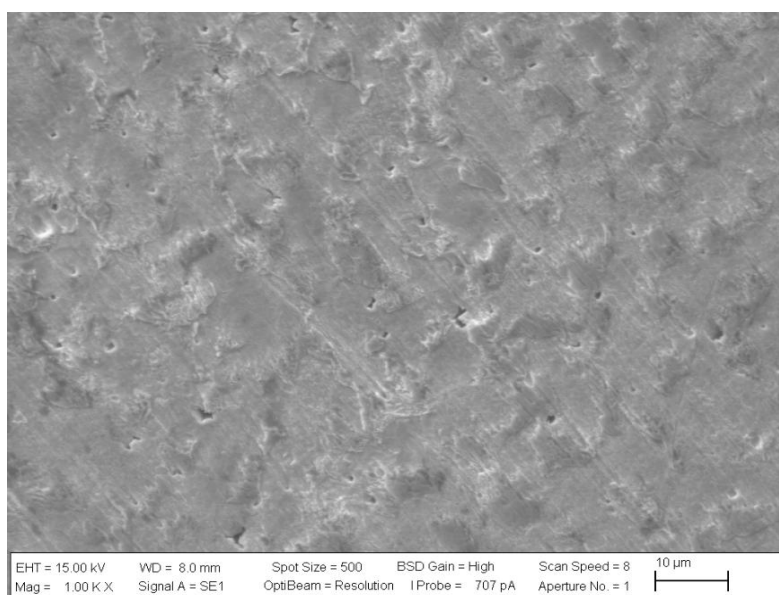
**Figura 5.15. Imágenes MEB de la pieza de acero AISI 1020 luego de estar en presencia de una solución de 5% DMF HCl 1 M con 80 ppm de la base Schiff Tiofeno.**



La figura 5.16 muestra un acero AISI 1020 luego de estar en presencia de una solución con HCl 1 M con 5% DMF y en presencia de 80 ppm de la base Schiff Vainillina. Se aprecia

una superficie relativamente lisa con algunas rugosidades y depresiones superficiales menores a la vez se puede observar que la acción corrosiva fue limitada, y la morfología metálica fue mayormente preservada. Se concluye que la base de Schiff con vainillina muestra una efectividad aceptable como inhibidor de corrosión, bajo las condiciones estudiadas.

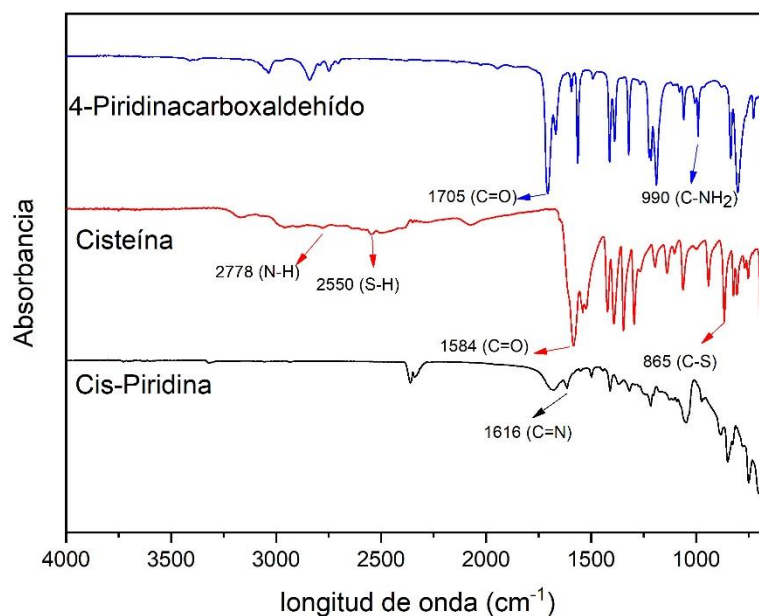
**Figura 5.16. Imágenes MEB de la pieza de acero AISI 1020 luego de estar en presencia de una solución de 5% DMF HCl 1 M con 80 ppm de la base Schiff Vainillina.**



## 5.6. Análisis FTIR

En este análisis se obtuvieron espectros FTIR de las tres bases Schiff, los cuales pueden observar en las siguientes imágenes y cuyas posiciones de sus bandas de absorción más importantes se encuentran identificadas y discutidas. La Figura 5.17 muestra espectros de FTIR para tres compuestos 4-piridinacarboxaldehído, cisteína y cis-piridina, con el objetivo de caracterizar y comparar los grupos funcionales presentes, lo cual es común al analizar la formación de una base de Schiff.

**Figura 5.17. Espectros del FTIR correspondiente a la base Schiff Piridina analizadas con corrección de línea base.**



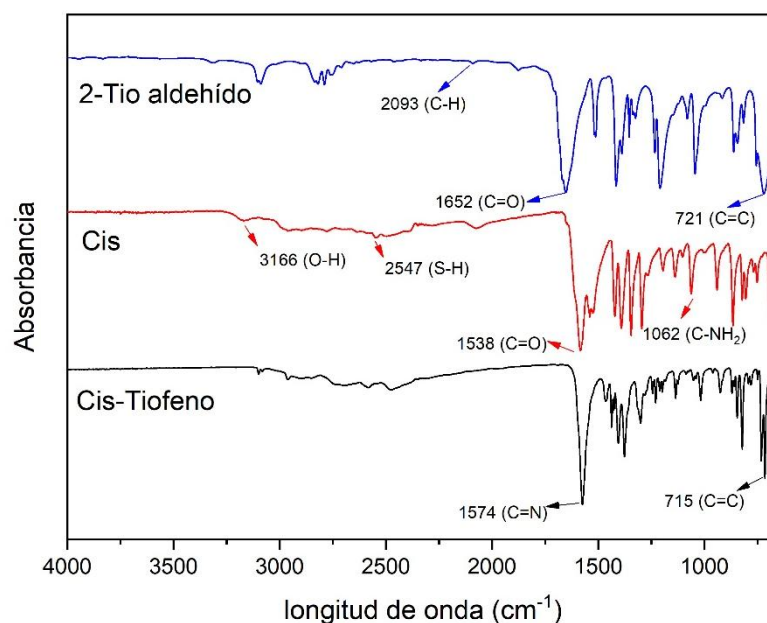
Como se puede indicar en la figura se observa la línea azul destacada los grupos funcionales a  $1705 \text{ cm}^{-1}$  (C=O) que indica la banda característica del grupo carbonilo del aldehído,  $990 \text{ cm}^{-1}$  (C-NH<sub>2</sub>) que indica la vibración relacionada con el grupo amino o una combinación con vibraciones del anillo. La línea en rojo destaca los grupos funcionales  $2778 \text{ cm}^{-1}$  (N-H) que indica vibración de estiramiento del grupo amino,  $2550 \text{ cm}^{-1}$  (S-H) banda débil del grupo tiol, típica de la cisteína,  $1705 \text{ cm}^{-1}$  (C=O) que indica vibración del grupo carbonilo (posiblemente del grupo carboxilo) y  $865 \text{ cm}^{-1}$  (C-S) indica vibración de enlace carbono-azufre. La línea en negro destaca los grupos funcionales  $1584 \text{ cm}^{-1}$  (C=O) indica posible presencia residual del carbonilo o alteración del estiramiento al formar el doble enlace imina,  $1616 \text{ cm}^{-1}$  (C=N) indica banda típica del grupo imina (base de Schiff), evidencia clara de la formación del producto y se puede ver la desaparición de bandas  $\sim 2550 \text{ cm}^{-1}$  y  $\sim 2778 \text{ cm}^{-1}$  indica que los grupos S-H y N-H han reaccionado, probablemente con el aldehído.

El espectro de cis-piridina (producto final) muestra características distintas con respecto a sus precursores (cisteína y 4-piridinacetaldehído), especialmente por la aparición de la banda a  $1616 \text{ cm}^{-1}$  (C=N), confirmando la formación de una base de Schiff

(una imina). La desaparición o disminución de las bandas asociadas al grupo amino y al grupo tiol también respalda la formación del nuevo enlace.

La Figura 5.18 muestra los espectros de FTIR de tres compuestos: 2-Tio Aldehído, Cisteína y Cis-Tiofeno (producto final), con la intención de estudiar la formación de una base de Schiff con un derivado de tiofeno. La figura indica el espectro azul las siguientes bandas en  $2093\text{ cm}^{-1}$  (C–H): vibración de estiramiento de enlaces C–H,  $1652\text{ cm}^{-1}$  (C=O): banda característica del grupo carbonilo (aldehído) y  $721\text{ cm}^{-1}$  (C=C): vibraciones del anillo aromático posiblemente del tiofeno.

**Figura 5.18. Espectros del FTIR correspondiente a la base Schiff Tiofeno analizadas con corrección de línea base.**



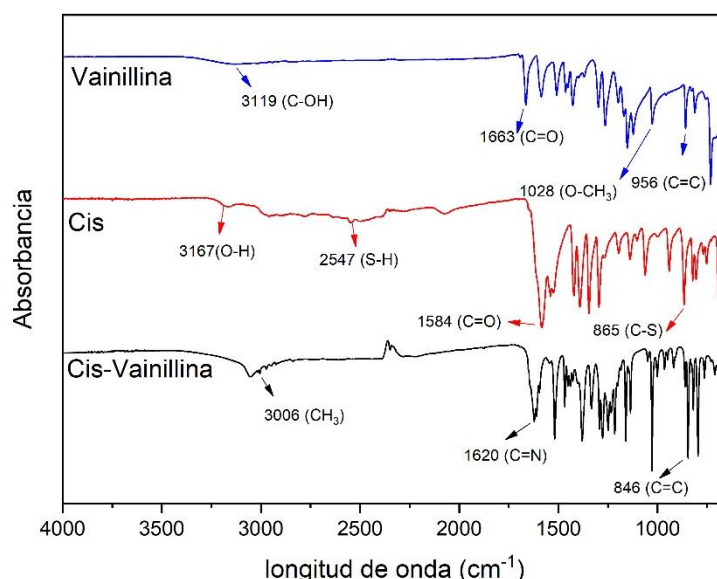
El espectro rojo tiene la siguiente banda a  $3166\text{ cm}^{-1}$  (O–H): vibración de grupo hidroxilo, probablemente por hidratación o interacción con el medio,  $2547\text{ cm}^{-1}$  (S–H): grupo tiol presente (S–H), típico en moléculas con azufre como la cisteína,  $1538\text{ cm}^{-1}$  (C=O): el grupo carbonilo sigue presente, aunque con un desplazamiento, indicando interacción parcial y  $1062\text{ cm}^{-1}$  (C–NH<sub>2</sub>): vibraciones del grupo amino, señalando la presencia de un grupo nucleofílico antes de la condensación. El Espectro negro tienen las siguientes bandas  $1574\text{ cm}^{-1}$  (C=N): vibración característica del grupo imina, confirmando

la formación de la base de Schiff,  $715\text{ cm}^{-1}$  (C=C): vibración aromática del anillo de tiofeno, permanece después de la reacción y finalmente desaparece la señal de S-H y N-H, confirmando la condensación entre el aldehído y el grupo amino.

Se puede concluir el espectro final del Cis-Tiofeno presenta la banda clave a  $1574\text{ cm}^{-1}$  (C=N), característica de una base de Schiff, lo que indica que la reacción entre el aldehído y el grupo amino ha tenido éxito. Además, la desaparición de las señales de S-H y C=O originales también apoya la formación del nuevo compuesto. La presencia de bandas C=C alrededor de  $715\text{ cm}^{-1}$  muestra que el anillo aromático del tiofeno se conserva durante la reacción.

La Figura 5.19 muestra este espectro FTIR proporciona los grupos funcionales presentes en la molécula de Cis-Vainillina, confirmando la formación de la base Schiff y su potencial como inhibidor de corrosión. Podemos observar la formación de la base Schiff (confirmación de grupo imina C=N) y se encuentra en el pico  $1620\text{ cm}^{-1}$  (C=N). Esta banda es clave para confirmar la formación de la base Schiff, resultado de la condensación entre un grupo amino y el grupo carbonilo de la vainillina.

**Figura 5.19. Espectros del FTIR correspondiente a la base Schiff Vainillina analizadas con corrección de línea base.**



Se puede observar la desaparición de del grupo carbonilo (C=O) en la vainillina, se observa en  $1663\text{ cm}^{-1}$ , pero está ausente en Cis-Vainillina, lo que indica que el grupo aldehído reaccionó completamente, otra banda es O-H que esta desplazada es la vainillina muestra una banda O-H ( $3119\text{ cm}^{-1}$ ), pero en la base Schiff ya no aparece, lo que puede indicar participación en enlaces de hidrógeno o reacciones adicionales. Otra presencia de otros grupos funcionales se encuentra en  $3006\text{ cm}^{-1}$  – CH<sub>3</sub> (alquilo metilo) que está asociado a los grupos metilo de la vainillina y  $846\text{ cm}^{-1}$  – C=C (anillo aromático) es la conservación del sistema aromático, importante para la conjugación electrónica y la adsorción sobre metales.

La Tabla 5.3 muestra un resumen de los principales picos para cada compuesto, así como sus bandas.

**Tabla 5.3. Picos correspondientes a los espectros de FTIR de las tres bases Schiff.**

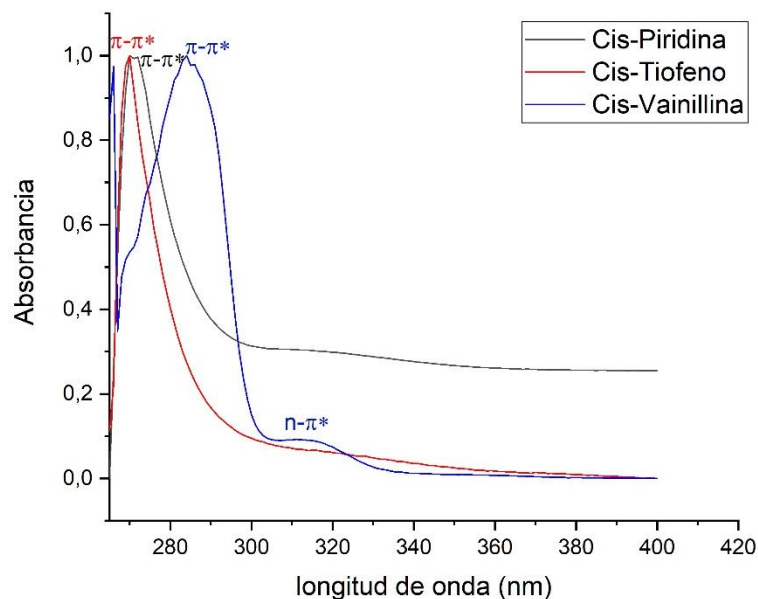
Compuesto	C=C	C=N	C=O
Cis-Piridina	-	<b>1616</b>	<b>170515</b> <b>84</b>
Cis-Tiofeno	<b>715</b>	<b>1574</b>	<b>1652</b> <b>1538</b>
Cis-Vainillina	<b>846</b>	<b>1620</b>	<b>1584</b> <b>1663</b>

### 5.7. Análisis UV-Vis

El análisis UV-Vis realizado a las tres bases Schiff entrego tres diferentes espectros de absorción, los cuales se pueden observar en la Figura 5.20 y cuyos picos están detallados en la Tabla 5.4. La Figura 5.20. (a) muestra las transiciones presentes en cada base Schiff, los compuestos orgánicos son  $\pi \rightarrow \pi^*$  y  $n \rightarrow \pi^*$ . El espectro de absorción de la base Schiff Cis-Piridina muestra una sola banda de absorción que aparece a una longitud de onda 271 nm correspondiente a transiciones  $\pi \rightarrow \pi^*$ . El espectro de absorción de la base Schiff Cis-Tiofeno muestra una sola banda de absorción que aparece a una longitud de onda 270 nm correspondiente a transiciones  $\pi \rightarrow \pi^*$ , atribuido al sistema conjugado del anillo tiofeno al doble enlace C=N de las bases Schiff. El espectro de absorción de la base Schiff Cis-

Vainillina muestra dos bandas de absorción que aparecen a 285, 315 nm, la primera banda se encuentra en 285 nm correspondiente a transiciones  $\pi \rightarrow \pi^*$  del grupo aromático C=N, que al tener mayor cantidad de anillos aromáticos presenta una mayor intensidad, la otra banda secundaria alrededor de 315 nm correspondiente a transiciones  $n \rightarrow \pi^*$ , que es típico por el grupo carbonilo (C=O) y grupos -OH en estructuras aromáticas sustituidas.

**Figura 5.20. Comparación de los espectros de UV-Visible realizado a las tres bases Schiff. (a) transiciones presentes en cada base Schiff.**

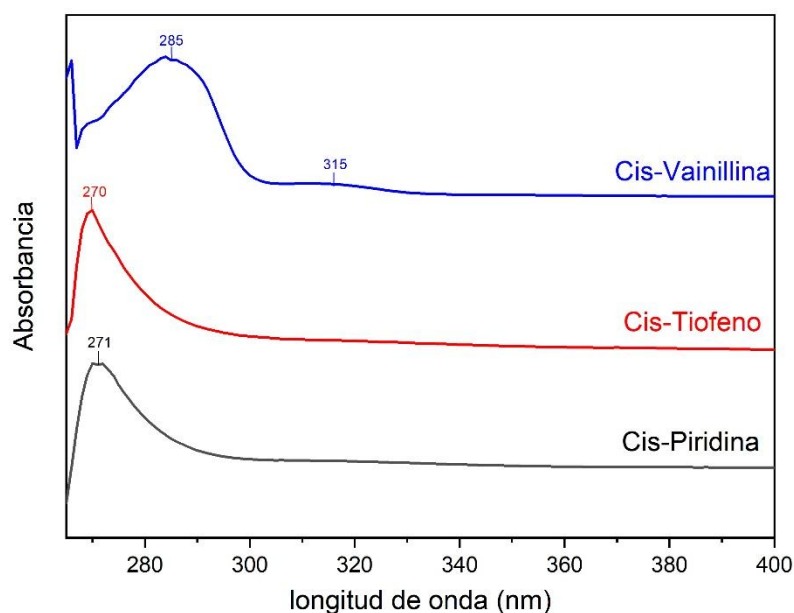


La comparación de los espectros UV-Visible permite identificar las características electrónicas de cada base Schiff. La base Cis-Vainillina muestra mayor conjugación una mayor absorbancia y bandas más claras, lo que podría estar relacionado con mayor estabilidad, esto puede influir en su comportamiento como inhibidor de corrosión en acero.

La Figura 5.20 muestra los espectros de absorción en el rango de 250 a 400 nm. A continuación, podemos obtener el compuesto de Cis-Piridina donde la banda de adsorción principal se encuentra en  $\lambda_{\text{máx}}$  271 nm esta banda se asocia a una transición electrónica  $\pi \rightarrow \pi^*$ , que es singular en las estructuras aromáticas como la piridina. El compuesto Cis-Tiofeno tiene su banda de adsorción principal en  $\lambda_{\text{máx}}$  270 nm es similar a la piridina, corresponde a una transición  $\pi \rightarrow \pi^*$  en el sistema aromático del anillo de tiofeno. El compuesto Cis-Vainillina tiene su banda de adsorción principal en  $\lambda_{\text{máx}}$  285 nm ( $\pi \rightarrow \pi^*$ ),

asociada al sistema conjugado aromático + grupos funcionales ( $-OH$  y  $-CHO$ ), otra banda de adsorción es la banda secundaria  $\lambda_{m\acute{a}x}$  315 nm atribuida a una transición  $n \rightarrow \pi^*$ , típica de grupos carbonilo ( $C=O$ ). Esta banda está ausente o es muy débil en los otros dos compuestos.

**Figura 5.21. Comparación de los espectros de UV-Visible realizado a las tres bases Schiff. (b) bandas de absorción de cada base Schiff.**



Las bandas de absorción en el UV-Visible indican cómo las bases Schiff pueden absorber energía, lo que está relacionado con su capacidad de formar complejos con iones metálicos y adsorberse sobre superficies metálicas. En este contexto: Cis-Vainillina, con mayor conjugación y presencia de bandas  $n \rightarrow \pi^*$ , tiene un mayor potencial de interacción química con superficies de acero, posiblemente formando capas protectoras más estables contra la corrosión; Cis-Tiofeno y Cis-Piridina muestran bandas similares ( $\pi \rightarrow \pi^*$ ), pero su capacidad de interacción puede ser menor en comparación con la Vainillina debido a su menor complejidad estructural electrónica.

**Tabla 5.4. Picos de los espectros UV-Visible de las tres bases Schiff analizadas.**

Compuesto	$\lambda_{\text{m\acute{a}x}}$ (nm)	Asignaciones de banda
Cis-Piridina	<b>271</b>	$\pi \rightarrow \pi^*$
Cis-tiofeno	<b>270</b>	$\pi \rightarrow \pi^*$
Cis-Vainillina	<b>285</b> <b>315</b>	$\pi \rightarrow \pi^*$ $n \rightarrow \pi^*$

## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

El estudio realizado permitió evaluar la eficiencia de tres bases de Schiff derivadas del aminoácido cisteína Cis-Piridina, Cis-Tiofeno y Cis-Vainillina como inhibidores de corrosión del acero al carbono AISI 1020 en un medio altamente agresivo como es la solución de HCl 1 M. A través del uso de técnicas electroquímicas (EIS y VBL), espectroscópicas (FTIR y UV-Vis) y análisis morfológico mediante MEB, se demostró que estos compuestos orgánicos son capaces de reducir significativamente la tasa de corrosión al formar una película protectora sobre la superficie metálica.

Los resultados evidenciaron que la eficiencia inhibidora depende tanto del tipo de base Schiff como de su concentración. Cis-Vainillina mostró una eficiencia máxima del 88 % a 100 ppm, manteniendo un comportamiento estable incluso a 200 ppm. Cis-Piridina alcanzó una eficiencia de hasta 85 % a 25 ppm, pero su efectividad decayó a 60 % a 200 ppm, indicando un efecto de sobresaturación. Por su parte, Cis-Tiofeno alcanzó una eficiencia máxima del 85 % a 50 ppm, pero presentó inestabilidad en concentraciones mayores, donde la eficiencia disminuyó por debajo del 70 %. Estas diferencias reflejan que, si bien los tres compuestos son efectivos, su rendimiento depende del equilibrio entre concentración óptima y capacidad de adsorción sobre la superficie del acero.

Además, la caracterización espectroscópica confirmó la correcta formación y estabilidad estructural de las bases de Schiff, mientras que las imágenes obtenidas mediante MEB evidenciaron una significativa disminución del daño superficial en presencia de los inhibidores, comparado con el acero sin protección.

En conclusión, las bases de Schiff basadas en cisteína representan una alternativa prometedora y sostenible para la protección contra la corrosión de aceros al carbono en ambientes ácidos. Su efectividad, especialmente en el caso de la Cis-Vainillina, sugiere una aplicación viable en sectores industriales como la metalurgia, minería y tratamiento de aguas, contribuyendo al desarrollo de tecnologías más limpias, eficientes y de menor impacto ambiental.

## REFERENCIAS

- Academia lab. (2024). Piridina.
- Ahmed A. Alamiery. (2024). Schiff Bases as Corrosion Inhibitors: A Mini-Review. *Journal of Materials and Engineering*, Vol.2.
- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017). *La Ciencia E Ingenieria De Materiales 7th*. In *Ciencia e ingeniería de los materiales*.
- Cortes, M. (2024). Propiedades de inhibición a la corrosión del acero API-X60 de líquidos iónicos derivados de amonio en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M. Benemérita Universidad autónoma de Puebla .
- Dias, H. P., Barros, E. V., Sad, C. M. S., Yapuchura, E. R., Gomes, A. O., Moura, R., Pinto, F. E., Domingos, D. V., Aquije, G. M. F. V., Lacerda, V., & Romão, W. (2018). Study of the corrosive behavior of the AISI 1020 steel in acid crude oil by microscopic techniques (LM, AFM and SEM/EDX) and Raman spectroscopy. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 29(8). <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20180043>
- Figuroa, P. (2023). Estudio de la Velocidad de Corrosión del Acero Austenítico AISI-317L Expuesto a un Sistema Ácido. Universidad de Santander.
- Hefei Home Sunshine Pharmaceutical Technology Co., Ltd. (2013). API e intermedios.
- Igesur soluciones técnicas S.L. (n.d.). Guía completa sobre inhibidores de corrosión. Retrieved April 6, 2025, from <https://www.igesur.com/blog/que-son-los-inhibidores-de-corrosion/#:~:text=Los%20inhibidores%20de%20corrosi%C3%B3n%20son%20sustancias%20que%20utilizadas%20para%20proteger,metal%20y%20el%20ambiente%20corrosivo.>
- Kuratani, K., Fukami, K., Tsuchiya, H., Usui, H., Chiku, M., & Yamazaki, S. I. (2022). Electrochemical Polarization Part 1: Fundamentals and Corrosion†. *Electrochemistry*, 90(10). <https://doi.org/10.5796/electrochemistry.22-66085>
- Noguez, Ma. E., & Gonzalez, G. (2006). *Principios de Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis por Rayos X Característicos*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pedferri, P. (2018). Corrosion Science and Engineering. In *Engineering Materials*.

- Perrusquia, A. (2025). ¿Qué es la microscopía electrónica de barrido? ¿Cómo Funciona Un Microscopio Electrónico de Barrido?
- Raczuk, E., Dmochowska, B., Samaszko-Fiertek, J., & Madaj, J. (2022). Different Schiff Bases—Structure, Importance and Classification. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/molecules27030787>
- Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering: Fourth Edition. In *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering: Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1002/9780470277270>
- Rey, S. (2008). Evaluación de la corrosión de un acero AISI SAE 1020 en un flujo multifásico salmuera-aceite mineral-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S, por medio de un simulador de flujo. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER .
- Ruíz Loyola, B., & Gutiérrez Franco, M. P. (2018). Evolución de la espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier. *Educación Química*, 3(4). <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.1992.4.66858>
- Sastri, V. S. (2011). Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice. In *Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice*. <https://doi.org/10.1002/9781118015438>
- Smith, W. T. (1971). Practical pharmaceutical chemistry. Second Edition- Part 2 (Beckett, A.H.; Stenlake, J.B.). *Journal of Chemical Education*, 48(2). <https://doi.org/10.1021/ed048pa126.1>
- Soliz, A., & Cáceres, L. (2015). Corrosion of a Carbon Steel Cylindrical Band Exposed to a Concentrated NaCl Solution Flowing through an Annular Flow Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(8). <https://doi.org/10.1149/2.0201508jes>
- Suarez, J. (2018). Evaluación de inhibidores de corrosión aplicados en la industria mediante pruebas electroquímicas. Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia .
- Ugaz Lock, A., & Díaz Tang, I. (1988). Principios de las técnicas electroquímicas en estudios de procesos de corrosión. *Revista de Química*, 2(1).
- Valbon, A., Xavier, N. F., Carlos, M. F. L. P., Bauerfeldt, G. F., Almeida-Neto, F. W. Q., de Lima-Neto, P., Neves, M. A., Rodrigues-Santos, C. E., & Echevarria, A. (2023). The Corrosion Inhibition Performance of Eco-Friendly bis-Schiff Bases on Carbon

Steel in a Hydrochloric Solution. Surfaces, 6(4).  
<https://doi.org/10.3390/surfaces6040034>