



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería Química

Colegio de Ingeniería en Materiales

**“Análisis de la Corrosión del Acero API 5L X52 en
Medios Ácidos: Efecto del Líquido Iónico 1-butil-3-
metilimidazolio dicianamida”**

TESIS

Que para obtener el Título de:

Licenciada en Ingeniería en Materiales

Presenta:

Celina Vianey Alducin Monterrosas

Director de Tesis:

Dr. Octavio Olivares Xometl

Asesor de Tesis:

Dra. Maribel Castillo Morales

H. Puebla de Zaragoza, noviembre 2025.





BUAP

Oficio No. FIQ/AC/189/2025
Asunto: Registro de Tema de Tesis.

C. CELINA VIANEY ALDUCIN MONTERROSAS
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA EN MATERIALES
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería en Materiales cuyo título es el siguiente:

“Análisis de la Corrosión del Acero API 5L X52 en Medios Ácidos: Efecto del Líquido Iónico 1-butil-3-metilimidazolio dicianamida”

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Director de Tesis: Dr. Octavio Olivares Xometl
Co-Directora de Tesis: Dra. Maribel Castillo Morales.

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **UNICAMENTE POR UN AÑO**

Atentamente
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., a 22 de Octubre de 2025

Dr. Rubén Jonatan Aranda García
Secretario Académico



C.c.p. Director de Tesis: Dr. Octavio Olivares Xometl
C.c.p. Co-Directora de Tesis: Dra. Maribel Castillo Morales
C.c.p. Archivo.

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C. P. 72590
(222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251



BUAP

Oficio No. FIQ/DI/724/2025

Asunto: Modalidad de Titulación por Examen Profesional por Tesis

Mtro. Juan Manuel Rosas Tapia
Director de Administración Escolar de la BUAP
Presente:

At'n: Psic. Marcela Juárez Zenteno
Jefa del Departamento de Titulación

Por este medio, me permito hacer de su conocimiento que la alumna:

Nombre completo de la alumna:
Matrícula:
Sustentante de la Carrera en:
Fecha de Examen Profesional:

Celina Vianey Alducin Monterrosas
201959705
Ingeniería en Materiales
Jueves 27 de noviembre 2025 9:00 horas Presencial.

JURADO:

NOMBRE	CARGO
Dra. Janette Arriola Morales	Presidente
Dr. Daniel Cruz González	Secretario
Dr. Octavio Olivares Xometl	Vocal

NOTA: ESTE DOCUMENTO TIENE VIGENCIA POR 6 MESES A PARTIR DE LA FECHA DE SU EXPEDICIÓN.

Sin otro particular, le reitero las seguridades de mi ~~lealtad~~ y distinguida consideración.

Atentamente

"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"

H. Puebla de Z., a 28 de octubre de 2025


M.I.C. Ma. Gpe. Tita Vázquez Espinosa de los Monterrosas
Directora



C.c.p. Archivo.

DEDICATORIA

A mi familia, por ser los cimientos que forjaron mi esfuerzo y mi futuro. Este logro es la prueba de que, cuando la unión y el amor prevalecen, ningún proyecto es imposible.

Mi profundo amor a mi madre, **Celia Monterrosas**, pilar y mayor inspiración de mi vida. Su amor incondicional, su paciencia y su ejemplo de valentía y resiliencia me enseñaron el valor de la constancia, haciendo posible la consecución de este sueño profesional. Mi gratitud hacia su apoyo es infinita.

A mi querida hermana y amiga, **Alma Lisette**, a quien dedico este trabajo con profundo amor. Sin tu apoyo constante, tus palabras de aliento y tu sacrificio, este proyecto habría sido imposible. Tu compromiso, inteligencia y perseverancia son mi mayor inspiración.

Dedico este logro a **Jenifer Marlene**, hermana y amiga. Agradezco la alegría de tus risas y la solidez de tu apoyo en cada triunfo y desafío. Eres un ejemplo de resiliencia y amor puro que me enseñó a disfrutar cada etapa de este camino.

A **Eliseo Romeo**, mi hermano y compañero inigualable. Tu pequeño gran corazón y tu amor que trasciende la edad me brindaron un apoyo incondicional. Admiro tu fortaleza, tu valentía y esa hermosa disposición a encarar lo nuevo. Por ser fuente de tantas risas y buenos recuerdos, este trabajo es tuyo.

A mis amados gatos, **Freddy** y **Lari**, que son mi familia. A Freddy, por la compañía silenciosa y reconfortante que iluminó mis días más tristes. Y a Lari, cuyas travesuras y energía me mantuvieron conectada con la alegría, recordándome la importancia de reír. Gracias por ser mi soporte emocional.

A **Yolita**, gracias por estar siempre cuidando y apoyando, por ser un pilar fundamental en mi vida, amiga, confidente y cómplice de mil recuerdos. Tu presencia es una bendición y tus consejos sinceros son invaluable. El cariño no cambia, eres familia.

Y con el corazón, a **María Fernanda**, mi pequeña gran amiga. Este camino estuvo lleno del deseo de dejarte una huella positiva, de mostrarte que, con esfuerzo, los sueños se alcanzan. Gracias por inspirarme con tu alegría y por recordarme cada día lo que realmente importa; tú eres la prueba de que el amor es el motor de todo logro.

AGRADECIMIENTOS

Mi primer y más profundo agradecimiento, con respeto y cariño, es para la **Benemérita Universidad Autónoma de Puebla** (BUAP), mi casa de estudios, por abrirme sus puertas y brindarme la invaluable oportunidad de crecer profesionalmente. Mi gratitud se extiende a la **Facultad de Ingeniería Química** (FIQ), que me acogió y me retó académicamente, y de manera especial, al **Colegio de Ingeniería en Materiales**, por la calidad humana y profesional de sus docentes.

Mi más sincera gratitud al **Dr. Octavio Olivares Xometl**, mi asesor de tesis. Agradezco profundamente su confianza al recibirme en su equipo y su apoyo incondicional. Valoro enormemente el rigor de sus exigencias y el compromiso que me impulsaron a superar los desafíos, logrando mi mayor crecimiento profesional durante este proyecto. De igual modo, extiendo mi agradecimiento a la **Dra. Maribel Castillo Morales**, coasesora de este trabajo, por su seguimiento continuo y por sus atinados comentarios que fueron clave para la mejora final.

Agradezco también a la **Dra. Janette Arriola Morales** y al **Dr. Daniel Cruz** por compartir su experiencia y sus críticas constructivas, fundamentales para enriquecer esta investigación.

Un reconocimiento especial a la **Dra. Natalya Victorovna Likhanova** por su generosa contribución con el líquido iónico que fue el objeto de estudio de esta tesis.

A mis compañeros de laboratorio, **Daniel y Arleth**, gracias por el apoyo mutuo en la ejecución del proyecto. Por compartir tantas horas y por hacer del laboratorio un espacio ameno.

Finalmente, mi más sentido agradecimiento a mi círculo íntimo, mi familia elegida.

A mi amiga **Marichel**, por ser ese abrazo al alma, mi cómplice en los momentos más dulces y amargos. Has escuchado mis silencios, entendido mis miedos y jamás me permitiste dudar de mí. Gracias por no soltarme nunca; eres mi familia elegida.

A **Valeria Minelli**, por ser una amiga incondicional, agradezco tu amistad y acompañamiento. Cada plática, cada risa y tus gestos amables en los días difíciles fueron mi sostén.

A mi amigo **Erick**, por ser un apoyo incondicional, agradezco especialmente tu ayuda en las asignaturas más desafiantes y el conocimiento compartido. Tu amistad, forjada en el rigor académico, fue un soporte emocional constante; gracias por esas pláticas y risas que siempre hicieron más ameno el camino.

ÍNDICE

Resumen.....	1
Introducción	2
Objetivos	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
Hipótesis	3
Capítulo I. Antecedentes	4
1.1 Corrosión	4
1.2 Corrosión Dulce.....	4
1.3 Corrosión Amarga.....	5
1.4 Medio corrosivo HCl.....	5
1.5 Medio corrosivo H ₂ SO ₄	7
1.6 Acero API 5L X52	8
1.7 Técnicas de análisis de corrosión.....	9
1.7.1 Polarización potenciodinámica (PDP).....	9
1.7.2 Espectroscopía de Impedancia electroquímica (EIS)	11
1.8 Inhibidores de corrosión	13
1.9 Líquidos iónicos.....	16
Capitulo II. Desarrollo experimental	22
2.1 Preparación de la muestra.....	22
2.2 Preparación del medio ácido e inhibidores de corrosión	22
2.3 Pruebas electroquímicas	23
Capitulo III. Resultados y discusión	24
3.1 Consideración del Líquido iónico.....	24
3.2 Prueba PDP	25
3.3 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).....	29
3.4 Isotermas de Adsorción.....	36
3.5 Mecanismo de inhibición.....	39
3.5.1 Mecanismo de inhibición del acero API 5L X52 en H ₂ SO ₄ en presencia y ausencia de IC	39
3.5.2 Mecanismo de inhibición del acero API 5L X52 en HCl en presencia y ausencia de IC	42

Conclusiones	44
Bibliografía	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de Tafel que corresponde a la curva Log(i) vs E.	10
Figura 2. Diagrama de Nyquist.....	12
Figura 3. Diagrama de Bode	12
Figura 4. Diagrama de circuito eléctrico equivalente para un circuito RC en paralelo	13
Figura 5. Electrodo de trabajo.....	22
Figura 6. Estructura química del 1-butil-3-metilimidazolio dicianamida [BMIM]N(CN) ₂	23
Figura 7. Curvas potenciodinámicas del acero API 5L X52 a diferentes concentraciones de LI en medio ácido H ₂ SO ₄	27
Figura 8. Curvas potenciodinámicas del acero API 5L X52 a diferentes concentraciones de LI en medio ácido HCl.....	27
Figura 9. EI de curvas de polarización potenciodinámica	29
Figura 10. Curva de Impedancia de Nyquist obtenido del acero API 5L X52 en H ₂ SO ₄ 1M en diferentes concentraciones de LI [BMIM]N(CN) ₂	30
Figura 11. Diagrama de Bode obtenido del acero API 5L X52 en H ₂ SO ₄ 1M en diferentes concentraciones de LI [BMIM]N(CN) ₂	31
Figura 12. Curva de Impedancia de Nyquist obtenido del acero API 5L X52 en HCl 1M en diferentes concentraciones de LI [BMIM]N(CN) ₂	31
Figura 13. Diagrama de Bode obtenido del acero API 5L X52 en HCl 1M en diferentes concentraciones de LI [BMIM]N(CN) ₂	32
Figura 14. Circuito Eléctrico Equivalente de Randles modificado y aplicado al acero API 5L X52.....	33
Figura 15. EI de Espectroscopia de Impedancia electroquímica	35
Figura 16. Proceso de adsorción en una superficie metálica	36
Figura 17. Isoterma de Langmuir en HCl	37
Figura 18. Isoterma de Langmuir en H ₂ SO ₄	38
Figura 19. Mecanismo de inhibición de los sitios anódicos en el acero API 5L X52 expuesto a H ₂ SO ₄ 1M en ausencia y presencia de IC	41

Figura 20. Mecanismo de inhibición de los sitios catódicos en el acero API X52 expuesto a H ₂ SO ₄ y HCl en ausencia y presencia de IC	42
Figura 21. Mecanismo de inhibición de los sitios anódicos en el acero API 5L X52 expuesto a HCl 1M en ausencia y presencia de IC	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Inhibidores de corrosión (IC)	15
Tabla 2. Inhibidores derivados de imidazolio	19
Tabla 3. LIs derivados de imidazolio con una diversidad de configuración química	25
Tabla 4. Parámetros electroquímicos obtenidos mediante técnica PDP para acero API 5L X52 en H ₂ SO ₄ y HCl 1M a diferentes concentraciones de LI	28
Tabla 5. Parámetros EIS obtenidos del acero API 5L X52 en H ₂ SO ₄ y HCl 1.0 M a diferentes concentraciones de LI [BMIM]N(CN) ₂	35
Tabla 6. Valores de K _{ads} obtenidos para el líquido iónico [BMIM]N(CN) ₂	38

Resumen

En el presente trabajo se evaluó el líquido iónico (LI) 1-butil-3-metilimidazolio dicianamida $[\text{BMIM}]\text{N}(\text{CN})_2$ como inhibidor de corrosión (IC) del acero API 5L X52 en los medios de HCl 1M y H_2SO_4 1M bajo condiciones de flujo estacionario a 25 °C. Las pruebas electroquímicas de polarización de Tafel (PDP) y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) mostraron que la Eficiencia de Inhibición (EI) incremento con la concentración de inhibidor, alcanzando valores máximos de 96% en HCl 1M a 150 ppm y 49% en H_2SO_4 1M a 100 ppm. Así mismo, la velocidad de corrosión (V_{corr}) del acero API 5L X52 en estos medios corrosivos fue función de la concentración de $[\text{BMIM}]\text{N}(\text{CN})_2$, debido a un bloqueo de los sitios activos por la adsorción de moléculas de IC. El mecanismo de adsorción del $[\text{BMIM}]\text{N}(\text{CN})_2$ en la superficie del acero se ajustó a la isoterma de Langmuir, indicando un mecanismo mixto de fisisorción y quimisorción sobre la superficie metálica. En conjunto, los resultados sugieren que $[\text{BMIM}]\text{N}(\text{CN})_2$ es más efectivo en medio HCl 1M que en H_2SO_4 1 M, donde su máxima EI fue limitada a 49 %.

Introducción

El uso de soluciones ácidas es una práctica frecuente en la industria debido a sus bajos costos, estas soluciones son empleadas como desincrustante de sales y en proceso de decapado en la limpieza de aleaciones metálicas. En muchas industrias la formación de medios corrosivos también es muy común y origina importantes pérdidas económicas (Yanqiong Guan, et al., 2025). Debido a la relevancia de la industria petrolera, la prevención de la corrosión en las aleaciones metálicas constituye una práctica esencial para preservar su integridad física y química.

En ambientes acuosos corrosivos es común el uso de inhibidores de corrosión (IC) debido a su bajo costo, fácil aplicación y porque no interfieren en los procesos. La clasificación de los tipos de IC está bien establecida (Shwetha KM, Praveen, & Devendra, 2024), y no ha presentado cambios significativos a lo largo de los años. Como se ha podido constatar la propuesta de nuevos IC principalmente de tipo orgánico es muy amplia, su mecanismo de inhibición está justificada en base a su configuración química y grupos pendientes que la conforman. Esto ha facilitado la propuesta de nuevos IC, donde los líquidos iónicos han tenido un excelente campo de estudio como IC, debido a sus propiedades físicas y químicas. Sus propiedades como IC han sido moldeadas en base a la configuración química del catión y el anión, que forman parte de su estructura química. Entre los principales derivados de Líquidos Iónicos (LIs) estudiados como IC se han reportado imidazolio, piridinio, fosfonio, entre otros, observando que actúan formando una capa filmica adsorbida que evita que la sustancia corrosiva dañe la superficie.

En base a la búsqueda bibliográfica y las ventajas que presentan los LIs derivados de imidazolio, la presente investigación centro su interés en estudiar a 1-butil-3-metilimidazolio dicianamida [BMIM]N(CN)₂ como IC en dos medios corrosivos propios de la industria del petróleo para proteger el acero API 5L X52. Los estudios se realizaron con el uso de dos técnicas electroquímicas: Polarización de Tafel y Espectroscopia de impedancia Electroquímica (EIS).

Objetivos

Objetivo general

- Evaluar la eficiencia del líquido iónico 1-butil-3-metilimidazolio dicianamida [BMIM]N(CN)₂ como inhibidor de la corrosión de acero API 5L X52 en medios ácidos (H₂SO₄ y HCl a 1 M) a 25°C.

Objetivos específicos

- Cuantificar la eficiencia del inhibidor a diferentes concentraciones: 0 ppm, 10 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm, 100 ppm y 150 ppm para determinar la concentración óptima de [BMIM]N(CN)₂ en la protección del acero API 5L X52.
- Determinar el efecto de [BMIM]N(CN)₂ sobre la velocidad de corrosión del acero API 5L X52 en soluciones de H₂SO₄ y HCl a 1 M a 25°C, utilizando técnicas electroquímicas como espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y polarización potenciodinámica (PDP).

Hipótesis

El líquido iónico 1-butil-3-metilimidazolio dicianamida [BMIM]N(CN)₂ actuará como un eficaz inhibidor de la corrosión del acero API 5L X52 en medios ácidos, específicamente en soluciones de H₂SO₄ y HCl a 1M a 25°C. Se espera que la adición de [BMIM]N(CN)₂ no solo aumente significativamente la eficiencia de inhibición de la corrosión, sino que también reduzca notablemente la velocidad de corrosión del acero.

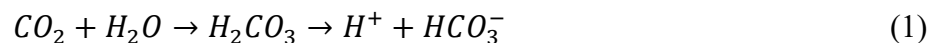
Capítulo I. Antecedentes

1.1 Corrosión

La corrosión es un fenómeno natural que implica el deterioro de materiales metálicos mediante reacciones químicas o electroquímicas con su entorno. Este proceso puede ocasionar la pérdida de integridad estructural de los metales, que trae consigo importantes pérdidas económicas y riesgos de seguridad (Kumar, 2017). La corrosión se clasifica generalmente en dos tipos: corrosión química que ocurre en ausencia de un electrolito y corrosión electroquímica, que requiere la presencia de un medio electrolítico (Groysman, 2017). La formación de medios corrosivos puede desarrollarse por diferentes medios, uno de ellos, por ejemplo, es durante la etapa de perforación y vida productiva del pozo, donde debido a las condiciones de temperatura, presión, composición química de agua congénita y de inyección, se forman medios ácidos como básicos (HCl, H₂SO₄, H₂S y CO₂) (Ramos Rodríguez & Hernández Morales, 2018). En la industria petroquímica, la corrosión es un problema significativo, especialmente en unidades de destilación y líneas de transporte, donde el contacto con soluciones ácidas y otros contaminantes puede acelerar el deterioro del acero (Llovet de Armas & Adames Montero, 2022).

1.2 Corrosión Dulce

La corrosión dulce se refiere al deterioro de los metales causado por la presencia de dióxido de carbono (CO₂) en ambientes acuosos. El CO₂, al disolverse en agua, forma ácido carbónico (H₂CO₃), que disminuye el pH del medio y promueve reacciones electroquímicas que atacan la superficie metálica (ecuación 1). Este tipo de corrosión es común en sistemas de producción y transporte de petróleo y gas, donde el CO₂ está presente debido a técnicas de recuperación mejorada o condiciones naturales del yacimiento. La reacción principal que describe este proceso es:



Los iones H⁺ resultantes facilitan la oxidación del hierro, formando iones ferrosos (Fe²⁺) y liberando electrones, conduciendo a la degradación del material metálico (Salazar-Jiménez, 2015). Se han realizado estudios en soluciones sintéticas dulces con el uso de la norma NACE (National Association of Corrosion Engineers) TM0177, reportándose que el máximo daño en aleaciones de acero se tiene en el rango de temperaturas de 70 a 80°C y está tiende a disminuir a temperaturas superiores a los 80°C. Este fenómeno fue explicado considerando que, a temperaturas mayores de

80 °C, la solubilidad del FeCO_3 decrece y se forma una película cristalina que tiende a proteger la superficie metálica (Ramos Rodríguez & Hernández Morales, 2018).

1.3 Corrosión Amarga

La corrosión amarga, por otro lado, es inducida por la presencia de ácido sulfhídrico (H_2S) en ambientes acuosos. El H_2S es altamente soluble en agua y, al disolverse, forma iones hidrosulfuro (HS^-) y sulfuro (S^{2-}), que reaccionan con el hierro para formar sulfuros de hierro (FeS), como se ilustra en la ecuación 2. Estos compuestos pueden depositarse en la superficie metálica, afectando la integridad estructural del material. La reacción principal es:



Este tipo de corrosión es predominante durante la producción de petróleo y gas, el H_2S es también considerado un medio problemático porque el daño a las aleaciones metálicas origina grandes pérdidas económicas (Salazar-Jiménez, 2015)

El estándar NACE TM0177 reporta que la corrosión por H_2S se inicia a temperaturas cercanas a los 65 °C. Al incrementarse la temperatura, el fenómeno corrosivo reduce su intensidad, debido a que se disminuye tanto la solubilidad del H_2S en el agua de formación, adicionalmente es acompañada de un daño por corrosión localizada debido a la difusión del hidrógeno a la red cristalina metálica (Ramos Rodríguez & Hernández Morales, 2018).

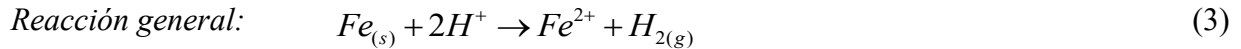
1.4 Medio corrosivo HCl

El ácido clorhídrico (HCl) es uno de los medios más corrosivos utilizados en la industria, especialmente en síntesis química y limpieza de metales, es una causa frecuente de daños por corrosión en sectores como metalurgia, petróleo y gas, tratamiento de aguas y construcción (Ahmed, et al., 2024; Huanga, Bao, & Yao, 2005). Aunque es más económico y manejable que otros ácidos minerales (Hassan, Rashid, AL-Azawi, & Khadom, 2024), su uso o formación accidental puede provocar graves efectos corrosivos, sobre todo en unidades de destilación de crudo, donde a temperaturas superiores a 393 K (120 °C), se forma HCl por descomposición de sales como cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) y cloruro de magnesio (MgCl_2) (Huang, Lu, Wang, & Yu, 2011; Pathak, et al., 2017)

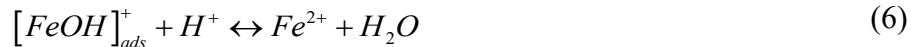
El vapor de agua puede condensarse y reaccionar con HCl para formar ácido clorhídrico líquido. Además, la reacción del amoníaco (NH_3) con HCl genera cloruro de amonio (NH_4Cl), un

compuesto altamente ácido que promueve corrosión localizada (Al-Moubaraki & Obot, 2021; James G. Speight PhD, 2014). En la industria petrolera, el HCl es responsable de daños severos en tuberías de acero, provocando derrames, fallas estructurales, además de altos costos de operación por mantenimiento y remediación (Ituen, Akaranta, & Umoren, 2017).

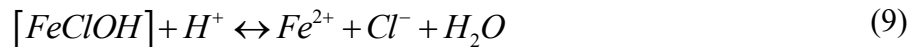
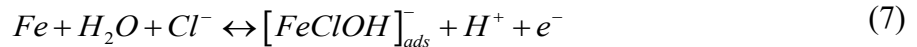
El mecanismo de corrosión del acero por HCl implica una reacción global (Reacción 3), dividida en procesos anódicos (Reacciones 4-9) y catódicos (Reacciones 8–10). En este proceso, el hierro se oxida a Fe^{2+} , liberando electrones, mientras que los intermedios adsorbidos como $[FeOH]_{ads}$ y $[FeClOH]_{ads}$ (Reacciones 4 y 8) controlan la velocidad de disolución. La presencia de iones Cl^- acelera este proceso, facilitando la disolución del hierro en medios ácidos (Noor & Al-Moubaraki, 2008).



Reacción anódica en solución acuosa ácida:

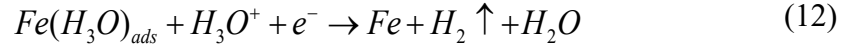


Reacción anódica en solución acuosa ácida conteniendo iones Cl^- :



Reacción catódica en solución ácida:



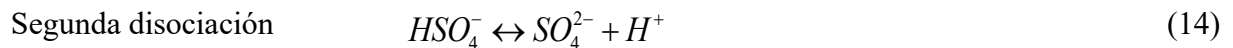
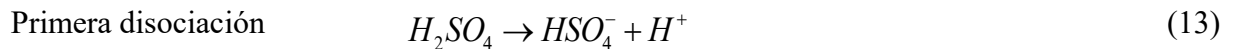


1.5 Medio corrosivo H₂SO₄

La corrosión por ácido sulfúrico es más común en instalaciones de alquilación de ácido sulfúrico y plantas de tratamiento de aguas residuales, donde no se mantiene un control meticuloso de la concentración de ácido, la rapidez del fluido, las temperaturas operativas y el flujo de ácido (Alzurajji, Kazem, Hasan, & Znad, 2024; Elkholy & Heakal, 2018).

En cuanto al acero al carbono, su ataque por ácido sulfúrico es un fenómeno ampliamente reconocido que puede manifestarse como corrosión generalizada, cuando el daño se distribuye uniformemente sobre la superficie, o como corrosión localizada por picadura, que implica un deterioro profundo en zonas específicas y compromete seriamente la integridad estructural del metal (Mills, Prost-Domasky, Honeycutt, & Brooks, 2009).

El mecanismo de la corrosión del acero por ácido sulfúrico, al igual que HCl, también implica reacciones electroquímicas anódicas y catódicas. En primera instancia, el H₂SO₄ en solución se disocia en dos etapas, dando la formación de dos protones (H^+) (Reacciones 13 y 14) (Javidi, Abadeh, Namazi, Yazdanpanah, & Shiri, 2024). Cuando el acero al carbono entra en contacto con ácido sulfúrico diluido, se produce un ataque inmediato al metal y de manera simultánea ocurre la formación de hidrógeno (evolución de hidrógeno o producción de hidrógeno gaseoso) (Reacciones 10-12) (Deyab, Zaky, & Nessim, 2017) e iones ferrosos (disolución anódica del metal) (Reacciones 15–17); es relevante mencionar que la reacción de oxidación del hierro se produce en la fase ferrita, mientras tanto la reacción de reducción catódica del hidrógeno se produce en la fase cementita (Ouarga, et al., 2023).



Posteriormente, la disolución anódica del hierro ocurre en tres etapas:



Durante la corrosión en medio ácido, el hierro se oxida formando sulfato ferroso $(FeSO_4)_{ads}$, que se adhiere a la superficie del acero como una capa protectora. Sin embargo, esta capa es débil y poco adherente, puede desprenderse facilitando un mayor avance de la corrosión, especialmente cuando influyen factores como la solubilidad del $FeSO_4$, la temperatura, presión y velocidad del flujo volumétrico (Khamme & Sakdanuphab, 2023; Askari, Aliofkhazraei, & Afroukhteh, 2019). Como se ha podido entender la velocidad de corrosión depende principalmente del medio corrosivo y composición química de la aleación. Mientras que la pasivación de la superficie depende del tipo de productos de corrosión formados, por ejemplo, los productos de corrosión de $FeSO_4$, regula la corrosión mediante dos factores: la difusión del oxidante (H_2SO_4) a través de la película y la difusión de los productos de corrosión desde la superficie metálica hacia el medio ácido (Panossian, Almeida, Sousa, Pimenta, & Marques, 2012).

1.6 Acero API 5L X52

El acero API 5L X52 es ampliamente utilizado en la industria del petróleo y gas para la fabricación de tuberías destinadas al transporte de hidrocarburos. Su composición química está cuidadosamente controlada para garantizar propiedades mecánicas óptimas y una adecuada resistencia a la corrosión. Su composición química típica está cuantificada siendo la siguiente: 0.08% en peso C, 1.06% en peso Mn, 0.26% en peso Si, 0.019 % en peso P, 0.003% en peso S, 0.0039% en peso Al, 0.041% en peso Nb, 0.018% en peso Cs, 0.02% en peso Cr, 0.019% en peso Ni, 0.054% en peso V, 0.003% en peso Ti, 0.0002% en peso Ca, 0.0003% en peso B y el resto Fe (Arellanes Lozada, et al., 2015).

1.7 Técnicas de análisis de corrosión

1.7.1 Polarización potenciodinámica (PDP)

La polarización potenciodinámica es una técnica electroquímica fundamental para investigar el comportamiento electroquímico de los materiales, al medir la corriente que fluye a través de un electrodo (material de interés), mientras se varía su potencial. Esta técnica se basa en la relación entre la corriente y el potencial, que permite obtener curvas de polarización que son fundamentales para determinar la velocidad de corrosión y los mecanismos de corrosión en las aleaciones (Zhao, Liu, Song, & Atrens, 2008). El análisis de Tafel proporciona una estimación rápida de la velocidad de corrosión y la resistencia a la polarización. La velocidad de corrosión (V_{corr} , mm/year) se calcula en la ecuación 18 utilizando la corriente de corrosión

$$V_{corr} = 3.17 \times 10^{-9} \frac{M}{nFA} i_{corr} \quad (18)$$

donde:

Factor de conversión: 3.17×10^{-9} [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ a mm year^{-1}]

M: peso atómico de la muestra [g mol^{-1}]

n: número de electrones intercambiados en la reacción

ρ : densidad de la muestra [g cm^{-3}]

F: constante de Faraday [96485 C mol^{-1}]

A: área de la muestra [cm^2]

La relación M/n también se denomina peso equivalente.

Para calcular i_{corr} se emplea la ecuación de Butler-Volmer:

$$i = i_{corr} \left(e^{2.303 \frac{\eta}{\beta_a}} - e^{-2.303 \frac{\eta}{\beta_c}} \right) \quad (19)$$

Donde:

i : densidad de corriente de corrosión total

i_{corr} : densidad de corriente de corrosión

E_{corr} : potencial de corrosión

η : sobrepotencial [V], definido como la diferencia entre el potencial aplicado E y el potencial de corrosión E_{corr}

β_a : pendiente de Tafel de la rama anódica [V/dec]

β_c : pendiente de Tafel de la rama catódica [V/dec]

Para grandes sobrepotenciales anódicos ($\frac{\eta}{b_a} \gg 1$) y catódicos ($\frac{\eta}{b_c} \ll -1$) la ecuación de Butler-Volmer se simplifica a la ecuación de Tafel para la reacción anódica:

$$\eta = \beta_a \cdot \log \left(\frac{i}{i_{corr}} \right) \quad (20)$$

La ecuación de Tafel para la reacción catódica viene dada por:

$$\eta = -\beta_c \cdot \log \left(\frac{i}{i_{corr}} \right) \quad (21)$$

Las ecuaciones de Tafel predicen una línea recta para la variación del logaritmo de la corriente con el potencial (Metrohm, 2023). Por lo tanto, las corrientes a menudo se muestran en gráficos semilogarítmicos, conocidos como gráficos de Tafel (figura 1).

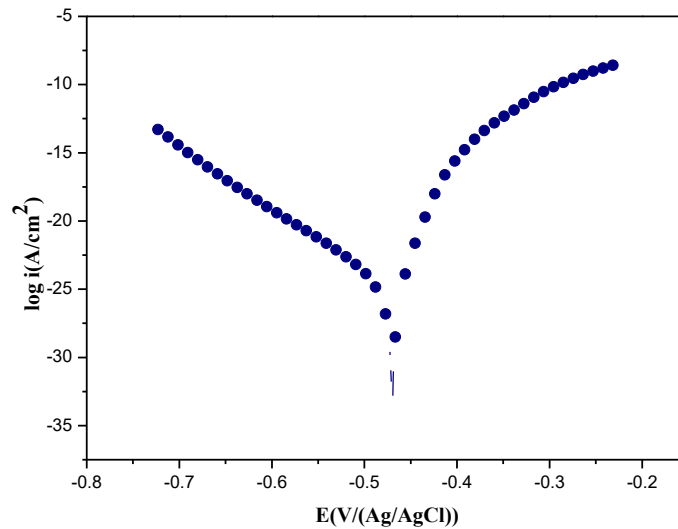


Figura 1. Gráfico de Tafel que corresponde a la curva $\text{Log}(i)$ vs E .

El método implica el uso de una celda con arreglo de tres electrodos, donde el electrodo de trabajo es el material de interés, el electrodo de referencia proporciona un potencial constante, y el electrodo auxiliar completa el circuito eléctrico. (Song & Atrens, 2004). Sin embargo, la polarización potenciodinámica presenta limitaciones, como el fenómeno conocido como Efecto de Diferencia Negativa (NDE), que puede complicar la interpretación de los resultados. Este efecto se manifiesta cuando la evolución de hidrógeno en el electrodo de trabajo afecta la medición de la corriente, que puede llevar a desviaciones significativas en los valores de la velocidad de corrosión obtenidos (Weber, Knörnschild, & Dick, 2003).

1.7.2 Espectroscopía de Impedancia electroquímica (EIS)

La espectroscopia de impedancia electroquímica es una técnica que utiliza una perturbación sinusoidal para estudiar las reacciones electroquímicas en la superficie de un material inmerso en un electrolito. Esta técnica permite obtener información sobre la resistencia a la corrosión y la formación de capas pasivas en tiempo real (Kirkland, Birbilis, & Staiger, 2012).

EIS se basa en la medición de la impedancia del sistema electroquímico, que se representa en diagramas de Nyquist o Bode. La gráfica de la parte real de la impedancia contra la parte imaginaria proporciona una Gráfica de Nyquist, se muestra en la figura 2. El módulo de impedancia y el cambio de fase se trazan como una función de la frecuencia en dos gráficos diferentes conocidos colectivamente como el diagrama de Bode, que se muestra en figura 3. Estos diagramas permiten analizar la respuesta del sistema a diferentes frecuencias, proporcionando información sobre los mecanismos de corrosión y la cinética de las reacciones electroquímicas (Bakhsheshi-Rad, et al., 2014).

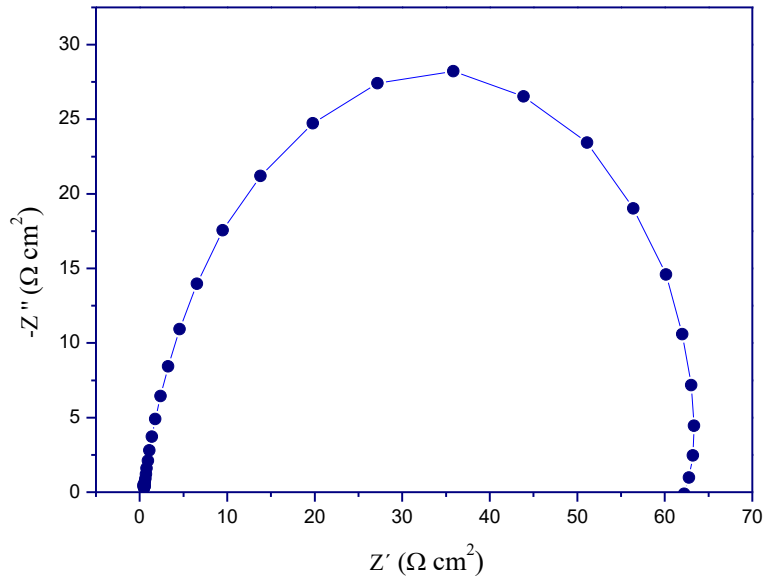


Figura 2. Diagrama de Nyquist

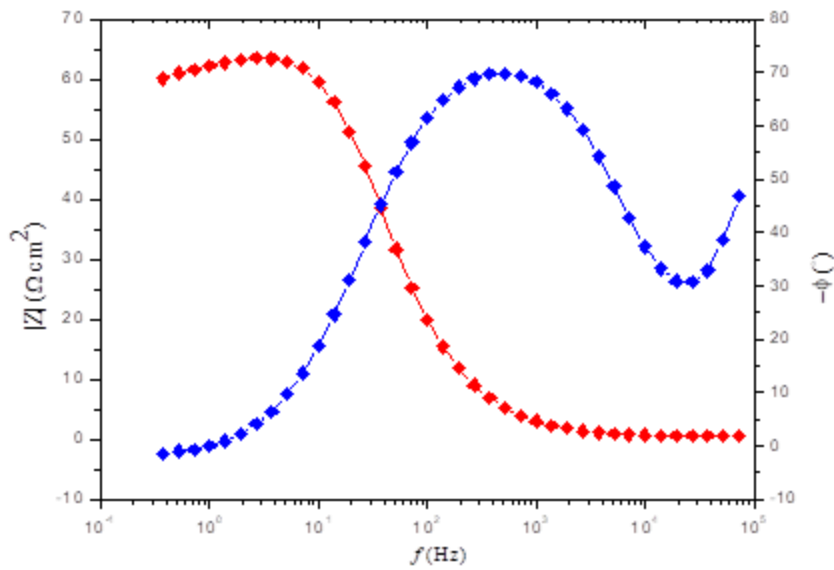


Figura 3. Diagrama de Bode

El uso de circuitos equivalentes es una herramienta necesaria para la interpretación de los espectros EIS. El circuito de Randles (Figura 4) es uno de los modelos más simples y comunes para una

celda de tres electrodos. Incluye una resistencia a la solución (R_{Ω}), ya sea un capacitor de doble capa C o un Elemento de Fase Constante (CPE), y un elemento genérico para la impedancia faradaica, debido a los procesos electroquímicos. En el caso más simple del circuito de Randles, la impedancia faradaica es únicamente la resistencia de transferencia de carga (R_{Ct}).

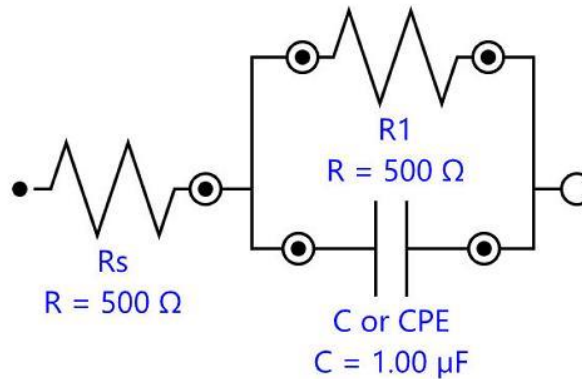


Figura 4.Diagrama de circuito eléctrico equivalente para un circuito RC en paralelo

Una de las principales ventajas de EIS es que no requiere una preparación extensa de la muestra, por consiguiente, facilita su aplicación en estudios de corrosión. Sin embargo, la técnica también presenta desafíos, como la dificultad para obtener mediciones precisas debido a la variabilidad en los procesos de corrosión de los materiales y la necesidad de elegir un circuito equivalente adecuado para el análisis (Atrens, Johnston, Shi, & Dargusch, 2017).

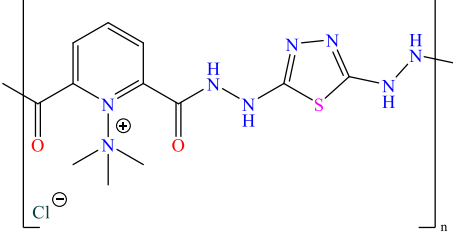
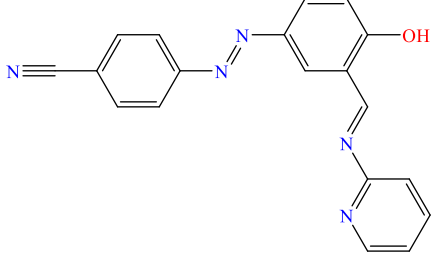
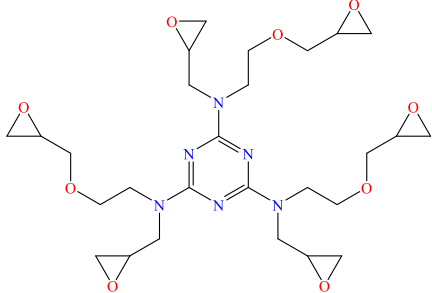
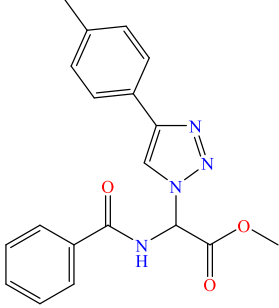
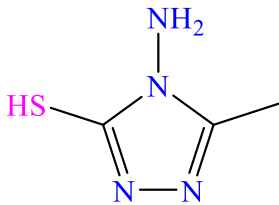
1.8 Inhibidores de corrosión

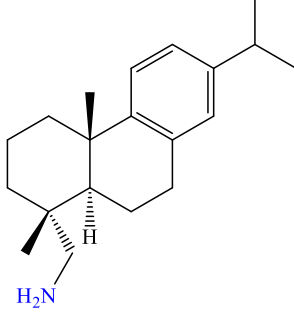
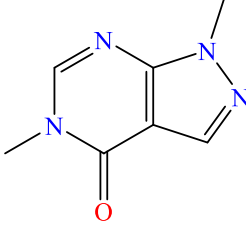
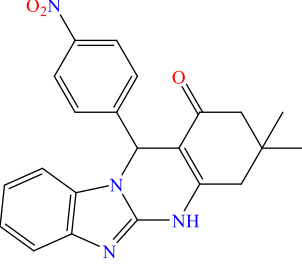
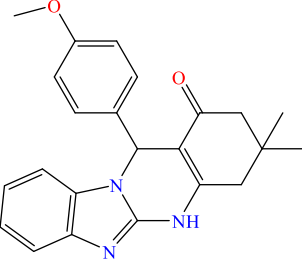
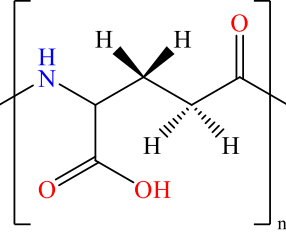
Los inhibidores de corrosión (IC) son compuestos químicos que, al ser añadidos a un medio corrosivo, reducen la velocidad de corrosión de las aleaciones. Estos inhibidores pueden actuar de diversas maneras, como formando una película protectora sobre la superficie metálica, o modificando la cinética de las reacciones anódicas y catódicas involucradas en el proceso de corrosión (Sastri, 2011). Los inhibidores de corrosión suelen ser moléculas orgánicas heterocíclicas que contienen enlaces dobles o triples y heteroátomos como N, S, O y P que tienen una alta densidad de electrones (Namitha, Rao, & Rao, 2022). La eficiencia de un inhibidor

depende de su concentración, la naturaleza del medio corrosivo y las propiedades del metal a proteger (Obot, Macdonald, & Gasem, 2015). La ventaja de usar IC es que no interfieren con las operaciones en curso. Muchas industrias utilizan este tipo de compuestos durante el decapado en intercambiadores de calor, tuberías, plantas de proceso, etc. (Kedimar, Rao, & Rao, 2024). Sin embargo, muchos inhibidores tradicionales son tóxicos y presentan riesgos ambientales, por esta razón se han buscado alternativas más seguras y sostenibles (Verma, Ebenso, & Quraishi, 2017)

En la Tabla 1 se presenta una amplia variedad de inhibidores de corrosión (IC) que han demostrado eficiencias de inhibición (EI) iguales o superiores al 90 %, incluso a concentraciones menores de 100 ppm. Esta selección abarca desde compuestos orgánicos cíclicos funcionalizados hasta polímeros y líquidos iónicos (LI), evaluados en diferentes tipos de acero al carbono expuestos a medios ácidos altamente corrosivos como HCl y H₂SO₄.

Tabla 1. Inhibidores de corrosión (IC)

Nombre y estructura química	Metal/ Medio	IC _c : EI (%)	Ref.
<p>Polímero AMTP</p> <p>Poli[(2,6-dicarbonilpiridina) (2,5-dihidrazinil-1, 3, 4-tiadiazol)]</p>		<p>C1018 – Acero/ 1,0 M H₂SO₄</p>	<p>10 ppm: 98.4 (Lu, 2024)</p>
<p>AS</p> <p>4-((4-hidroxi-3-((piridina-2-ilimino) metil) fenil) diazenil) benzonitrilo</p>		<p>Acero al carbono/ 1,0 M H₂SO₄</p>	<p>0.08 mM (~ 26.2 ppm): 91.32 (Abdulridha, et al., 2020)</p>
<p>ERT</p> <p>N2, N4, N6-tris (2-(oxiran-2-il metoxi) etil)-N2, N4, N6-tris (oxiran-2-il metil)-2,4,6-triamina-1,3,5-triazina</p>		<p>Acero al carbono/ 0,5 M H₂SO₄</p>	<p>1×10⁻⁵ M (~5.9 ppm): 90.7 (Hsissou, et al., 2021)</p>
<p>MBTTA</p> <p>Acetato de 2-(benzamido)-2-(4-p-tolil-1H-1, 2, 3-triazol-1-ilo) de metilo</p>		<p>Acero dulce/ 1,0 M H₂SO₄</p>	<p>0.25 mM (~ 87.5 ppm): 90.13 (Elazhary, et al., 2019)</p>
<p>AMTT</p> <p>4-amino-5-metil-4H-1,2,4-triazol-3-tiol</p>		<p>Acero dulce/ 0,5 M H₂SO₄</p>	<p>25×10⁻⁶ M (3.3 ppm): 94 (Hazazi, Fawzy, & Awad, 2014)</p>

DHAA Deshidroabietilamina		Acero dulce/ HCl 1,0 M	25 ppm: 91.0	(Far, Glenn, Davoodi, & Rahimi, 2022)
MF3 1,5-dimetil-1H-pirazolo[3,4-d]pirimidin-4(5H)-ona		Acero dulce/ HCl 1,0 M	1×10^{-4} M (~16.4 ppm): 90.5	(Ouadi, et al., 2020)
Q-NO2 3,3-dimetil-12-(4-nitrofenil)-3,4,5,12-tetrahidrobenzo[4,5]imidazo[2,1-b]quinazolin-1(2H)-ona		Acero dulce/ HCl 1,0 M	1×10^{-4} M (~ 38.8 ppm): 93.5	(Ouakki, et al., 2024)
Q-OMe 12-(4-metoxifenil)-3,3-dimetil-3,4,5,12-tetrahidrobenzo[4,5]imidazo[2,1-b]quinazolin-1(2H)-ona		Acero dulce/ HCl 1,0 M	1×10^{-6} M (~ 0.3 ppm): 91.5	(Ouakki, et al., 2024)
PGA Ácido poli-γ-glutámico		Acero dulce/ HCl 1,0 M	50 ppm + 293 K: 90.2	(Roy, Saha, Banerjee, Dey, & Sukul, 2017)

1.9 Líquidos iónicos

Los líquidos iónicos (LIs) son sales que permanecen en estado líquido a temperaturas relativamente bajas y están compuestos por un catión y un anión. Estos compuestos han emergido como prometedores IC debido a sus propiedades únicas, como baja volatilidad, alta estabilidad

térmica y capacidad para disolver una amplia gama de compuestos (Zhao, Wu, Kou, & Min, 2002). Los LIs derivados de imidazolio, en particular, han mostrado eficiencias de inhibición superiores al 90% en diversos medios corrosivos (Likhanova, et al., 2010). Su capacidad para formar capas protectoras sobre las superficies metálicas y su compatibilidad con el medio ambiente los convierten en una opción atractiva para la mitigación de la corrosión (Verma, Alrefaee, Quraishi, Ebenso, & Hussain, 2021). En los últimos años, los líquidos iónicos, especialmente con cationes y aniones orgánicos, han recibido mucha atención por sus propiedades únicas, como excelente estabilidad térmica, alta conductividad iónica, presión de vapor insignificante, grandes ventanas electroquímicas y menor toxicidad (Zunita & Kevin, 2022). Tan et al., analizaron las propiedades inhibitoras del 1-Hexadecyl-3-methylimidazolium Bromide (HMIBr), reportando EI de 94.5% y 96.9% a concentraciones de 2×10^{-4} y 1×10^{-3} M, respectivamente; efectividad asociada al reemplazo de las moléculas de agua adsorbidas en la interfaz metal/solución por el catión y anión del [HMIBr]. Mediante MD se observó que el catión 3-methylimidazolium adoptó una orientación casi planar sobre el Fe (110), mientras que, la cadena hexadecyl se inclinó hacia el medio corrosivo. En cambio, Kousar et al. estudiaron un compuesto derivado de imidazoline para disminuir la corrosión de acero al carbono, (Z)-2-(2-(heptadec-8-en-1-yl)-4,5-dihydro-1H-imidazol-1-yl)ethan-1-amine (OMID), reportando EI de ~96 % a 0.01 mM. De acuerdo a los resultados de análisis XPS, los autores sugieren una doble protonación simple de la estructura, la primera en el grupo amina primaria ($\text{NH}_2 \rightarrow \text{NH}_3^+$); mientras que la segunda en el grupo imina ($>\text{C}=\text{N} \rightarrow >\text{C}=\text{NH}^+$). No obstante, el grupo amina terciaria ($\text{N}<$) permanece sin protonar. De manera similar a otros estudios previos, sugieren que los iones Cl^- participan como puentes entre la carga positiva de la superficie y la molécula protonada.

Otro estudio de LI derivado de imidazolio fue el realizado por Elkholy *et al.* quienes emplearon un LI Gemini a base de hexadecyl imidazolium bromide (GS) para acero al carbono, reportando EI de 90% a 50 ppm. Mediante pruebas electroquímicas de PDP y EIS, sugieren que GS no cambia el mecanismo de corrosión. También sugieren que, al incrementar la concentración de GS, ocurre un reacomodo de las moléculas adsorbidas previamente, pasando de una adsorción planar a una vertical, permitiendo una mayor cobertura por apilamiento del catión, lo que incrementó el espesor de la película inhibitora. Los autores sugieren tres procesos de adsorción: 1) mediante los electrones π del anillo 2) o pares solitarios del N y 3) interacción entre orbitales llenos del átomo

de la superficie de hierro y orbitales vacantes de heteroátomos (back-donation); e indican que todos los modos de interacción pueden ocurrir simultáneamente.

De igual manera, Ashassi-Sorkhabi y Es'haghi (2009) evaluaron el 1-butil-3-metilimidazolio bromuro (BMIM-Br) como inhibidor de la corrosión en acero dulce expuesto a HCl 1M, demostrando una eficiencia de 94% a 20 mM. El estudio indicó que actúa como inhibidor de tipo mixto sin modificar el mecanismo de evolución del hidrógeno y la adsorción del IC seguía el modelo de Langmuir; además, la eficiencia de inhibición aumentaba con el incremento de la concentración del inhibidor. En un trabajo posterior Tan et al. (2020) estudiaron el 1-hexadecil-3-metilimidazolio bromuro en acero dulce en presencia de HCl 1 M, obteniendo una eficiencia máxima de 96.9%. Los resultados electroquímicos revelaron que (HMIBr) suprime la corrosión mediante adsorción química y física espontánea en la superficie del hierro.

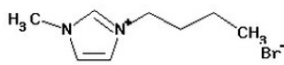
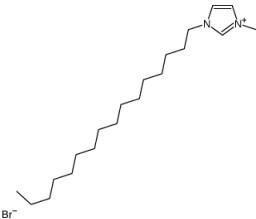
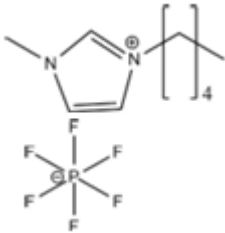
Otros derivados también han mostrado resultados sobresalientes. Por ejemplo, Al-Rashed & Nazeer (2019) analizaron el 1-metil-3-octilimidazolio hexafluorofosfato [OctMIM][PF₆] en HCl 1M, alcanzando un 94.62% de inhibición. Los análisis PDP, EIS, FTIR y SEM de la superficie metálica confirmaron que los LIs se adsorbieron en la superficie del acero y que la isoterma de adsorción de Langmuir describió el proceso de inhibición. En la misma línea, Murulana et al. (2012) probaron el 1-propil-3-metilimidazolio bis(trifluorometilsulfonyl) imida en acero dulce en HCl 1M, logrando una eficiencia de 69.9%. El soporte teórico mediante cálculos de teoría del funcional de la densidad (DFT) confirmó la alta densidad electrónica en el anillo imidazolio, lo que favorece su adsorción. Qiao & Zeng (2020) investigaron el cloruro de 1-dodecil-2,3-dimetilimidazolio en acero N80 en HCl al 15%, obteniendo una eficiencia del 95.7%. Posteriormente, Timoudan et al. (2025) exploraron el uso de 2-[(dodeciltio)metil]-1H-benzo[d]imidazol (LF₃) en acero al carbono en HCl 1M, alcanzando hasta un 95.3% de inhibición. Los autores destacaron que actúa como inhibidor de tipo mixto y funciona adhiriéndose fuertemente a la superficie del acero al carbono siguiendo el modelo de Langmuir. Este inhibidor de corrosión es muy prometedor para la protección del acero al carbono en ambientes ácidos, gracias a su estructura molecular: adsorción química por el anillo de benzimidazol y formación de una barrera hidrofóbica estable por la cadena alquílica larga.

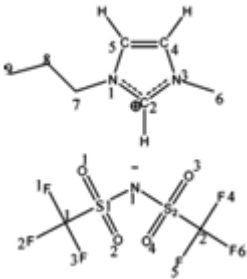
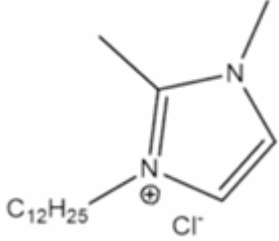
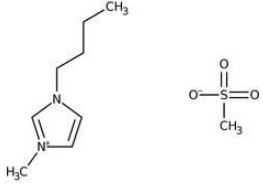
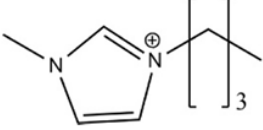
En otras investigaciones, Kaya y Obot (2021) evaluaron el 1-butil-3-metilimidazolio metanosulfonato en H₂SO₄, reportando una eficiencia cercana al 92.5%. El estudio combinó

ensayos electroquímicos con análisis teóricos, mostrando que el mecanismo de inhibición se basaba principalmente en quimisorción. Del mismo modo, Gong, Zhang y Liu (2022) estudiaron un líquido iónico imidazolio funcionalizado con grupos –OH en acero al carbono en HCl, alcanzando un 94% de eficiencia. La presencia de grupos hidroxilo favoreció la interacción con la superficie metálica mediante enlaces de hidrógeno, lo que mejoró la estabilidad de la película.

Finalmente, los autores Murulana, et al. (2012) analizaron 1-hexil-3-metilimidazolio bis(trifluorometilsulfonil)imida en acero dulce en HCl 1M, reportando una eficiencia del 75.7%. El estudio reveló que las moléculas del inhibidor inhiben la corrosión del acero dulce mediante adsorción en la interfaz metal/ácido. La Tabla 2, muestra la estructura de algunos LIs derivados de imidazolio que han sido empleados en medios ácidos.

Tabla 2. Inhibidores derivados de imidazolio

Inhibidor	Estructura	Metal/ medio ácido	Eficiencia	Referencia
1-butil-3-metilimidazolio bromuro (BMIM-Br)		Acero al carbono/ HCl 1 M	94%	(Ashassi-Sorkhabi & Es'haghi, 2009)
1-hexadecil-3-metilimidazolio bromuro (HMIBr)		Acero dulce/ HCl 1 M	96.9%	(Tan, et al., 2020)
1-metil-3-octilimidazolio hexafluorofosfato [OctMIM][PF6]		Acero dulce/ HCl 1 M	94.62%	(Al-Rashed & Nazeer, 2019)

1-propil-3-metilimidazolio bis(trifluorometilsulfonyl) imida		Acero dulce/ HCl 1M	69.9%	(Murulana, Singh, Shukla, Kabanda, & Ebenso, 2012)
cloruro de 1-dodecil-2,3-dimetilimidazolio		Acero N80/ HCl 15%	95.7%	(Qiao & Zeng, 2020)
2-[(dodecilio)metil]-1H-benzo[d]imidazol (LF 3)		Acero al carbono/ HCl 1 M	95.3%	(Timoudan, et al., 2025)
1-butil-3-metilimidazolio metanosulfonato		Acero dulce/ H2SO4 1 M	92.5%	(Kaya & Obot, 2021)
1-hexil-3-metilimidazolio bis(trifluorometilsulfonyl) imida		Acero dulce/ 1 M HCl	75.7%	(Murulana, Singh, Shukla, Kabanda, & Ebenso, 2012)

En base a la bibliografía consultada, se pudo observar una recurrencia de grupos funcionales como hidroxilos (–OH), aminas (–NH₂), tioles (–SH) y anillos aromáticos conjugados, así como estructuras heterocíclicas nitrogenadas (imidazoles, benzimidazoles, triazoles) (Likhanova, et al., 2010). Aunque estos grupos funcionales suelen favorecer la adsorción sobre acero al carbono por densidad electrónica y polaridad, no se identificó un patrón estructural único: algunos compuestos

con un solo grupo donador alcanzan eficiencias comparables o superiores a aquellos con múltiples grupos funcionales o cadenas alquílicas largas. Esto sugiere que la eficiencia no depende exclusivamente del número de sitios activos, sino de la disposición electrónica, la accesibilidad superficial y el tipo de interacción predominante con el metal. No obstante, el análisis de los IC orgánicos con derivados de LIs en medios ácidos revela que no existe una correlación directa entre la complejidad estructural y el desempeño inhibitorio. Compuestos con estructuras simples, como tioureas o aminas aromáticas, muestran EI comparables a derivados más complejos con múltiples grupos funcionales, cadenas alquílicas largas o sistemas conjugados extendidos. Si bien se observa una alta frecuencia de heteroátomos como nitrógeno, oxígeno y azufre, así como de anillos aromáticos y heterocíclicos, la EI parece depender más de la orientación electrónica, la capacidad de adsorción efectiva y la compatibilidad con el medio corrosivo, que del número absoluto de grupos donadores. Esta diversidad estructural entre los compuestos sugiere que la interacción con la superficie metálica puede ser gobernada por mecanismos mixtos de adsorción física y química, donde factores como la polaridad, la densidad electrónica localizada y la flexibilidad molecular juegan un papel determinante.

Capítulo II. Desarrollo experimental

2.1 Preparación de la muestra

Para las pruebas electroquímicas se empleó una probeta de acero API 5L X52 de forma circular con diámetro de 4.76 mm. Esta fue soldada a un cable de cobre y posteriormente encapsulada en un molde de teflón relleno con resina epóxica. Una vez encapsulada la muestra, se dejó solidificar a temperatura ambiente durante al menos 24 horas. Tras este periodo de curado, se realizó una inspección visual en el microscopio con el objetivo de verificar la ausencia de grietas o defectos en la encapsulación. En la figura 5, se puede observar el electrodo de trabajo listo para ser usado.

Posteriormente, la superficie expuesta de la muestra fue sometida a un proceso de desbaste. Para ello, se empleó papel de lija de SiC con granulometrías de 320, 600, 1200, 1500 y 2000, seguido de un lavado con agua desionizada y etanol, y secado a temperatura ambiente. El objetivo fue obtener una superficie homogénea y libre de imperfecciones, asegurando condiciones óptimas para su posterior análisis electroquímico.



Figura 5. Electrodo de trabajo

2.2 Preparación del medio ácido e inhibidores de corrosión

El IC que se estudió fue el LI 1-butil-3-metilimidazolio dicianamida [BMIM]N(CN)₂, cuya estructura química se muestra en la Figura 6. Las concentraciones que se evaluaron del inhibidor fueron 0,10,25, 50, 75, 100 y 150 ppm en dos medios corrosivos H₂SO₄ y HCl a 1M. Se preparó el medio ácido aforando volúmenes medidos de ácido concentrado a 1000 mL con agua

desionizada. Se utilizaron 54 mL de H₂SO₄ y 84 mL de HCl. Ambas soluciones fueron puestas en agitación magnética continua para asegurar su homogeneización.

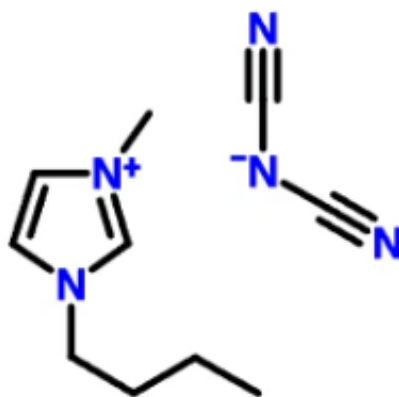


Figura 6. Estructura química del 1-butil-3-metilimidazolio dicianamida [BMIM]N(CN)₂

2.3 Pruebas electroquímicas

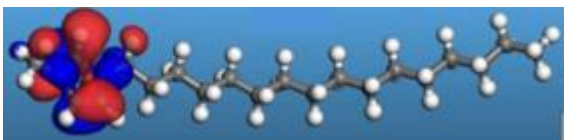
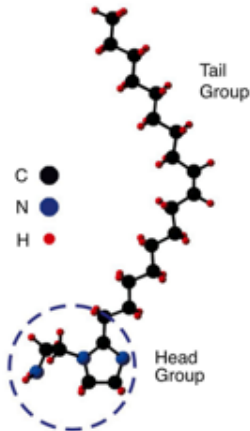
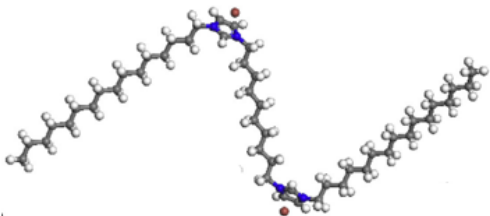
Las técnicas electroquímicas empleadas para calcular la EI del LI fue polarización potenciodinámica (PDP) y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS). Las pruebas se realizaron empleando un Potenciostato/Galvanostato conectado a un equipo de cómputo controlado por el software NOVA 2.1.7. Los ensayos se llevaron a cabo en una celda electroquímica de vidrio con configuración de tres electrodos. El electrodo de trabajo consiste en una muestra de acero API 5L X52, con un área expuesta de 0.1779 cm², como electrodo de referencia se utilizó un electrodo de Ag/AgCl en 3.0 M KCl, colocado dentro de un capilar de Luggin para minimizar la caída óhmica y evitar la contaminación del sistema. El contraelectrodo fue de platino con una pureza del 99.9%. Se estableció un potencial de circuito abierto (E_{ocp}) de 900 segundos, posteriormente se realizaron las curvas de polarización Tafel en un intervalo de – 250 mV a +250 mV respecto al E_{ocp} con una velocidad de barrido de 0.166 mV/s. Mientras que las pruebas de EIS se realizaron después de haber alcanzado el E_{ocp} aplicando una señal sinusoidal de 5 mV (AC) y cubriendo un rango de frecuencia desde 100 kHz hasta 10 mHz. Todos los experimentos fueron realizados por triplicado y los datos reportados corresponden al promedio obtenido.

Capítulo III. Resultados y discusión

3.1 Consideración del Líquido iónico

El líquido iónico 1-butil-3-metilimidazolio dicianamida [BMIM]N(CN)₂ utilizado en este trabajo fue diseñado y sintetizado previamente en el Instituto Politécnico Nacional en el Centro de Investigación e Innovación Tecnológica. Por ello, la ruta de síntesis y caracterizaciones químicas no son abordadas en este trabajo de investigación. Pero si es importante señalar que el líquido iónico estudiado contiene en el catión y anión átomos de nitrógeno y dobles enlaces en el anillo bencílico, los cuales son atractivos desde el punto de vista químico, porque en estudios realizados de LIs como IC se ha reportado que este tipo de estructuras pueden tener propiedades como IC (Kedimar, Rao, & Rao, 2024). Adicionalmente, en la estructura química del catión en la posición 1 está localizada una cadena alquílica, que comúnmente está relacionada como la parte que estará orientada hacia la solución corrosiva. Esto quiere decir que el compuesto [BMIM]N(CN)₂ químicamente posee una parte nucleofílica y otra hidrofílica que en conjunto serán los responsables de formar barreras físicas sobre la superficie del acero, reduciendo la presencia de zonas activas sobre el acero (El-Nagar, Khalil, Atef, Nessim, & Ghanem, 2024). De acuerdo con reportes de cálculos teóricos de autores que han desarrollado estudios de funcionales de la densidad en moléculas de LIs derivados de imidazolio, se puede establecer como probable hipótesis que la zona de orbital de alta energía (HOMO) estará localizado sobre el catión concretamente sobre el anillo imidazolio y sobre el anión, esto porque el anillo aromático y los átomos de nitrógeno son portados de una alta densidad electrónica, mientras que la zona de baja energía (LUMO) prevalecerá solo en el catión principalmente sobre la cadena alquílica. Se ha considerado que cadenas alquílicas largas permiten un estrechamiento en cuanto a la formación de la película inhibidora, lo que favorece a la protección de la superficie. Estos fenómenos de localización de cargas HOMO Y LUMO es propia de la molécula, pero a pesar de ello, la experiencia ha demostrado que en condiciones reales de medios corrosivos no siempre garantizan formación de películas homogéneas y estables durante la protección de la aleación contra la corrosión (Tan, et al., 2020). La tabla 3 muestra una lista de LIs derivados de imidazolio reportados en la literatura, junto con su eficiencia inhibidora (EI) en medios ácidos.

Tabla 3. LIs derivados de imidazolio con una diversidad de configuración química

Nombre y estructura química	Metal/Medio	ICC: EI%	Referencia
1-Hexadecyl-3-methylimidazolium Bromide (HMIBr) 	Acero al carbono/ 1M HCl	2×10 ⁻⁴ M: 94.5 % y 1×10 ⁻³ M: 96.9 %	(Tan, et al., 2020)
(Z)-2-(2-(heptadec-8-en-1-yl)-4,5-dihydro-1H-imidazol-1-yl)ethan-1-amine (OMID) 	Acero al carbono/ 1M HCl	0.01 mM: 95%	(Kousar, et al., 2021)
LI Gemini a base de hexadecyl imidazolium bromide (GS) 	Acero al carbono/ 0.5 M H ₂ SO ₄	50 ppm: 90.5%	(Elkholy & Heakal, 2018)

3.2 Prueba PDP

Para evaluar las propiedades inhibitorias del 1-butil-3-metilimidazolio [BMIM]⁺N(CN)₂⁻ se realizaron pruebas electroquímicas de extrapolación de Tafel y EIS, debido a su versatilidad e información que proporcionan sobre la cinética de las reacciones electroquímicas. Estas técnicas proporcionaron información importante para vislumbrar el comportamiento del LI sobre la superficie del acero en los sitios activos y la estabilidad de la capa protectora que comúnmente es reportada por diferentes autores en la evaluación de moléculas orgánicas. Así mismo la técnica de EIS fue complementada con el uso de circuitos eléctricos equivalentes que fueron empleados para

ajustar los resultados experimentales y poder comprender los procesos de transferencia de carga eléctrica.

La Tabla 4 reporta los parámetros electroquímicos como son: densidad corriente de corrosión (i_{corr}), pendientes de Tafel anódica y catódica (β_a y β_c) y potencial de corrosión (E_{corr}). Estos valores fueron obtenidos del trazo de las pendientes sobre las curvas de Tafel en la rama anódica y catódica, considerando que las pendientes cumplieran mínimo dos décadas. Los gráficos PDP o Tafel experimentales en ausencia y presencia de IC se muestran en la Figura 7 (H₂SO₄) y Figura 8 (HCl), respectivamente. Del análisis de la Figura 7, se observa que todos los potenciales de corrosión, en presencia de inhibidor se desplazan a valores más positivos, indicando que el compuesto [BMIM]N(CN)₂ tiene una preferencia marcada hacia los sitios anódicos; por ello, el proceso de oxidación se ve bloqueado. El menor valor de desplazamiento de E_{corr} en valor absoluto fue de 0 (mV/dec) a la concentración de 10 ppm, mientras que el mayor valor de E_{corr} fue de 11 (mV/dec) a 100 ppm, todos en referencia al E_{corr} sin IC. Del análisis de la Figura 8, se observó nuevamente que el E_{corr} tuvo un desplazamiento también hacia la parte anódica, sin embargo, este proceso tiene un comportamiento interesante, porque su diferencia en valor absoluto con E_{corr} con respecto al blanco, es superior a 80 mV/dec, indicando que este medio [BMIM]N(CN)₂ se clasificó como un IC 100% preferencial hacia la parte anódica. Por ello, el E_{corr} mínimo fue de 154 mV/dec a la concentración de 50 ppm y el máximo fue de 183 mV/dec a 150 ppm. Nuevamente del análisis de las Figuras 7 y 8 se observa que la densidad de corriente en las ramas catódica y anódica tiende a disminuir con la presencia de LI, confirmando que existe un bloqueo de los sitios activos sobre la superficie del acero. Sin embargo, en HCl se observó que la densidad de corriente en la rama anódica no presentó una linealidad de Tafel. Está marcada por dos procesos electroquímicos, el primero se presenta en el rango de ≈ -0.3 V a ≈ -0.2 V donde se aprecia una adsorción del LI con respecto a la concentración. El segundo proceso se presenta aproximadamente entre ≈ -0.2 V a ≈ -0.06 V donde se presenta un cambio de pendiente abrupto, asociada a una desorción muy rápida de moléculas de IC, implicando que la velocidad de corrosión tiende a incrementar. Con respecto a las pendientes de Tafel (β_a y β_c) estas no presentan una tendencia definida con respecto a su valor en presencia de IC, a pesar de ello, la transferencia de carga eléctrica que fluye sobre la superficie del acero se ve reducida. Finalmente, el comportamiento de i_{corr} del cruce de la pendiente catódica y anódica, muestra una disminución

de la corriente, confirmando que el compuesto [BMIM]N(CN)₂ si bloqueo los sitios activos del acero, con ello, su velocidad de corrosión fue función de la concentración de compuesto.

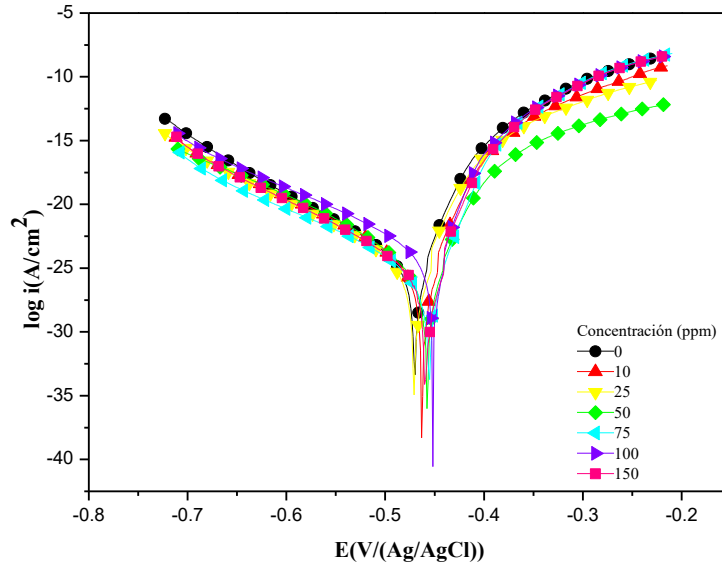


Figura 7. Curvas potenciodinámicas del acero API 5L X52 a diferentes concentraciones de LI en medio ácido H₂SO₄

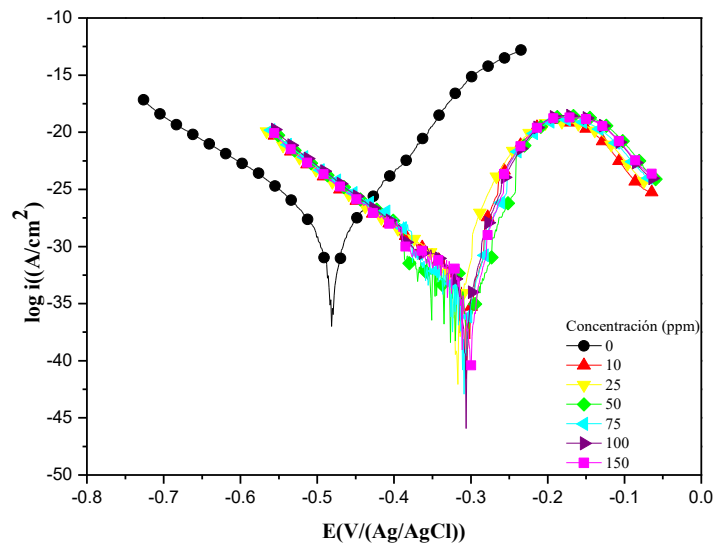


Figura 8. Curvas potenciodinámicas del acero API 5L X52 a diferentes concentraciones de LI en medio ácido HCl

Tabla 4. Parámetros electroquímicos obtenidos mediante técnica PDP para acero API 5L X52 en H₂SO₄ y HCl 1M a diferentes concentraciones de LI [BMIM]N(CN)₂.

Medio	C_{Inh} [ppm]	-E_{corr} [mV]	i_{corr} [μA/cm²]	 β_a [mV/dec]	 β_c [mV/dec]	EI %
H₂SO₄	0	463	284	40	145	0
	10	463	205	44	135	28
	25	471	199	45	134	30
	50	457	190	51	133	33
	75	456	160	39	153	44
	100	452	316	37	158	49
	150	460	172	40	136	40
HCl	0	481	66.88	82	134	0
	10	315	9.76	32	110	85
	25	309	7.96	27	112	88
	50	327	13.74	63	117	92
	75	322	11.14	55	119	93
	100	306	8.60	34	113	95
	150	298	7.51	32	121	96

La Tabla 4 resume los parámetros electroquímicos anteriormente discutidos para ambos medios en ausencia y presencia de IC.

La eficiencia de inhibición puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$EI(\%) = \frac{i_{corr} - i_{corr(inh)}}{i_{corr}} \times 100 \quad (22)$$

Donde i_{corr} y $i_{corr(inh)}$ son densidad de corriente para la muestra en blanco y en presencia de inhibidor.

La Figura 9 Muestra el comportamiento de la EI previamente calculada con la ecuación 22. Del análisis de la Figura 9, se observa que conforme incrementa la concentración la EI incrementa. Este fenómeno es asociado a una mayor disponibilidad de moléculas, las cuales pueden ocupar un mayor número de sitios activos. Este fenómeno ha sido reportado de igual manera por otros autores, que sugieren que los iones OH⁻, O²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, etc. (Namitha, Rao, & Rao, 2022), no pueden ocupar sitios activos y estos son rechazados por las moléculas de IC. Así mismo, como las moléculas de agua solo están adsorbidas en la superficie, estas pueden ser desplazadas y ser

sustituidas por moléculas $[\text{BMIM}]\text{N}(\text{CN})_2$, debido a que la configuración química del $[\text{BMIM}]\text{N}(\text{CN})_2$ posee grupos funcionales que pueden formar enlaces químicos estables con la superficie del acero (Obot, Macdonald, & Gasem, 2015). Del análisis de la EI de $[\text{BMIM}]\text{N}(\text{CN})_2$, es claro que la configuración química que posee el catión como el anión juegan un papel importante en la orientación y formación de enlaces de coordinación con el acero estudiado.

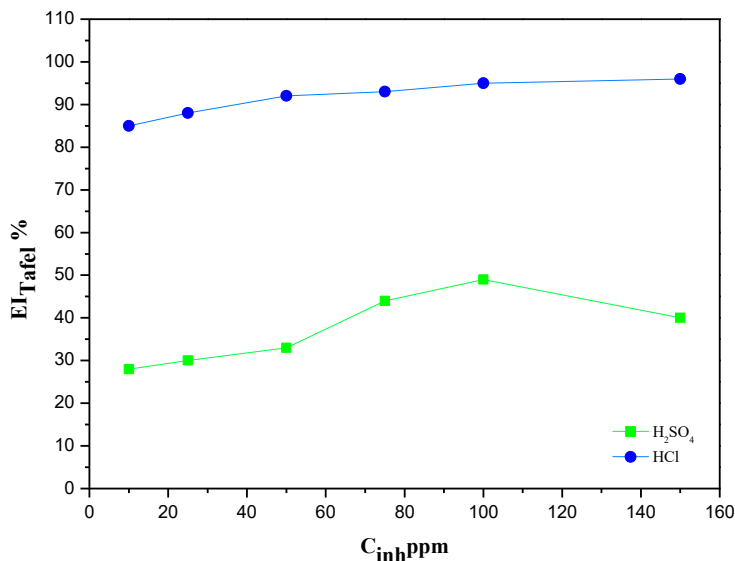


Figura 9. EI de curvas de polarización potenciodinámica

3.3 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

De igual manera que la sección anterior, se procedió a calcular la EI por la técnica electroquímica de EIS del $[\text{BMIM}]\text{N}(\text{CN})_2$ del acero API 5L X52 en soluciones de H_2SO_4 y HCl 1 M, tanto en ausencia como en presencia del líquido iónico $[\text{BMIM}]\text{N}(\text{CN})_2$. Una de las ventajas de la decisión de usar EIS, es por la profundidad de información que puede ser obtenida del estudio de la interfase metal-solución. Las Figura 10 a 13 muestran las curvas de Nyquist y Bode correspondientes al medio de H_2SO_4 1 M y HCl 1 M, en función de la concentración de IC. En las Figuras 10 y 12 en los diagramas de Nyquist se observó un aumento en el diámetro del semicírculo para las pruebas realizadas con la presencia de LI en comparación con el diámetro del semicírculo formado por la prueba con la ausencia algún LI (blanco). En ambos medios el aumento del semicírculo está asociado a la protección de la superficie del acero, debido a que los procesos de transferencia de

carga son reducidos por la adsorción de moléculas de LI, mismas que evidencian la formación de una película protectora sobre la superficie del acero, lo que se traduce en la disminución de los procesos corrosivos de la superficie del acero (Prodromidis, 2023).

Mientras que en los gráficos de Bode mostrados en las Figuras 11 y 13 en presencia de IC se evidencia en algunas concentraciones la presencia de solo una constante de tiempo, atribuida a una resistencia de transferencia de carga (R_{ct}). Mientras que en otros casos existen dos constantes de tiempo en el diagrama de Bode, que de igual manera corresponden a la resistencia de transferencia de carga y a las moléculas de los LIs. Un aumento en el ángulo de fase y en el módulo de impedancia real se obtuvo para la mayoría de las pruebas realizadas, esto sugiere la protección del hierro de acuerdo ha sido reportado.

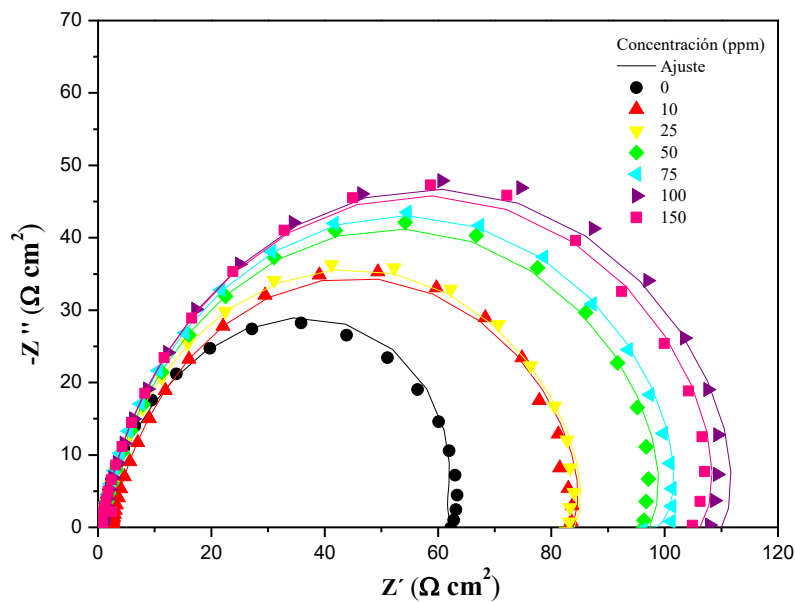


Figura 10. Curva de Impedancia de Nyquist obtenido del acero API 5L X52 en H_2SO_4 1M en diferentes concentraciones de LI $[BMIM]N(CN)_2$

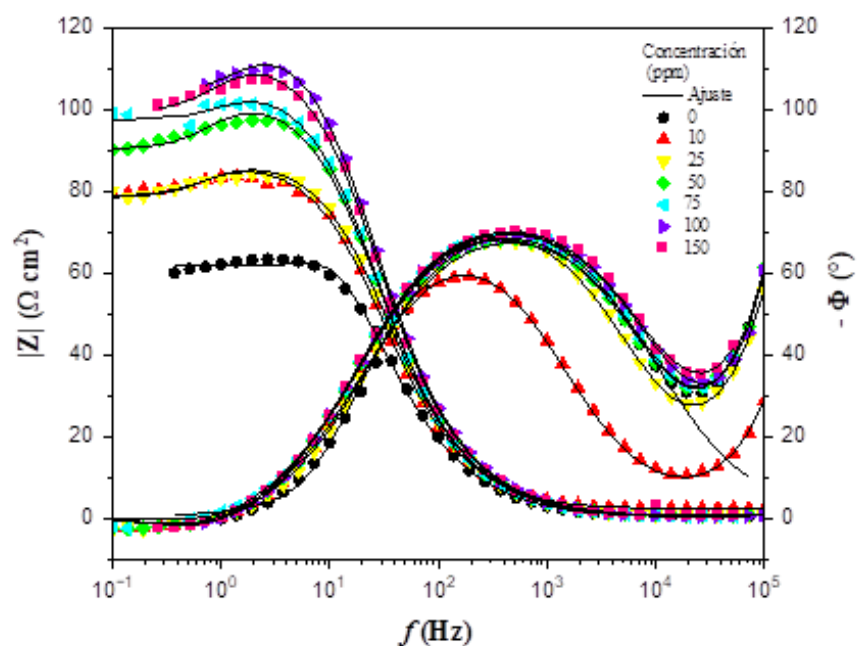


Figura 11. Diagrama de Bode obtenido del acero API 5L X52 en H_2SO_4 1M en diferentes concentraciones de LI $[\text{BMIM}]\text{N}(\text{CN})_2$

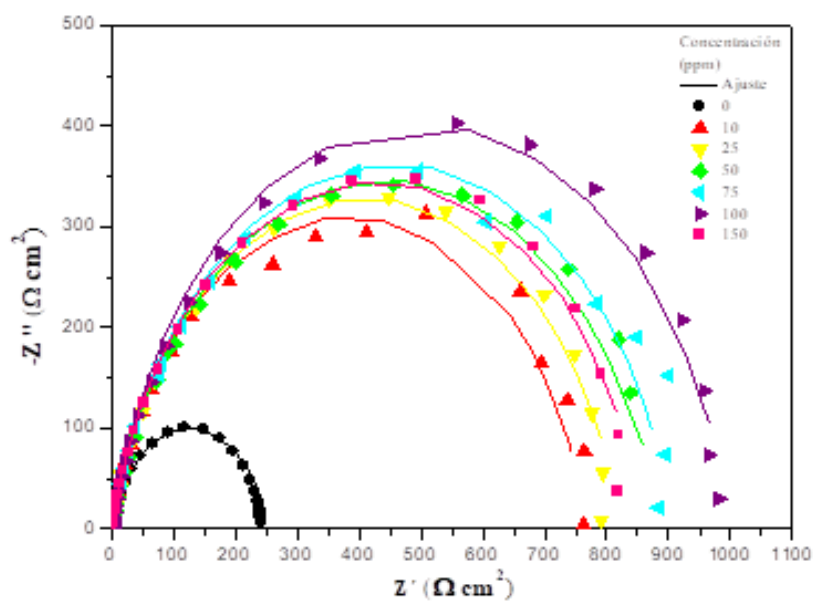


Figura 12. Curva de Impedancia de Nyquist obtenido del acero API 5L X52 en HCl 1M en diferentes concentraciones de LI $[\text{BMIM}]\text{N}(\text{CN})_2$

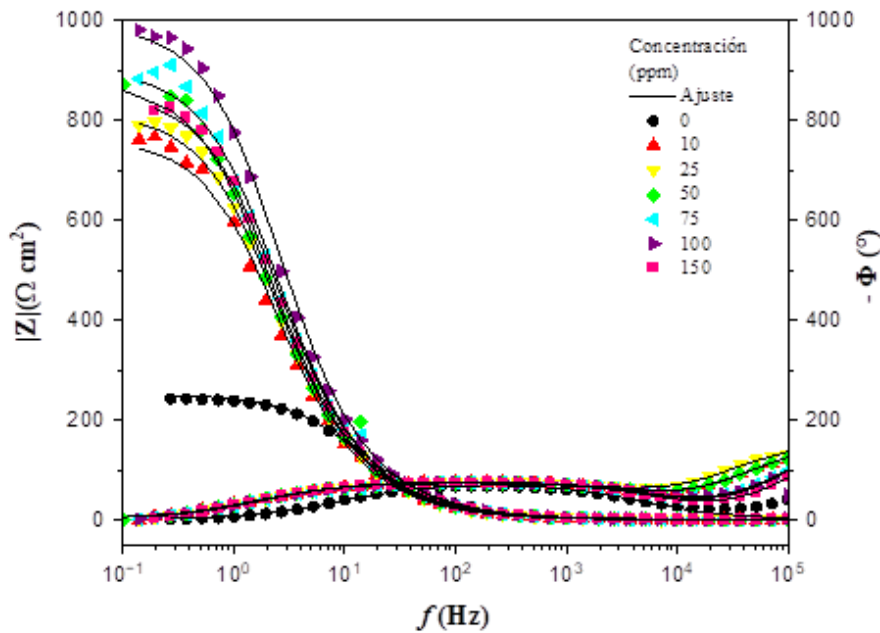


Figura 13. Diagrama de Bode obtenido del acero API 5L X52 en HCl 1M en diferentes concentraciones de LI $[\text{BMIM}]\text{N}(\text{CN})_2$

Para facilitar la interpretación física de los espectros de EIS (Nyquist y Bode), estos fueron ajustados mediante un Circuito Eléctrico Equivalente (EEC) que se muestran en la Figura 14. En una etapa inicial se partió del circuito más simple denominado Randles y debido a la complejidad de los fenómenos en la interfaz metal-solución se recurrió a una variedad de EEC, que en su mayoría poseen diferentes tipos de resistencias y elementos de fase constante (CPE por sus siglas en inglés).

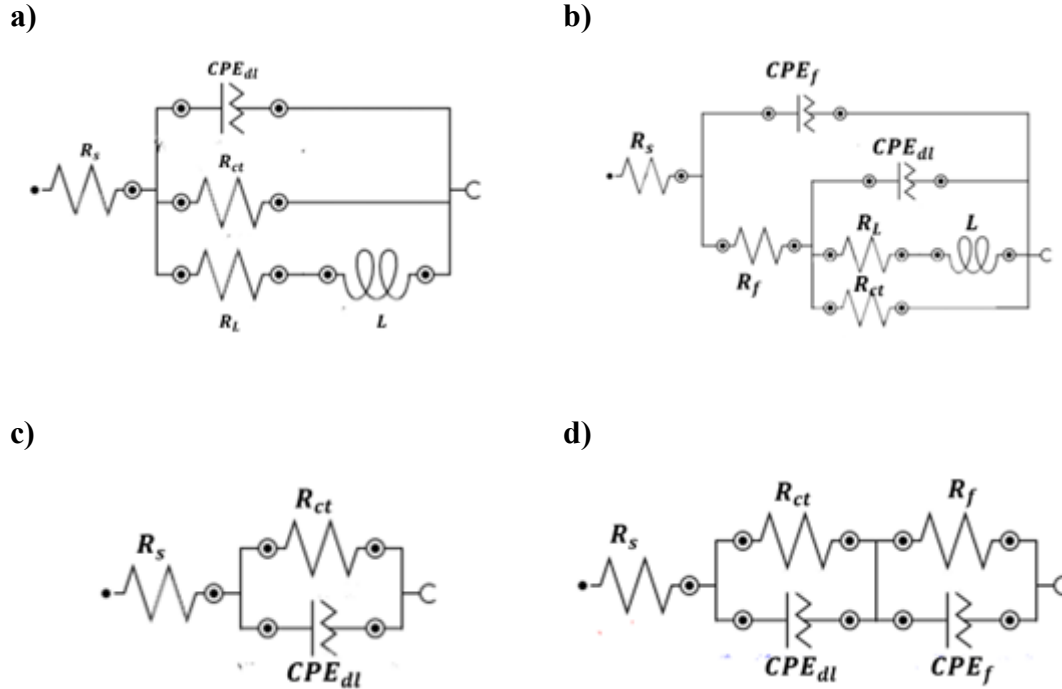


Figura 14. Circuito Eléctrico Equivalente de Randles modificado y aplicado al acero API 5L X52 en: **a)** H_2SO_4 en ausencia, **b)** H_2SO_4 en presencia del líquido iónico, **c)** HCl en ausencia y **d)** HCl en presencia del líquido iónico.

En la figura 14 resaltan las variables R_s relacionada con la resistencia a la solución, CPE_1 o CPE_2 significan elemento de fase constante, R_{ct1} y R_{ct2} es la resistencia a la transferencia de carga. Como se muestra en la tabla 5, se compararon los valores de R_p para H_2SO_4 hay una variación desde $77 \Omega \text{ cm}^2$ a 0 ppm hasta $105 \Omega \text{ cm}^2$ a 100 ppm y de $168 \Omega \text{ cm}^2$ a 0 ppm hasta $999 \Omega \text{ cm}^2$ a 100 ppm para HCl lo que indica que el sistema con mayor R_p presenta una menor velocidad de corrosión indicando una mayor eficiencia protectora. Con respecto a la literatura “n” está relacionado con la homogeneidad de la superficie, de modo que valores cercanos a la unidad sugieren que la superficie del acero es completamente homogénea (Chafiq, et al., 2020). Los valores de n obtenidos varían para cada prueba, obteniéndose entre 0.839 y 0.868 para H_2SO_4 , mientras que 0.768 y 0.865 para HCl debido a que la superficie del acero no es completamente homogénea, corroborado de igual manera con la forma de los diagramas de Nyquist. Es conocido que valores obtenidos de $n=0$ indican que la superficie del acero es un resistor puro, de $n = 1$ es un capacitor puro, de $n = -1$ un inductor puro y valores entre $0 < n < 1$ un elemento de fase constante. El incremento de R_{ct}

sugiere que el líquido iónico actúa de manera más eficiente como inhibidor de la corrosión en función de la concentración, a pesar de ello, es evidente que a la concentración de 100 ppm de HCl 1M la adsorción del LI es más eficiente debido a una adecuada orientación y distribución de moléculas sobre la superficie del acero. Algunos autores han evidenciado que el incremento de la concentración de IC no tiene una relación lineal con la EI, debido a una sobresaturación o desestabilización de la capa protectora, ocasionando una ligera disminución del diámetro del semicírculo (Prodromidis, 2023).

La EI_{EIS} fue calculada con la siguiente ecuación 23

$$EI_{EIS}(\%) = \frac{R_p^{inh} - R_p^0}{R_p^{inh}} \times 100 \quad (23)$$

donde R_p^{inh} y R_p^0 corresponde a la resistencia a la polarización con la presencia de inhibidor y sin la presencia de inhibidor respectivamente. Donde R_p fue calculada con las siguientes expresiones:

$$R_p = R_{ct} + R_f \quad (24)$$

$$R_{p_{EIS}} = R_f + \frac{R_{ct}R_L}{R_{ct} + R_L} \quad (25)$$

La Figura 15 muestra el comportamiento de la EI_{EIS} como función de la concentración, nuevamente se comprueba un comportamiento similar obtenido por la técnica electroquímica de Tafel. En este caso la máxima EI_{EIS} fue de 27% en H_2SO_4 1M a 100 ppm y 83% en HCl 1M a 100 ppm, implicando que a esta concentración las moléculas se observan eficientemente sobre los sitios activos del acero.

Tabla 5. Parámetros EIS obtenidos del acero API 5L X52 en H₂SO₄ y HCl 1.0 M a diferentes concentraciones de LI [BMIM]N(CN)₂.

Medio	C _{inh} (ppm)	χ ²	R _s (Ω cm ²)	n _{dl}	C _{dl} (μF cm ⁻²)	R _{ct} (Ω cm ²)	n _r	C _f (μF cm ⁻²)	R _r (Ω cm ²)	R _p (Ω cm ²)	EI _{EIS} (%)
H₂SO₄	0	0.781	0.43	0.839	9.68×10 ⁻⁰⁵	77	-	-	-	77	-
	10	0.011	-0.76	0.861	8.44×10 ⁻⁰⁵	86	1.09	1.98×10 ⁻⁰⁷	3.267	80	3
	25	0.009	-1.57	0.868	7.45×10 ⁻⁰⁵	88	1.05	2.43×10 ⁻⁰⁷	2.304	80	4
	50	0.009	-1.36	0.854	7.63×10 ⁻⁰⁵	104	1.10	3.27×10 ⁻⁰⁷	1.976	92	16
	75	0.006	-1.57	0.865	7.64×10 ⁻⁰⁵	107	1.08	2.53×10 ⁻⁰⁷	2.137	99	22
	100	0.005	-0.83	0.854	6.90×10 ⁻⁰⁵	120	1.17	5.75×10 ⁻⁰⁷	1.395	105	27
	150	0.556	-1.68	0.861	7.03×10 ⁻⁰⁵	114	0.98	1.89×10 ⁻⁰⁷	2.222	101	24
HCl	0	0.201	1.80	0.768	1.50×10 ⁻⁰⁵	168	-	-	-	168	-
	10	0.070	-1.93	0.865	1.24×10 ⁻⁰⁴	766	0.73	5.67×10 ⁻⁰⁷	2.479	769	78
	25	0.082	-1.81	0.860	1.18×10 ⁻⁰⁴	820	0.68	9.27×10 ⁻⁰⁷	2.353	822	80
	50	0.183	-1.74	0.844	1.17×10 ⁻⁰⁴	885	0.78	7.55×10 ⁻⁰⁷	2.288	888	81
	75	0.077	-1.77	0.857	1.04×10 ⁻⁰⁴	908	1.02	4.92×10 ⁻⁰⁷	2.294	911	82
	100	0.689	-1.81	0.864	9.03×10 ⁻⁰⁵	996	1.10	5.10×10 ⁻⁰⁷	2.348	999	83
	150	0.031	-1.72	0.860	1.06×10 ⁻⁰⁴	859	1.09	4.08×10 ⁻⁰⁷	2.268	861	81

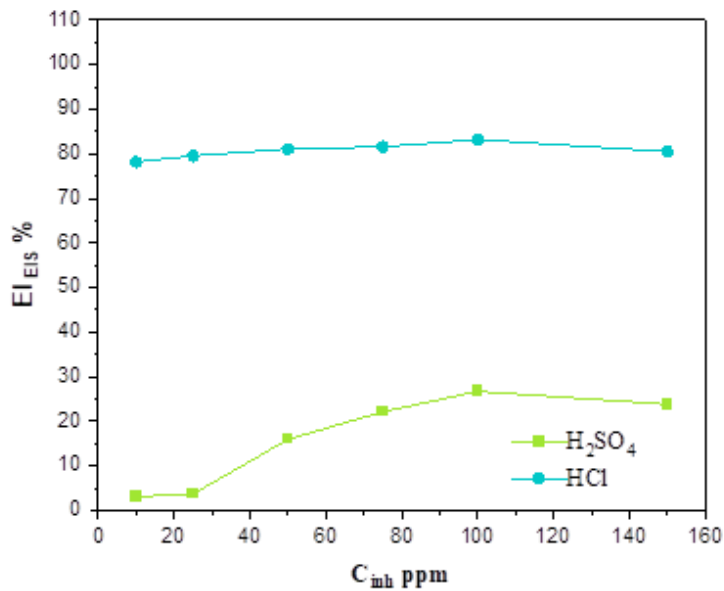


Figura 15. EI de Espectroscopia de Impedancia electroquímica

3.4 Isotermas de Adsorción

Debido a que el proceso de adsorción de un inhibidor esta predominando por fenómenos físicos/químicos, es necesario tener presente que, al adsorberse un LI sobre la superficie metálica la interfaz metal/solución es modificada y las propiedades de la transferencia de carga eléctrica se verán afectadas. Esto indica que cualquier molécula de un IC antes de ser adsorbida, estas deberán primero desplazar las moléculas de agua localizadas sobre la superficie del acero y una vez realizado este proceso, las moléculas de inhibidor deberán adsorberse rápidamente sobre los sitios activos. Por ello, la eficiencia de inhibición de un LI depende de su capacidad de adsorberse sobre la superficie metálica, ya sea por la donación de electrones o por fuerzas de enlace físicas. Una herramienta que ha sido empleada en el estudio de IC y que frecuentemente es citada, es el uso de isotermas de adsorción (Ituen, Akaranta, & James, 2017). A pesar de que una isoterma de adsorción es un modelo idealizado de la superficie, al considerarla libre de productos de corrosión y de imperfecciones superficiales. Estas pueden proporcionar información valiosa sobre la interacción metal-inhibidor. La figura 16 muestra un ejemplo sencillo de un proceso de adsorción de moléculas sobre una superficie metálica.

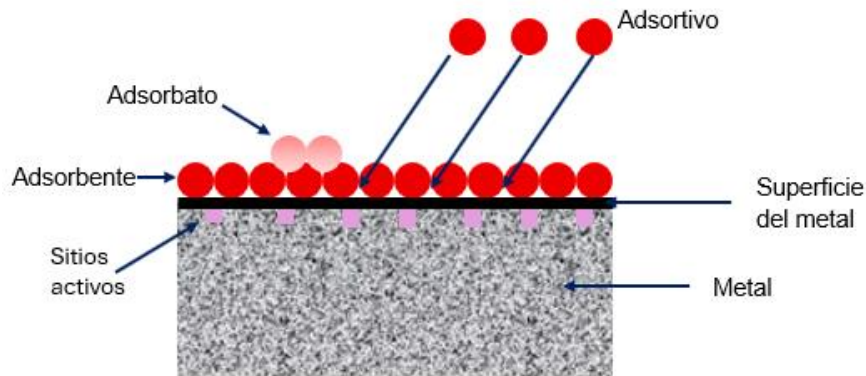


Figura 16. Proceso de adsorción en una superficie metálica

Entre las isotermas de adsorción más empleadas en el estudio de IC del tipo de LI se tienen las siguientes expresiones: Temkin (26), Flory-Huggins (27), Frumkin (28), Freundlich (29) y Langmuir (30).

$$\exp(-2a\theta) = KC \quad (26)$$

$$\log\left(\frac{\theta}{c}\right) = \log K + x\log(1 - \theta) \quad (27)$$

$$\log \left\{ [C] \times \left(\frac{\theta}{1-\theta} \right) \right\} = 2.303 \log K + 2\alpha\theta \quad (28)$$

$$KC = \theta \quad (29)$$

$$\frac{c}{\theta} = \frac{1}{K} + C \quad (30)$$

Donde K representa la constante de equilibrio de adsorción. Para obtener las isotermas de adsorción, se calculó el grado de superficie cubierta (θ) apoyándonos de la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{EI_{PT}}{100} \quad (31)$$

De las expresiones citadas, la isoterma de Langmuir fue la que mejor describió el comportamiento de adsorción del LI. En la Figura 17 y 18 muestran dicho comportamiento, donde el coeficiente de correlación en HCl y H₂SO₄ fue de 0.99 y 0.94, respectivamente. De la regresión lineal de la expresión 31, se obtuvo la constante de equilibrio de adsorción (K_{ads}) (tabla 6) la cual fue de 158.73 [Lmol⁻¹] en HCl y 3.894 [Lmol⁻¹] en H₂SO₄ en los medios evaluados.

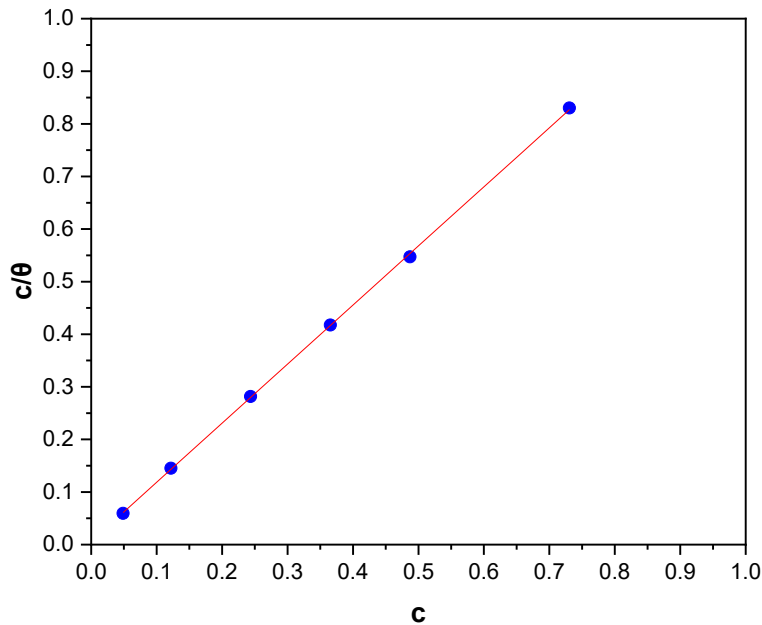


Figura 17. Isoterma de Langmuir en HCl

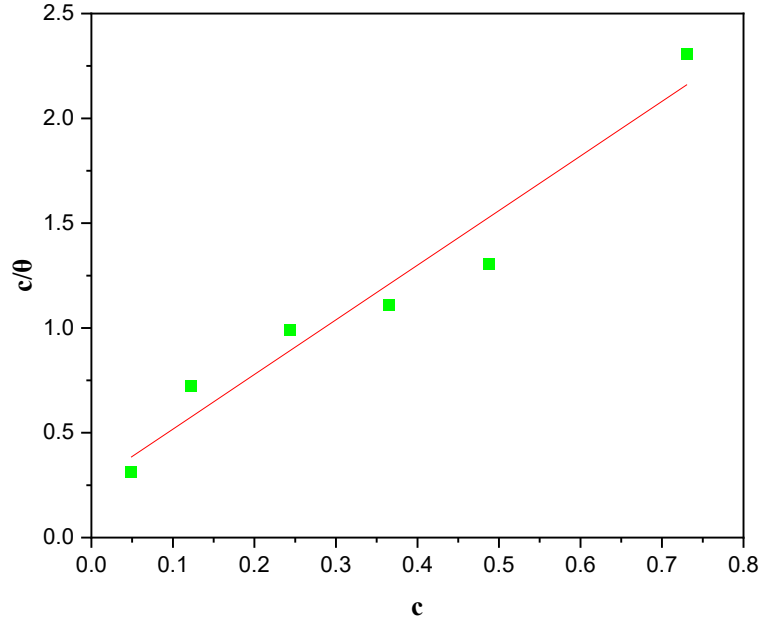


Figura 18. Isotherma de Langmuir en H₂SO₄

Tabla 6. Valores de K_{ads} obtenidos para el líquido iónico [BMIM]N(CN)₂

Medio	Isotherma	m	b	R ²	K _{ads} [L/mol]	ΔG (kJ/mol)
HCl	Langmuir	1.1847	0.0063	0.9998	158.730	-22.517
H ₂ SO ₄	Langmuir	2.6059	0.2568	0.9446	3.894	-13.326

En la evaluación del IC la energía libre de Gibbs está directamente relacionada con el tipo de adsorción de una molécula a la superficie metálica. La expresión que relaciona la ΔG es la ecuación (32):

$$\Delta G_{ads} = -RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (32)$$

donde R es la constante de los gases ideales (8.314 kJ/mol K), T es la temperatura absoluta del medio ácido (K), K_{ads} es la constante de equilibrio de adsorción obtenida de la regresión lineal de la ecuación de Langmuir y 55.5 es la concentración molar de agua en disolución. Para ello, es

importante considerar que un valor negativo de la energía libre de Gibbs indica un proceso de adsorción es espontáneo, originando la formación de una capa adsorbida de moléculas de IC sobre la superficie del acero API 5L X52. Esto ocurre debido a que antes de la adición del inhibidor sobre la superficie del acero, las moléculas de agua se mueven aleatoriamente sobre la superficie, cuando el inhibidor es agregado las moléculas son absorbidas ordenadamente sobre la superficie del acero, ocurriendo una disminución en la entropía. Se ha reportado que valores iguales a -20 kJ/mol o menos negativos corresponden a un proceso de adsorción física, es decir, la adsorción entre las moléculas del LI y el acero ocurre a través de atracciones electrostáticas o por fuerzas de Van der Waals. Valores de -40 kJ/mol o más negativos corresponden a un proceso de adsorción química, lo que significa que las moléculas del LI interactúan con el acero al compartir o transferir electrones formando enlaces coordinados (Okafor & Zheng, 2009). En el caso de estudio del valor de ΔG_{ads} fue -22.517 y -13.326 (KJ/mol) para el medio de HCl y H₂SO₄ 1M, respectivamente como muestra la Tabla 6. Los resultados confirman que el proceso de adsorción del LI fue de tipo quimi/fisiorción. Sucediendo de la siguiente manera: en primer lugar, se observa en la estructura química del LI, posee zonas con alta densidad electrónica que permite que el proceso de quimisorción se lleve a cabo por la retrodonación de electrones entre el anillo aromático y átomos de nitrógeno con los átomos de hierro. Además, se forman enlaces de tipo π entre el anillo y la superficie del acero en las zonas catódicas. En la zona anódica, el proceso de inhibición ocurre principalmente por fuerzas de Van der Waals siendo el anión del LI la parte responsable.

3.5 Mecanismo de inhibición

3.5.1 Mecanismo de inhibición del acero API 5L X52 en H₂SO₄ en presencia y ausencia de IC

La primera reacción que ocurre dentro del sistema es la disociación del ácido sulfúrico en el medio. En primera instancia, el H₂SO₄ en solución se disocia en dos etapas, dando la formación de dos protones (H⁺) (Reacciones 33 y 34) (Javidi, Abadeh, Namazi, Yazdanpanah, & Shiri, 2024).

Primera disociación

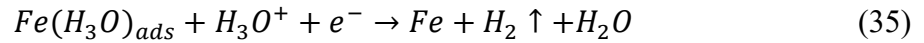


Segunda disociación

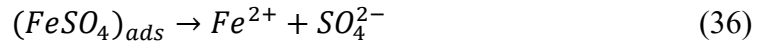


Cuando el acero al carbono entra en contacto con ácido sulfúrico diluido, se produce un ataque inmediato al metal y, de manera, simultánea, ocurre la formación de hidrógeno (evolución de hidrógeno o producción de hidrógeno gaseoso) (reacción 35) (Deyab, Zaky, & Nessim, 2017) e iones ferrosos (disolución anódica del metal) (Reacción 36); donde es relevante mencionar que la reacción de oxidación del hierro se produce en la fase ferrita, mientras tanto la reacción de reducción catódica del hidrógeno se produce en la fase cementita (Ouarga, et al., 2023).

Reacción catódica en solución ácida:

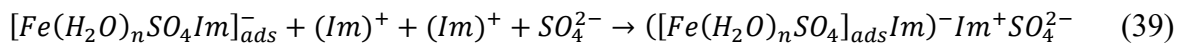
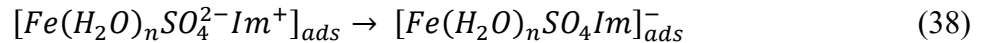
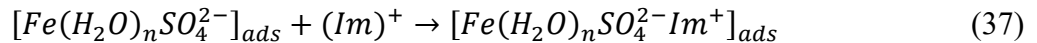


Disolución anódica del hierro:



Se observa que los iones SO_4^{2-} son atraídos hacia las zonas anódicas de la superficie del acero, siendo adsorbidas para formar el complejo $FeSO_4^{2-}$, posteriormente al perder sus electrones forman el $FeSO_4$, el cual es liberado a la solución en forma de Fe^{2+} y SO_4^{2-} . También se promovió la formación de sulfatos de hierro hidratados como rozenita y melanterita, de igual manera se pudieron generar oxihidroxidos de hierro como akagenita, lepidocrocita y/o goethita (Gómez-Sánchez, et al., 2019; Likhanova, et al., 2010).

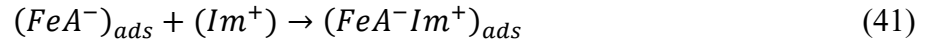
El mecanismo de las reacciones anódicas (reacción: 37-39) describen la adsorción del LI a partir del complejo formado $[Fe(H_2O)_nSO_4^{2-}]_{ads}$ atrayendo al catión del LI estudiado $(Im)^+$.



La interacción inicial de los iones SO_4^{2-} y la superficie cargada positivamente es a través de fuerzas coulombicas (reacción 37), formando el complejo $[Fe(H_2O)_nSO_4^{2-}]_{ads}$ que atrae a los iones $(Im)^+$ por medio de una adsorción física (fuerzas electroestáticas) formándose una capa $[Fe(H_2O)_nSO_4^{2-}Im^+]_{ads}$.

La reacción 38 sugiere la generación del complejo $[Fe(H_2O)_nSO_4Im]_{ads}^-$, a partir de la posibilidad que el ion $(Im)^+$ acepte electrones aportados por la superficie del hierro. Esta suposición es

soportada con los resultados de las ΔG°_{ads} , donde dan la pauta a considerar un proceso de adsorción preferentemente químico en la superficie. Después, ocurre la formación de la película a partir de los iones presentes en el seno de la solución electrolítica (reacción 40). También sugiere que la interacción del anión del LI (A^{-}) con la superficie (reacción 40) atraen al $(Im)^{+}$ a partir de fuerzas de atracción generando el complejo $(FeA^{-}Im^{+})_{ads}$ (reacción 41).



En la figura 19 de forma esquemática muestra una explicación grafica del mecanismo de inhibición de los sitios anódicos de las reacciones anteriormente descritas para el medio de H_2SO_4 1M.

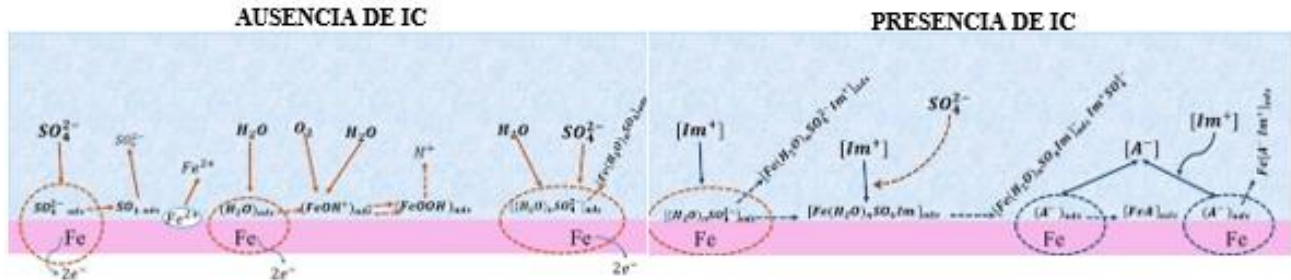
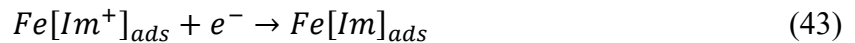
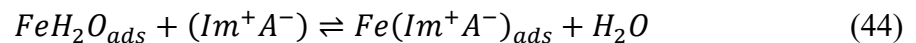


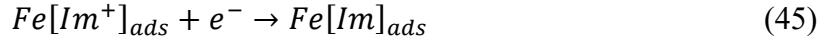
Figura 19. Mecanismo de inhibición de los sitios anódicos en el acero API 5L X52 expuesto a H_2SO_4 1M en ausencia y presencia de IC

En cuanto a la parte catódica en presencia de IC los iones $(Im)^{+}$, se atraen por medio de fuerzas de Van der Waals a la superficie del hierro, donde el proceso comienza por medio de la fisisorción (reacción 42), sin embargo, no se descarta la formación de complejos de hierro-LI por medio de un proceso de quimisorción (reacción 43) (Frini & Maaoui, 1997).



Las siguientes reacciones muestran que las moléculas de agua adsorbidas (reacción 44) son sustituidas por el LI (reacción 45), dejando la posibilidad de que este atraiga más iones inhibidores y/o corrosivos.





El mecanismo de adsorción se presenta en la figura 20, donde se observa la competencia de los iones H_3O^+ e Im^+ por ocupar los sitios catódicos del hierro.

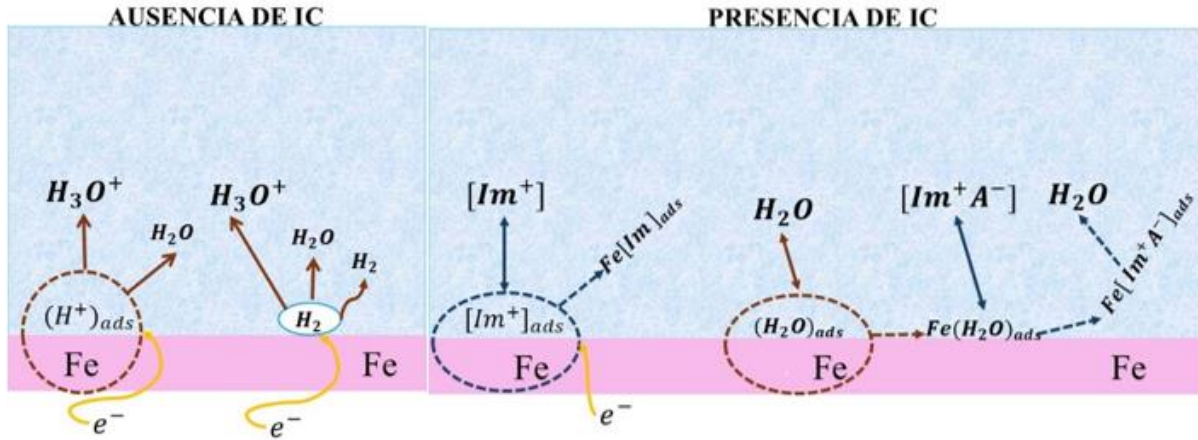
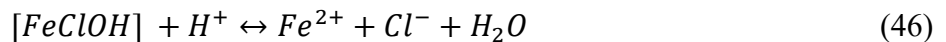


Figura 20. Mecanismo de inhibición de los sitios catódicos en el acero API X52 expuesto a H_2SO_4 y HCl en ausencia y presencia de IC

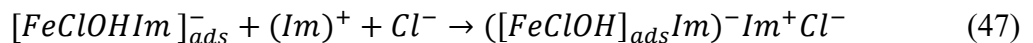
3.5.2 Mecanismo de inhibición del acero API 5L X52 en HCl en presencia y ausencia de IC

El proceso de corrosión del acero por HCl se divide en dos reacciones electroquímicas parciales esenciales: una anódica (reacción 46) y catódica. En primera instancia, el Fe , componente principal del acero, se oxida y se liberan iones Fe^{2+} al electrolito, proceso que genera electrones libres circulando por el metal. En este mecanismo, los intermediarios adsorbidos $[FeOH]_{ads}$ y $[FeClOH]_{ads}$ juegan un papel crucial en la determinación de la velocidad de disolución del acero (Lai, et al., 2016).

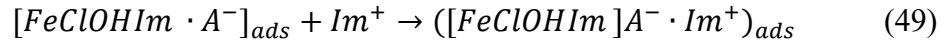
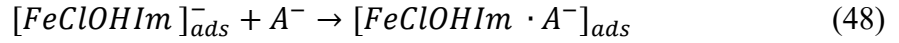
Reacción general:



El mecanismo anódico de la reacción 47 describe la adsorción del LI a partir del complejo formado atrayendo al catión del LI estudiado $(Im)^+$.



También se sugiere que la interacción del anión del LI (A^-) con la superficie (reacción 48) atrae al $(Im)^+$ a partir de fuerzas de atracción generando el complejo $([FeClOHIm]A^- \cdot Im^+)_{ads}$ (reacción 49).



En la figura 21 se muestra el mecanismo en presencia y ausencia del LI en el medio de HCl 1M.

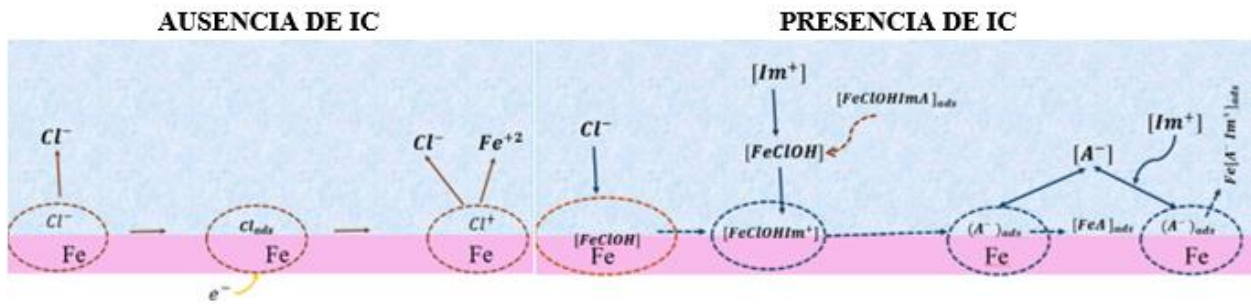


Figura 21. Mecanismo de inhibición de los sitios anódicos en el acero API 5L X52 expuesto a HCl 1M en ausencia y presencia de IC

Conclusiones

Las pruebas de PDP e EIS concluyeron que el LI 1-buti-3-metilimidazolio dicianamida actúa como inhibidor de la corrosión efectivo para el acero API X52 en los medios de HCl y H₂SO₄ 1M. Este fenómeno de inhibición se debió a la adsorción de moléculas del compuesto, las cuales bloquearon los sitios activos.

El mecanismo de protección del LI en HCl y H₂SO₄ 1M fueron totalmente diferentes y estuvieron relacionados principalmente al tipo de iones presentes en el medio [(HCl: Cl⁻, OH⁻ y O²⁻), (H₂SO₄: SO₄²⁻, O²⁻, OH⁻)]. Por ello, la capacidad de adsorción del LI fue diferente sobre la superficie.

Las pruebas PDP confirmaron que este compuesto puede ser clasificado como IC de tipo mixto con preferencia al lado anódico en HCl 1M, mientras que en H₂SO₄ 1M el LI se comportó como un IC de tipo anódico.

Las pruebas de EIS confirmaron nuevamente que la resistencia a la transferencia de carga eléctrica si es afectada por la presencia del LI. Además, la resistencia a la polarización evidenció la adsorción de moléculas de LI sobre la superficie del acero. Como resultado la máxima EI fue de 27% a 100 ppm para el medio de H₂SO₄ 1M y 83% a 100 ppm para el medio de HCl.

El estudio de isotermas de adsorción y parámetros termodinámicos reveló que el Líquido Iónico (LI) se adsorbe de manera espontánea sobre el acero API 5L X52, lo cual es confirmado por los valores negativos ΔG . El proceso se establece mediante un mecanismo mixto de quimisorción en las zonas catódicas (por retrodonación de electrones del anillo aromático) y la fisisorción en las zonas anódicas (por fuerzas de Van der Waals del anión). Esta acción dual garantizó la formación de una capa protectora estable.

El mecanismo de inhibición hipotético propuesto en el estudio para ambos medios, proporcionó una explicación de la importancia de la configuración química del catión y el anión, donde los grupos funcionales y anillo aromático fueron los responsables de la adsorción del compuesto con la superficie del acero.

Se concluye que el líquido iónico [BMIM]N(CN)₂ es un inhibidor de corrosión (IC) altamente eficiente para la protección del API 5L X52, Su desempeño fue superior en el medio de HCl que en H₂SO₄, lo cual subraya su potencial como protector en ambientes ácidos con iones cloruro

Bibliografia

- Abdulridha, A. A., Allah, M. A., Makki, S. Q., Sert, Y., Salman, H. E., & Balakit, A. A. (2020). Corrosion inhibition of carbon steel in 1 M H₂SO₄ using new Azo Schiff compound: Electrochemical, gravimetric, adsorption, surface and DFT studies. *Journal of Molecular Liquids*, 315, 113690. doi:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113690>
- Ahmed, S., Rubaye, A., Nawwi, S., Al-Musawi, A., Sayyid, F., Mustafa, A., . . . Kadhum, A. (2024). Investigating the corrosion inhibition properties of a Schiff base on mild steel in HCl solution: experimental and theoretical insights. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 13(3), 1355-1890.
- Al-Moubaraki, A. H., & Obot, I. B. (2021). Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook. *Journal of Saudi Chemical Society*, 25(12), 101370. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101370>
- Al-Rashed, O. A., & Nazeer, A. A. (2019). Ionic liquids with superior protection for mild steel in acidic media: Effects of anion, cation, and alkyl chain length. *Journal of Molecular Liquids*, 288, 111015. doi:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111015>
- Alzurairji, S., Kazem, M. H., Hasan, B. O., & Znad, H. T. (2024). The Effect of Flow Velocity on Corrosion and Corrosion Mitigation of Carbon Steel in Wide Range of Sulfuric Acid Concentration. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 27(1), 91-96. doi:<https://doi.org/10.29194/NJES.27010091>
- Arellanes Lozada, P., Olivares Xometl, O., Likhanova, N., Lijanova, I., Ramírez Garnica, M., & Arce Estrada, E. (2015). Evaluation of the corrosion inhibiting effect of an ionic liquid (N-dimethyl-N-di(cocoalkyl) ammonium methyl sulfate) on API 5L X52 steel in hydrochloric acid. *International journal of electrochemical science*. doi:[https://doi.org/10.1016/s1452-3981\(23\)04884-8](https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)04884-8)
- Ashassi-Sorkhabi, H., & Es'haghi, M. (2009). Corrosion inhibition of mild steel in acidic media by [BMIm]Br Ionic liquid. *Materials Chemistry and Physics*(114), 267–271. doi:[10.1016/j.matchemphys.2008.09.019](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.09.019)
- Askari, M., Aliofkhazraei, M., & Afroukhteh, S. (2019). A comprehensive review on internal corrosion and cracking of oil and gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. doi:[10.1016/J.JNGSE.2019.102971](https://doi.org/10.1016/J.JNGSE.2019.102971)
- Atrens, A., Johnston, S., Shi, Z., & Dargusch, M. S. (2017). Understanding magnesium corrosion a framework for improved alloy performance. *Advanced Engineering Materials*, 5(12), 11-20. doi:<https://doi.org/10.1002/adem.200310405>
- Bakhsheshi-Rad, H., Idris, M., Abdul-Kadir, M., Ourdjini, A., Medraj, M., Daroonparvar, M., & Hamzah, E. (2014). Mechanical and bio-corrosion properties of quaternary Mg–Ca–Mn–

- Zn alloys compared with binary Mg–Ca alloys. *Materials and Design*, 53, 283-292. doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.055
- Chafiq, M., A. Chaouiki, M.R. Al-Hadeethi, I.H. Ali, S.K. Mohamed, K. Toumiat, & Salghi, R. (2020). Naproxen-Based Hydrazones as Effective Corrosion Inhibitors for Mild Steel in 1.0 M HCl, Coatings. 1-17.
- Determinación de la velocidad de corrosión con INTELLO. (2023, D. 1.-n.-a.-a.-c.-0. (n.d.).
- Deyab, M., Zaky, M., & Nessim, M. (2017). Inhibition of acid corrosion of carbon steel using four imidazolium tetrafluoroborates ionic liquids. *Journal of Molecular Liquids*, 229, 396-404. doi:https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.12.092
- Elazhary, I., Laamari, M. R., Boutouil, A., Bahsis, L., Haddad, M. E., Anane, H., & Stiriba, S.-E. (2019). Comparative study of 1,2,3-triazole derivatives as corrosion inhibitors of mild steel in sulphuric acid solution. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 66(5), 544–555. doi:https://doi.org/10.1108/ACMM-10-2018-2018
- Elkholy, A. E., & Heikal, F. E.-T. (2018). Electrochemical measurements and semi-empirical calculations for understanding adsorption of novel cationic Gemini surfactant on carbon steel in H₂SO₄ solution. *Journal of Molecular Structure*, 1156, 473-482. doi:https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.12.003
- El-Nagar, R. A., Khalil, N. A., Atef, Y., Nessim, M. I., & Ghanem, A. (2024). Evaluation of ionic liquids based imidazolium salts as an environmentally friendly corrosion inhibitors for carbon steel in HCl solutions. *Scientific reports*. doi:https://doi.org/10.1038/s41598-024-52174-5
- Far, S. E., Glenn, M., Davoodi, A., & Rahimi, A. (2022). . Electrochemical Study of Corrosion Inhibition Behavior of Dehydroabietylamine Against Mild Steel in 1 M HCl. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 58, 190-199. doi:https://doi.org/10.1134/S2070205122010099
- Frini, A., & Maaoui, M. E. (1997). Kinetics of the Formation of Goethite in the Presence of Sulfates and Chlorides of Monovalent Cations. *Journal of Colloid and Interface Science*, 190(2), 269-277. doi:https://doi.org/10.1006/jcis.1997.4845
- Gómez-Sánchez, G., Likhanova, N. V., Arellanes-Lozada, P., Arriola-Morales, J., Nava, N., Olivares-Xometl, O., . . . Corro, G. (2019). Electrochemical, Surface and 1018-steel Corrosion Product Characterization in Sulfuric Acid with New Imidazole-Derived Inhibitors. *International Journal of Electrochemical Science*, 14(9), 9255-9272. doi:https://doi.org/10.20964/2019.09.65

- Groysman, A. (2017). Corrosion Problems and Solutions in Oil Refining and Petrochemical Industry. *Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality* 32. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-45256-2>
- Hassan, H. S., Rashid, K. H., AL-Azawi, K. F., & Khadom, A. A. (2024). A combined experimental and theoretical study into the effect of new heterocyclic compound containing β -lactam ring as corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid. *Results in Surfaces and Interfaces*, 17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100319>
- Hazazi, O. A., Fawzy, A., & Awad, M. (2014). Synergistic Effect of Halides on the Corrosion Inhibition of MildSteel in H₂SO₄ by a Triazole Derivative: Kinetics and Thermodynamic Studies. *International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE*, 9, 4086-4103.
- Hsissou, R., About, S., Benhiba, F., Seghiri, R., Safi, Z., Kaya, S., . . . Harfi, A. E. (2021). Insight into the corrosion inhibition of novel macromolecular epoxy resin as highly efficient inhibitor for carbon steel in acidic mediums: Synthesis, characterization, electrochemical techniques, AFM/UV–Visible and computational investigations. *Journal of Molecular Liquids*, 337, 116492. doi:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116492>
- Huang, Q., Lu, G., Wang, J., & Yu, J. (2011). Thermal decomposition mechanisms of MgCl₂·6H₂O and MgCl₂·H₂O. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 91(1), 159-164. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.02.005>
- Huanga, P., Bao, Y., & Yao, Y. (2005). Influence of HCl corrosion on the mechanical properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 584-589. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.027>
- Ituen, E. B., Akaranta, O., & Umoren, S. A. (2017). N-acetyl cysteine based corrosion inhibitor formulations for steel protection in 15% HCl solution. *Journal of Molecular Liquids*, 246, 112-118. doi:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.09.040>
- Ituen, E., Akaranta, O., & James, A. (2017). Evaluation of Performance of Corrosion Inhibitors Using Adsorption Isotherm Models: An Overview. *Chemical Science International Journal*, 18(1), 1-34. doi:10.9734/CSJI/2017/28976
- James G. Speight PhD, D. (2014). Chapter 3 - Corrosion in Refinery Units. In *Oil and Gas Corrosion Prevention* (pp. 39-66). doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800346-6.00003-X>
- Javidi, M., Abadeh, H. K., Namazi, F., Yazdanpanah, H. R., & Shiri, N. S. (2024). A new perspective on the corrosion of carbon steels in H₂SO₄ acid environments: Statistical analysis of corrosion mechanisms by response surface modeling. *Materials Chemistry and Physics*, 312, 128608. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128608>

- Kaya, S., & Obot, I. B. (2021). Evaluation of 1-butyl-3-methylimidazolium methanesulfonate as an efficient ionic liquid inhibitor for mild steel corrosion in H₂SO₄ medium: Experimental and theoretical insights. *Journal of Molecular Liquids*, 330(115600). doi:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115600>
- Kedimar, N., Rao, P., & Rao, S. A. (2024). Imidazole-based ionic liquid as sustainable green inhibitor for corrosion control of steel alloys:A review. *Journal of Molecular Liquids*, 411(125789). doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125789>
- Khamme, E., & Sakdanuphab, R. (2023). Study of corrosion properties of carbon steel, 304 and 316L stainless steels in sulfuric acid and their degradation products. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 33(4), 1672. doi:<https://doi.org/10.55713/jmmm.v33i4.1672>
- Kirkland, N. T., Birbilis, N., & Staiger, M. P. (2012). Assessing the corrosion of biodegradable magnesium implants: a critical review of current methodologies and their limitations. *Acta Biomater*, 925-936. doi:10.1016/j.actbio.2011.11.014
- Kousar, K., Walczak, M., Ljungdahl, T., A. Wetzel, H. O., P. Restuccia, E. A., & N. M. Harrison, R. L. (2021). Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid: Elucidating the performance of an imidazoline-based surfactant. *Corrosion Science*, 180(109195). doi:<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.109195>
- Kumar, A. (2017). *Applied Metallurgy and Corrosion Control: A Handbook for the* .
- Lai, C., Yang, H., Guo, X., Su, X., Zhou, L., Zhang, L., & Xie, B. (2016). Adsorption and Corrosion Inhibition Performance of 2-(p-bromobenzylthio)-1H-benzimidazole for Q235 Steel in HCl Solution. *International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE*, 11, 10462 – 10472. doi:10.20964/2016.12.78
- Li, W., Qiang, Y., & Guo, L. (2023). Corrosion inhibition performance of 1-alkyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide for API 5L X52 steel in sulfuric acid: Experimental and theoretical investigations. *Journal of Molecular Liquids*, 381(121709). doi:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121709>
- Likhanova, N. V., Domínguez-Aguilar, M. A., Olivares-Xometl, O., Nava-Entzana, N., Arce, E., & Dorantes, H. (2010). The effect of ionic liquids with imidazolium and pyridinium cations on the corrosion inhibition of mild steel in acidic environment. *Corrosion Science*, 52, 2088–2097. doi:10.1016/j.corsci.2010.02.030
- LLovet de Armas, N. F., & Adames Montero, Y. y. (2022). Electrochemical behavior of corrosion inhibitor used in atmospheric distillation column top system. *Rev. CENIC Cienc. Quím.*, 53(1), 12-22.

- Lu, Y. (2024). Synergistic corrosion inhibition effect of N-benzyl pyridinium chloride and three cationic surfactants in the H₂S/CO₂/NaCl solution. *Inorganic Chemistry Communications*, 167, 112745. doi:<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112745>
- Metrohm. (2023, Diciembre 18). *Metrohm*. Retrieved from https://www.metrohm.com/es_mx/applications/application-notes/autolab-applikationen-anautolab/an-cor-019.html
- Mills, T., Prost-Domasky, S., Honeycutt, K., & Brooks, C. (2009). 3 - Corrosion and the threat to aircraft structural integrity. In *Corrosion Control in the Aerospace* (pp. 35-66). doi:<https://doi.org/10.1533/9781845695538.1.35>
- Murulana, L. C., Singh, A. K., Shukla, S. K., Kabanda, M. M., & Ebenso, E. E. (2012). Experimental and Quantum Chemical Studies of Some Bis(trifluoromethyl-sulfonyl) Imide Imidazolium-Based Ionic Liquids as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 13282–13299. doi:<https://doi.org/10.1021/ie300977d>
- Namitha, K., Rao, P., & Rao, S. A. (2022). A brief insight into the use of plant products as green inhibitors for corrosion mitigation of aluminium and aluminium alloys. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 429-441. doi:<https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2058155>
- Noor, E. A., & Al-Moubaraki, A. H. (2008). Corrosion Behavior of Mild Steel in Hydrochloric Acid Solutions. *International Journal of Electrochemical Science*, 3(7), 806-818. doi:[https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)15485-X](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)15485-X)
- Obot, I., Macdonald, D., & Gasem, Z. (2015). Density functional theory (DFT) as a powerful tool for designing new organic corrosion inhibitors. Part 1: An overview. *Corrosion Science*, 99, 1-30. doi:<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.014>
- Okafor, P. C., & Zheng, Y. (2009). Synergistic inhibition behaviour of methylbenzyl quaternary imidazoline derivative and iodide ions on mild steel in H₂SO₄ solutions. *Corrosion Science*, 51(4), 850-859. doi:<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.01.027>
- Ouadi, Y. E., Fal, M. E., Hafez, B., Manssouri, M., Ansari, A., Elmsellem, H., . . . Bendaif, H. (2020). Physisorption and corrosion inhibition of mild steel in 1 M HCl using a new pyrazolic compound: Experimental data & quantum chemical calculations. *materialstoday:PROCEEDINGS*, 27(4), 3010-3016. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.340>
- Ouakki, M., Aribou, Z., Hajri, F. E., Ech-chihbi, E., Benzekri, Z., Lachhab, R., . . . Cherkaoui, M. (2024). A study on the corrosion inhibition impact of newly synthesized quinazoline derivatives on mild steel in 1.0 M HCl: Experimental, surface morphological (SEM-EDS and FTIR) and computational analysis. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(11), 100795. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100795>

- Ouarga, A., Zirari, T., Fashu, S., Lahcini, M., Youcef, H. B., & Trabadelo, V. (2023). Corrosion of iron and nickel based alloys in sulphuric acid: Challenges and prevention strategies. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 5105-5125. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.198>
- Panossian, Z., Almeida, N. L., Sousa, R. M., Pimenta, G. d., & Marques, L. B. (2012). Corrosion of carbon steel pipes and tanks by concentrated sulfuric acid: A review. *Corrosion Science*, 58, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.01.025>
- Pathak, A. D., Tranca, I., Nedeá, S. V., Zondag, H. A., Rindt, C. C., & Smeulders, M. J. (2017). First-Principles Study of Chemical Mixtures of CaCl₂ and MgCl₂ Hydrates for Optimized Seasonal Heat Storage. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121(38), 20576-20590. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b05245>
- Prodromidis, A. C. (2023). Electrochemical Impedance Spectroscopy- A Tutorial. *ACS Measurement Science*(3), 162-193. doi:<https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00070>
- Qiao, K., & Zeng, Y. (2020). Comparative study on two imidazolium-based ionic liquid surfactants as corrosion inhibitors for N80 steel in 15% hydrochloric acid solution. *Materials and Corrosion*, 71(11), 1913-1926. doi:<https://doi.org/10.1002/maco.202011775>
- Ramos Rodríguez, H., & Hernández Morales, D. N. (2018). Fenómeno de corrosión en los aceros utilizados para la fabricación de tuberías de revestimiento y producción. *Geociencias*, 1(2), 123-130.
- Roy, P., Saha, S., Banerjee, P., Dey, S., & Sukul, D. (2017). Experimental and theoretical investigation towards anti-corrosive property of glutamic acid and poly- γ -glutamic acid for mild steel in 1 M HCl: intramolecular synergism due to copolymerization. *Research on Chemical Intermediates*, 43, 4423-4444. doi:<https://doi.org/10.1007/s11164-017-2887-6>
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Tecnología en Marcha*, 28(3), 127-136.
- Sastri, V. S. (2011). *Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice*. doi:10.1002/9781118015438
- Shwetha KM, Praveen, B., & Devendra, B. K. (2024). A review on corrosion inhibitors: Types, mechanisms, electrochemical analysis, corrosion rate and efficiency of corrosion inhibitors on mild steel in an acidic environment. *Results in Surfaces and Interfaces*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100258>
- Song, G., & Atrens, A. (2004). Understanding Magnesium Corrosion-A Framework for Improved Alloy Performance. *Advanced Engineering Materials*, 5(12), 837-858. doi:<https://doi.org/10.1002/adem.200310405>

- Tan, J., Guo, L., Wu, D., Wang, S., Yu, R., Zhang, F., & Kaya, S. (2020). Electrochemical and Computational Studies on the Corrosion Inhibition of Mild Steel by 1-Hexadecyl-3-methylimidazolium Bromide in HCl Medium. *International Journal of Electrochemical Science*, 15, 1893 – 1903. doi:10.20964/2020.03.36
- Tao, Z., Zhang, S., Li, W., & Hou., B. (2009). "Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by 1-octyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(5), 2593–2599. doi:10.1021/ie801366e
- Timoudan, N., Foujji, L. E., Qaiss, A. K., Safi, Z., Wazzan, N., Warad, I., . . . Zarrouk, A. (2025). Investigación experimental y teórica de la inhibición de la corrosión en acero al carbono mediante un derivado de benzimidazol. *Journal of Dispersion Science and Technology*. doi:https://doi.org/10.1080/01932691.2025.2499574
- Verma, C., Alrefae, S. H., Quraishi, M., Ebenso, E. E., & Hussain, C. M. (2021). Recent developments in sustainable corrosion inhibition using ionic liquids: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 321, 114484. doi:https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114484
- Verma, C., Ebenso, E. E., & Quraishi, M. (2017). Ionic liquids as green and sustainable corrosion inhibitors for metals and alloys: An overview. *Journal of Molecular Liquids*, 233, 403-414. doi:https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.111
- Weber, C., Knörnschild, G., & Dick, L. (2003). The negative-difference effect during the localized corrosion of magnesium and of the AZ91HP alloy. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 14(4), 11-20. doi:https://doi.org/10.1590/S0103-50532003000400015
- Yanqiong Guan, Y., Li, X., Yag, S., Wei, G., Qiu, L., & Deng, S. (2025). Amphoteric surfactant of dodecyl dimethyl betaine as an efficient inhibitor for the corrosion of steel in H2SO4 solution: Experimental studies and theoretical calculations. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 718(136894). doi:https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136894
- Zhang, S., Qiang, Y., & Guo, L. (2018). Experimental and theoretical studies of 1-butyl-2,3-dimethylimidazolium chloride as a green corrosion inhibitor for carbon steel in HCl solution. *Journal of Molecular Liquids*(255), 40-47. doi:https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.064
- Zhao, D., Wu, M., Kou, Y., & Min, E. (2002). Ionic liquids: applications in catalysis. *Catalysis Today*, 74(2), 157-189. doi:https://doi.org/10.1016/S0920-5861(01)00406-5
- Zhao, M.-C., Liu, M., Song, G.-L., & Atrens, A. (2008). Influence of pH and chloride ion concentration on the corrosion of Mg alloy ZE41. *Corrosion Science*, 50(11), 3168-3178. doi:https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.08.023

Zunita, M., & Kevin, Y. (2022). Ionic liquids as corrosion inhibitor: From research and development to commercialization. *Results in Engineering*, 15(100562). doi:<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100562>