



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (IICBA)

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp)

**Inhibidor de la corrosión a base de Cefalexina caduca para el
acero al carbono simulando atmósfera marina-industrial.**

TESIS

Para obtener el título de

Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

PRESENTA

Zayda Abigail Uribe Rosales

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Elsa Carmina Menchaca Campos



CUERNAVACA MORELOS, SEPTIEMBRE 2026

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

Mi más profundo agradecimiento a mi directora de tesis, la Dra. Elsa Carmina Menchaca Campos por su paciencia, dedicación, motivación, confianza y apoyo en la realización de la tesis. Contribuyeron a mi experiencia del gratificante camino de la investigación. También me gustaría agradecer al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de avanzar y finalizar mi carrera profesional.

Asimismo, quisiera expresar mi gratitud a todas las personas que contribuyeron con el desarrollo de mi investigación. Agradezco a todos los que me ayudaron a recopilar datos y a aquellos que dedicaron su tiempo a revisar mi trabajo. Los comentarios de mejora, y las sugerencias, esta tesis no sería la que es sin sus recomendaciones; al Mtro. Omar Alejandro González Noriega por su apoyo en la caracterización química y ayuda en el desarrollo, al Dr. Yohandry Díaz Blanco y Dr. César Augusto García Pérez por su apoyo. A mis compañeros en el laboratorio Citlali García, Danelly García y Mónica Meneses por hacer un buen ambiente laboral y por apoyar cuando se necesitara.

Un sincero agradecimiento a todos mis amigos y familiares que estuvieron conmigo en los momentos de estrés y alegría durante este largo y retador camino. Su apoyo, confianza, soporte y cariño han sido invaluable. Cada uno de ustedes ha contribuido a mi fortaleza y ánimo de una manera u otra.

DEDICATORIAS

A mi madre Teresa Rosales Nava a quien jamás encontraré la forma de agradecer por todos sus esfuerzos, sus desvelos, sus sacrificios y en especial su cariño. Gracias por guiar mi camino y estar siempre junto a mí en los momentos difíciles, por compartir tristezas y alegrías, éxitos y fracasos, por todos los detalles que me has brindado durante mi vida como estudiante y por hacer de mí lo que soy ahora.

A mi padre Damaso Uribe Castro que, aunque físicamente ya no está, me sigue enseñando, inspirando y mostrando mi camino. Sé que estarías muy orgulloso de mi, siempre estarás en mi corazón y en cada logro.

A mi hermana la Mtra. Ana Iris Uribe Rosales y a mi hermano el Lic. Oscar Agustín Orduña Amaral por acompañarme en este duro camino.

A mi abuelita Virginia Nava Ocampo por el amor que me ha dado, por sus consejos y por su apoyo incondicional.

A mi pareja el P.A Jared Aldair Luna García por estar a mi lado en los momentos de incertidumbre, por entenderme, por apoyarme en todo momento, por su amor incondicional y su ayuda dentro del laboratorio. Gracias por hacerme reír y por ser mi aliado en este largo camino.

Les agradezco por estar siempre en mi vida no sólo aportando buenas cosas, sino también por su gran apoyo en esta etapa de mi vida.

RESUMEN

En este proyecto se estudia el comportamiento electroquímico del acero AISI 1018 en medios que simulan condiciones marinas e industriales, utilizando cefalexina caduca como inhibidor de la corrosión. Para evaluar el comportamiento del sistema y la eficiencia de inhibición, se emplearon técnicas electroquímicas como el potencial de circuito abierto (OCP), espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), curvas de polarización potenciodinámica y resistencia a la polarización lineal (LPR), además de la técnica gravimétrica de pérdida de masa.

Los resultados de pérdida de masa muestran que la eficiencia de inhibición aumenta conforme se incrementa la concentración de cefalexina, obteniendo su mejor desempeño a 300 ppm. El análisis del OCP indica que, al aumentar la concentración del inhibidor, el potencial del sistema se desplaza hacia valores más nobles respecto al blanco. En curvas de polarización muestra cambios en la velocidad de las reacciones electroquímicas y en el mecanismo de corrosión respecto al sistema sin inhibidor además indica que la cefalexina actúa como un inhibidor de tipo mixto con predominancia catódica. Mediante LPR se observó un incremento de la resistencia a la polarización conforme aumenta la concentración del inhibidor, lo que indica una mayor resistencia frente a la corrosión. Los resultados de EIS muestran, además, que el mecanismo electroquímico se modifica tanto con el tiempo de exposición como con la concentración del inhibidor, pasando de un comportamiento predominantemente controlado por transferencia de carga hacia un sistema con fenómenos de transporte de masa y difusión de especies. La concentración de 300 ppm presentó el mejor desempeño, alcanzando una eficiencia de inhibición de 50.21 % mediante pérdida de masa, 50.00 % mediante

polarización potenciodinámica y hasta 93.94 % mediante espectroscopía de impedancia electroquímica.

Como parte de la caracterización, se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) para analizar la morfología superficial, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para verificar la presencia y conservación de los grupos funcionales activos de la cefalexina además de espectroscopía UV-Vis para correlacionar la concentración del inhibidor en solución. La caracterización confirmó la conservación de los grupos funcionales responsables de la adsorción sobre la superficie metálica.

ABSTRACT

In this project, the electrochemical behavior of AISI 1018 steel is studied in media that simulate marine and industrial conditions, using expired cephalexin as a corrosion inhibitor. To evaluate the behavior of the system and the inhibition efficiency, electrochemical techniques such as open circuit potential (OCP), electrochemical impedance spectroscopy (EIS), potentiodynamic polarization curves, and linear polarization resistance (LPR) were employed, in addition to the gravimetric mass loss technique.

The mass loss results show that the inhibition efficiency increases as the cephalixin concentration increases, obtaining its best performance at 300 ppm. The OCP analysis indicates that, as the inhibitor concentration increases, the system potential shifts toward more noble values with respect to the blank. In polarization curves, changes in the rate of the electrochemical reactions and in the corrosion mechanism are observed with respect to the system without inhibitor; it also indicates that cephalixin acts as a mixed-type inhibitor with cathodic predominance. Through LPR, an increase in polarization resistance was observed as the inhibitor concentration increases, indicating greater resistance to corrosion. The EIS results also show that the electrochemical mechanism changes both with exposure time and with inhibitor concentration, changing from a behavior predominantly controlled by charge transfer to a system with mass transport and species diffusion phenomena. The concentration of 300 ppm showed the best performance, reaching an inhibition efficiency of 50.21% by mass loss, 50.00% by potentiodynamic polarization, and up to 93.94% by electrochemical impedance spectroscopy.

As part of the characterization, scanning electron microscopy (SEM) was used to analyze the surface morphology, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) to verify the presence and preservation of the active functional groups of cephalixin, in addition to UV-Vis spectroscopy to correlate the inhibitor concentration in solution. The characterization confirmed the preservation of the functional groups responsible for adsorption on the metallic surface.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Problemática	11
1.2. Antecedentes	12
1.3 Justificación	15
1.4. Hipótesis	16
1.5 Objetivo general	16
1.6 Objetivos específicos	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Definición de corrosión	17
2.1.1 Consecuencias de la corrosión	18
2.1.2 Costos económicos de la corrosión	19
2.1.3 Catástrofes y daños producidos por la corrosión	20
2.2 Tipos de corrosión	22
2.2.1 Corrosión uniforme	22
2.2.2 Corrosión localizada	23
2.2.3 Corrosión por picaduras	23
2.2.4 Corrosión filiforme	24
2.2.5 Corrosión galvánica	25
2.2.6 Corrosión intergranular	25
2.2.7 Corrosión transgranular	26
2.2.8 Corrosión por erosión	26
2.2.9 Corrosión bajo tensión	27
2.2.10 Corrosión microbiana	27
2.3 Corrosión atmosférica	28

<i>2.4 Factores que influyen en el proceso de corrosión</i>	29
2.4.1 Acidez de la solución (pH).....	29
2.4.2 Sales disueltas.	30
2.4.3 Concentración de oxígeno disuelto.	30
2.4.4 Temperatura.	31
2.4.5. Velocidad de flujo.	31
<i>2.5 Propiedades del acero al carbono</i>	32
2.5.1 Propiedades del acero AISI 1018.	33
<i>2.6 Inhibidores de corrosión</i>	34
2.6.1 Clasificación de los inhibidores de corrosión	35
2.6.1.1 Inhibidores anódicos	35
2.6.1.2 Inhibidores catódicos	36
2.6.1.3 Inhibidores mixtos	36
2.6.2 Uso de fármacos como inhibidores de corrosión	36
<i>2.7 Métodos de evaluación de la corrosión</i>	37
2.7.1 Método gravimétrico	37
2.7.2 Métodos electroquímicos	38
2.7.2.1 Potencial en circuito abierto (OCP).....	39
2.7.2.2 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)	39
2.7.2.3 Curvas de polarización potenciodinámicas (CP).....	41
2.7.2.4 Resistencia a la Polarización Lineal (LPR)	43
2.7.3 Normas ASTM aplicables a ensayos de corrosión	44
<i>2.8 Circuitos equivalentes y fundamentos electroquímicos de la corrosión</i>	45
2.8.1 Cinética de la corrosión.....	46
2.8.2 Ley de Faraday y su aplicación en corrosión	47
2.8.5 Diagramas de Pourbaix.....	48
<i>2.9 Isotermas de adsorción</i>	49
2.9.1 Isoterma de Langmuir	49
2.9.2 Isoterma de Freundlich.....	50

2.9.3 Isoterma de Temkin.....	50
2.9.4 Isoterma de Frumkin	51
3. METODOLOGÍA.....	51
3.1 Reactivos	51
3.1.1 Cloruro de sodio.....	51
3.1.2 Sulfato de sodio.....	52
3.2 Inhibidor.....	52
3.3 Pruebas de pérdida de masa.....	53
3.3.1 Corte de las muestras.....	53
3.3.2 Pulido de las muestras para la prueba de pérdida de masa.....	54
3.3.3 Medición inicial de las muestras.....	54
3.3.4 Inmersión de las muestras.....	54
3.3.5 Limpieza de las muestras.....	55
3.3.6 Medición final de las muestras.....	55
3.4 Pruebas electroquímicas.....	57
3.4.1 Cortado de las muestras.....	57
3.4.2 Encapsulado de las muestras.....	58
3.4.3 Pulido de las muestras.....	58
3.5 Caracterización Química y estructural.....	61
3.5.1 Espectroscopia Infrarroja	61
3.5.2 Espectroscopia Ultravioleta Visible (UV-Vis)	61
3.5.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS).....	61
3.5.4 Análisis Metalográfico	62
4. RESULTADOS.....	62
4.1 Caracterización Química y estructural.....	62
4.1.1 SEM y EDS.....	62
4.1.2 Análisis Metalográfico.....	64

4.1.3 FTIR.....	64
4.1.4 UV-VIS.....	68
4.2 <i>Pruebas de pérdida de masa</i>	69
4.3 <i>Pruebas electroquímicas</i>	73
4.3.1 Potencial de circuito abierto (OCP).	73
4.3.2 Curvas de polarización potenciodinámicas (CP).	74
4.3.3 Resistencia a la polarización lineal (LPR).	77
4.3.4 Espectroscopia de impedancia Electroquímica (EIS).	79
4.3.4.1 Circuitos equivalentes.....	91
4.4 <i>Isoterma de adsorción</i>	97
4.4.1 Mecanismo de adsorción del inhibidor.	100
4.5 <i>Reacciones electroquímicas</i>	101
4.6 <i>Caracterización posterior a pruebas electroquímicas</i>	103
4.6.1 SEM y EDS.....	103
4.7 <i>Mecanismo de corrosión</i>	105
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
5.1 <i>Conclusiones</i>	108
5.2 <i>Recomendaciones</i>	111
6. REFERENCIAS.	113

1. Introducción.

1.1 Problemática.

La corrosión se ha convertido en un gran problema especialmente para la industria, en ambientes marino e industriales esto se debe a que los metales están expuestos a diversos factores como humedad o contaminantes.

El acero al carbono es uno de los metales que más se utiliza en la industria, aunque también se utiliza en la construcción de maquinaria, estructuras de construcción, plataformas marinas y componentes de barcos, entre otras cosas. No obstante, aunque es ampliamente utilizado, este material es propenso a la corrosión en diversos ambientes, especialmente en condiciones atmosféricas de tipo marino e industrial. Estas condiciones son agresivas para este tipo de material. (O. Benali et al., 2021; Negm et al., 2011; Maldonado-Bandala et al., 2020)

Controlar la corrosión de todos los metales es muy importante, debido a que genera numerosos accidentes derivando en grandes pérdidas económicas además la corrosión del acero al carbono es considerable y afecta diversas áreas como la industria, agricultura, construcción, el transporte y la infraestructura, entre otras. Se estima que el costo anual asociado a la corrosión ronda los 2.5 billones de dólares a nivel mundial, esto indica que la degradación de estructuras de acero al carbono es tanto costosa como difícil de prever al momento de construir una nueva edificación o al calcular su vida útil. La predicción y control del deterioro en metales como el acero al carbono continúa siendo

una prioridad en la ingeniería moderna. (Koch, G, 2017; Benea, L. et al., 2020; Vaszilcsin, N et al., 2023)

1.2. Antecedentes.

La corrosión se refiere al deterioro o degradación de un metal siendo resultado de reacciones químicas o electroquímicas con su entorno. Este proceso tiene reacciones químicas y la transferencia de electrones, y ocurre debido a la tendencia de los metales a volver a su estado original o estado de menor energía. Únicamente se le llama corrosión al deterioro de los metales ya que estos son los únicos que transfieren electrones, los materiales que no transfieren electrones no se les puede llamar corrosión sino ataque químico, ya que no transfieren electrones. (Revie, R. W., & Uhlig, H. H, 2025)

El proceso de corrosión incluye reacciones de reducción-oxidación, las cuales requieren la presencia de tres componentes: electrodos (un ánodo y un cátodo), un electrolito que actúa como medio conductor, comúnmente una solución acuosa, y una conexión eléctrica entre los electrodos. Para que se produzca la corrosión, es necesaria una cantidad específica de energía conocida como energía libre de Gibbs, la cual debe ser inferior a cero. (Salazar-Jiménez, J. A., 2015).

La corrosión únicamente se puede controlar y para eso se puede modificar el medio eliminando O_2 , H_2O y ácidos o adicionando inhibidores que actúan en la interfase, modificar el metal según las condiciones y medio y por último modificar la interfase con el uso de recubrimientos. Lo que se utiliza comúnmente para combatir la corrosión en materiales metálicos en entornos marinos son los recubrimientos, los cuales pueden ser inorgánicos, orgánicos o una combinación de ambos, especialmente en el caso de aquellos que están sumergidos. Entre los muchos métodos más investigados para la

protección contra la corrosión se destaca el uso de inhibidores, que se ha convertido en la técnica más relevante en los últimos años. (Benea, L. et al., 2020; L.E. Tsygankova et al., 2022; Zhuang, W et al., 2021).

La mayoría de los inhibidores actuales orgánicos sintéticos presentan diversos riesgos, y las nuevas regulaciones ambientales, como la Ley de Control de Sustancias Tóxicas de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos y la Directiva de Restricciones de Sustancias Peligrosas de la Unión Europea, han impulsado la necesidad de crear inhibidores de corrosión que sean amigables con el medio ambiente y que no contengan metales pesados, como el cromo y el plomo. Por esta razón, se ha comenzado a investigar el uso de extractos de plantas como alternativas para la inhibición de la corrosión. La mayoría de estos inhibidores naturales son no tóxicos, biodegradables y abundan en la naturaleza. Hasta ahora, se han utilizado extractos obtenidos de semillas, frutas, hojas y flores, entre otros (Fouda, A. S., & Elabbasy, H. M., 2019; Al-Otaibi et al., 2014; Ayón, V. A et al., 2005).

Otras opciones para la creación de inhibidores incluyen los medicamentos caducados, que han sido investigados en la última década y han mostrado una notable eficacia como inhibidores. Esto se debe a que contienen características que definen un inhibidor eficiente, como moléculas con enlaces insaturados, anillos aromáticos y heteroátomos como oxígeno, nitrógeno, azufre, entre otros. (Negm et al., 2011; L.E. Tsygankova et al., 2022; Alamry, K. A et al., 2013)

Además, los iones de nitrógeno con carga positiva y la superficie del metal generan un proceso de adsorción covalente, lo que permite que las moléculas inhibidoras de la corrosión se adhieran fuertemente a la superficie del metal. Esto resulta en la formación

de una película hidrofóbica densa que bloquea de manera efectiva el contacto entre los agentes corrosivos y la superficie metálica. (Zhuang, W et al., 2021)

La eficacia de los medicamentos varía en función del tipo de material, el entorno en el que se evalúa y la concentración empleada. La isoterma de adsorción de Langmuir es la más frecuentemente observada en la evaluación de inhibidores derivados de medicamentos caducados aplicados al acero, mientras que, en situaciones poco comunes, su comportamiento puede ser descrito por la isoterma de Temkin. (Tsygankova et al., 2022)

Algunos de los inhibidores de medicamentos caducos que han reportado buena eficiencia son: sulfadoxina y pirimetamina 80% de eficiencia a concentración de 0.01M acero X70 evaluado en agua, desloratadina 92% de eficiencia a concentración de 19.3×10^{-5} M acero al carbono evaluado en HCl 1 M. El pantoprazol presenta una eficiencia de 94% a 250 ppm en acero al carbono evaluado en H_2SO_4 1M. También, tanto el omeprazol como el esomeprazol consiguen una eficiencia de 99% a concentraciones cercanas de 10^{-4} M en acero C38 evaluado en ácido fosfórico 1 M, junto con muchos otros inhibidores reportados por diversos autores. (Tsygankova et al., 2022)

La cefalexina es efectiva para tratar infecciones en las vías respiratorias, la piel, tejidos blandos y el tracto genitourinario. Su administración puede realizarse en dosis orales elevadas sin provocar irritación gastrointestinal, ya que se absorbe en la parte superior del tracto intestinal y no afecta la flora del intestino inferior. Gracias a su estabilidad química, tiene una incidencia muy baja de reacciones alérgicas. Además, al no penetrar en las células del tejido del huésped, se reduce la probabilidad de efectos secundarios. Este antibiótico es eliminado con rapidez del organismo a través de los riñones, y entre

un 70% y un 100% de la dosis administrada se encuentra en la orina entre 6 y 8 horas tras su ingestión. (Gece, G. 2011).

1.3 Justificación.

La corrosión atmosférica junto con los aceros resistentes a la intemperie (Weathering Steel) han sido objeto de numerosos estudios en la literatura científica, especialmente en relación con las normas americanas y normas europeas (ASTM e ISO). Se continúan investigando y desarrollando nuevas estrategias para proteger los materiales en ambientes marino, industriales y combinados. (Morcillo et al., 2019)

Entre las protecciones estudiadas contra la corrosión se encuentran los inhibidores que, al ser añadidos en bajas concentraciones a un medio corrosivo, forman películas protectoras y reducen la velocidad de corrosión previniendo este fenómeno sin alterar al sistema, modifican los procesos electroquímicos que ocurren en la interface del metal-electrolito. Sin embargo, muchos de los compuestos utilizados son excesivamente tóxicos, costosos y perjudiciales tanto para el medio ambiente como para la salud humana. (Benítez et al., 2014; Răuță, D. I et al., 2025)

Recientemente, se ha estudiado el uso de medicamentos caducos como inhibidores de corrosión. Se aprovechan los heteroátomos y grupos funcionales presentes en fármacos como la cefalexina, los cuales favorecen la adsorción química sobre metales como el acero al carbono. (Vaszilcsin, N et al., 2023)

Los medicamentos caducados presentan heteroátomos como azufre (S), fósforo (P) y oxígeno (O), además de contener dobles enlaces, anillos aromáticos y grupos funcionales con propiedades inhibitorias, tales como amino y carboxilo. Al estar

formulados para el consumo humano, estos compuestos no son tóxicos, son solubles en casi todos los disolventes y son biodegradables. Además, su reciclaje contribuye a la reducción de residuos farmacológicos. (Popoola, L. T., 2019).

La cefalexina es un antibiótico de amplio espectro de la familia de las cefalosporinas, ha demostrado su eficacia como inhibidor en los aceros AISI 1018 y AISI 8620 de bajo carbono, en medios H_2SO_4 del 70%, HClO_4 del 53%, y en el caso del acero 8620, su eficacia fue del 84%. Este comportamiento se puede atribuir a la presencia del grupo carbonilo y amino, formando una capa protectora. (Barrón Vázquez, S, 2022; Pozos Reyes, R, 2014; Fayomi, O.S et al., 2021)

1.4. Hipótesis.

La cefalexina caduca, utilizada como inhibidor protege al acero al carbono de la agresividad del medio, dando como resultado la disminución en la velocidad de corrosión.

1.5 Objetivo general.

Analizar la eficiencia de un inhibidor producido a partir de cefalexina caduca aplicado a acero al carbono evaluado en $\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$ que simulan medios marino e industrial.

1.6 Objetivos específicos.

- Identificar como inhibidor para determinar su posible funcionamiento como inhibidor.
- Evaluar el desempeño de la cefalexina caduca aplicado a un acero al carbono en medio $\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$ utilizando técnicas electroquímicas.

- Establecer las condiciones experimentales en las que la cefalexina caduca presenta su máxima eficiencia contra la corrosión.

2. Marco teórico.

2.1 Definición de corrosión.

La corrosión es un fenómeno natural que ocurre cuando los metales comienzan a degradarse al entrar en contacto con el medio que los rodea. Este desgaste, que avanza de forma continua y no puede revertirse, se debe a reacciones químicas o electroquímicas. El metal tiende a volver a su forma original o más estable como óxidos, sulfuros o carbonatos, es decir, a los compuestos en los que se encontraba en la naturaleza antes de ser procesado para su uso industrial. (Revie, R. W., & Uhlig, H. H, 2025)

Dentro de la electroquímica se le llama corrosión cuando existe una reacción entre el metal y el medio en el que se encuentra, este medio deberá ser conductor, por ejemplo, el agua con alguna sal. El proceso comienza en el metal llamado ánodo cuando libera electrones también en el medio se encuentran disueltas sustancias como el oxígeno llamados cátodo que reciben a los electrones. La combinación de ambos procesos forma de manera natural un circuito y para que esta reacción continúe sin ayuda se requiere que haya una pérdida de energía menor a cero llamada energía libre de Gibbs negativa ($\Delta G < 0$). (Morcillo et al., 2019).

La reacción de corrosión tiene una velocidad y diversos factores ambientales influyen en esta, como el pH, la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento y la concentración de sales disueltas donde en la mayoría de los casos la aumentan.

Además, de estos factores la presencia de contaminantes como cloruros, sulfatos y óxidos de nitrógeno puede acelerar considerablemente la cinética de corrosión. Todos estos factores deben de considerarse al diseñar una estrategia para el control de corrosión en los metales. (Yadav, L., et al 2024)

Entonces, la corrosión es un gran problema para diversas áreas y esta no depende de un solo factor sino de una combinación de varios que suceden al mismo tiempo. Cuando sucede, afecta directamente el funcionamiento de los metales, genera gastos elevados en reparaciones y mantenimiento, y puede llegar a poner en riesgo la seguridad de estructuras importantes además de la seguridad y salud humana. Por eso encontrar formas de controlarla sobre todo usando opciones más amigables con el ambiente se ha vuelto algo realmente necesario y urgente.

2.1.1 Consecuencias de la corrosión.

La corrosión además de ser un proceso de degradación puede generar diversos desafíos globales como el impacto económico, efectos negativos medioambientales y sociales. Los desafíos estructurales tienen impactos directos en la seguridad humana, el ambiente y la continuidad operativa en las diferentes industrias. Sobre todo, dentro de las consecuencias críticas destacan los daños en infraestructuras como puentes, refinerías, tuberías o embarcaciones, esto ha generado riesgos de fugas, incendios o colapsos. (Koch, G, 2017; Prošek., et al 2025)

Todos estos factores comprometen la confiabilidad de los sistemas y la seguridad de las personas, además ocasiona contaminación ambiental por fugas de hidrocarburos provocando pérdidas de recursos naturales generando además una mayor huella de

carbono por la reposición de las piezas metálicas dañadas y los residuos contaminan el agua y el suelo. Se estima que para el año 2030 las emisiones vinculadas a la corrosión podrían ser entre el 4.1% y el 9.1% del total mundial evidenciando que es una consecuencia crítica. (Lannuzzi & Frankel, 2022; Prošek., et al 2025)

La suma de todas las consecuencias se vuelve relevante al estudiar la corrosión, en el caso del acero AISI 1018 es debido a que se encuentra expuesto al medio atmosférico marino e industrial donde los iones cloruros y sulfatos aceleran la formación de productos de corrosión y por consecuencia su degradación. El uso de la cefalexina caduca como inhibidor trata controlar y minimizar estos efectos, prolongando la vida útil del metal y disminuyendo su velocidad de corrosión.

2.1.2 Costos económicos de la corrosión.

El costo global anual asociado a la corrosión es de aproximadamente 2.5 billones de dólares lo que es equivalente al 3.4% del PIB mundial. Este cálculo incluye los costos directos como el mantenimiento, reparación y sustitución, así como también los costos indirectos como el paro de planta, pérdidas de producción, impactos ambientales y sociales. El control de la corrosión de manera eficiente y adecuada podría disminuir estos costos alrededor de un 35% es decir 875 mil millones de dólares anuales. (Koch, G, 2017)

El impacto económico mundial refuerza la necesidad de desarrollar técnicas de control de la corrosión especialmente que sean amigables con el medio ambiente y que no impliquen grandes inversiones como lo son inhibidores a base de medicamentos caducos

ya que es una alternativa a bajo costo y bajo impacto ambiental frente a los métodos ya existentes.

2.1.3 Catástrofes y daños producidos por la corrosión.

A lo largo de la historia se tienen reportados diversos accidentes ocasionados por la corrosión, uno de estos y por tener consecuencias más graves es el colapso del puente Silver en el año 1967 que se encontraba sobre el río Ohio donde perdieron la vida 46 personas. La investigación fue realizada por el Consejo Nacional de Seguridad en el Transporte de Estados Unidos (NTSB) y se concluyó que la causa principal fue la fractura frágil de una barra tensora, originada por un agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo combinado con fatiga. (Reporte HAR-71-1)

Este daño se propagó desde una pequeña zona afectada por picaduras, que actuó como punto de concentración de esfuerzos. La interacción del medio que al ser altamente corrosivo y un diseño estructural no adecuado hicieron que una falla localizada se convirtiera en el colapso total del puente. A partir de esta catástrofe se establecieron nuevos estándares y protocolos de inspección estructural para puentes en Estados Unidos, con el fin de prevenir incidentes similares en el futuro. (Reporte HAR-71-1)

En 1983 en Connecticut sobre la autopista interestatal I-95 se colapsó el puente Mianus donde se registraron 3 víctimas mortales. La NRSB determinó que la causa principal del accidente fue la corrosión y la pérdida de material en los ensambles de perno y colgador. El accidente se debió a la obstrucción de los sistemas de drenaje, esto hizo que el agua se acumulara en la estructura del puente, especialmente en las uniones generando una corrosión interna y progresiva de los pernos. Con el paso del tiempo y debido a la

degradación progresiva, el peso del puente se concentró en un solo lugar hasta provocar el colapso repentino. Este accidente evidenció las fallas en los mantenimientos de puentes ya que un daño localizado y reparable terminó en una catástrofe con pérdidas de vidas humanas reafirmando la necesidad del control y prevención de la corrosión en estructuras metálicas expuestas al medio corrosivo. (Reporte HAR-84-03).

En el área aeronáutica también ha habido accidentes a causa de la corrosión, en 1988 NTSB documentó una catástrofe en la aerolínea Aloha Airlines, el vuelo 243. El medio ambiente marino caracterizado por tener sales y humedad aceleraron la velocidad de corrosión comprometiendo el recubrimiento y refuerzos estructurales del fuselaje. La suma constante de estos factores provocó una descompresión explosiva en medio vuelo provocando la muerte de un tripulante. Este caso sugiere que el ambiente marino acelera el daño dando como consecuencia falla en estructuras aeronáuticas. (Reporte AAR-89-03)

Más recientemente se documentó una tubería de acero al carbono que falló a solo 6 años de uso, debido a la corrosión localizada en su exterior que estaba expuesto al suelo mientras que el interior donde sí estaba controlada la corrosión resistía mejor. (Lee et al., 2022)

Existen muchos accidentes debido a la falta de control de la corrosión lo que desencadena diversas consecuencias, siendo la más grave la pérdida de vidas humanas lo que nuevamente nos crea la necesidad de buscar alternativas para prevenirla.

2.2 Tipos de corrosión.

La corrosión se presenta de diferentes formas, dependiendo del metal, del medio que lo rodea y las condiciones específicas de cada caso en su exposición. Cada tipo diferente de corrosión tiene sus propias características que afectan en qué forma se degrada el metal, también con que velocidad y el daño que puede causar. (Revie, R. W., & Uhlig, H. H., 2025). Además, en la práctica no siempre aparece un solo tipo de corrosión; la mayoría de las veces se combinan varios al mismo tiempo, lo que hace más difícil detectarlos y tratarlos correctamente. Por eso es tan importante conocer bien cada forma en que puede presentarse este problema. Esa información ayuda a diseñar estrategias más eficientes para controlar la corrosión como: elegir mejor los materiales, construir estructuras más resistentes y a aplicar métodos de protección más eficaces, como los recubrimientos o el uso de inhibidores.

2.2.1 Corrosión uniforme.

Se refiere al proceso donde una superficie metálica pierde material o sufre de desgaste de manera homogénea sobre toda su superficie expuesta (Figura 1), es una de las formas más comunes y fáciles de identificar. Esta forma de degradación ocurre cuando el metal está expuesto a un medio agresivo que ataca de manera pareja pudiendo ser agua, soluciones ácidas o alcalinas, o ambientes marinos generando una disminución gradual del espesor del metal, lo que compromete su seguridad y su función estructural con el paso del tiempo. Esta forma de corrosión puede parecer menos peligrosa ya que se predice que parte tiene tendencia a corroerse, pero esto hace que el paso del tiempo

juegue un papel importante haciendo que estas se debiliten ocasionando accidentes. (Morcillo et al., 2019; Ekeocha et al.,2023)

Este tipo de corrosión se utiliza como base para la estimación de la vida útil de estructuras ya que como es predecible permite que se le apliquen modelos de desgaste uniforme y así poder investigar y aplicar métodos preventivos. (Ekeocha et al.,2023)

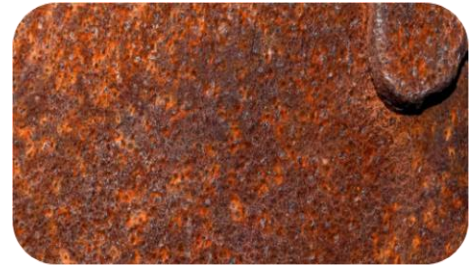


Figura 1. Corrosión uniforme.

2.2.2 Corrosión localizada.

La corrosión localizada reúne todas aquellas formas de corrosión donde el ataque al metal no es uniforme sino ataca de forma puntual a ciertas zonas del metal siendo más difícil de detectar (Figura 2). Comúnmente se encuentra en uniones, grietas, orificios, zonas bajo recubrimientos o espacios con poca circulación. Este tipo de corrosión es muy peligrosa ya que no se observa con facilidad y puede pasar desapercibida hasta que la degradación llega a una profundidad crítica iniciando fallos y accidentes. (Li, P., Geng, Y., & Du, M., 2021).



Figura 2. Corrosión localizada.

2.2.3 Corrosión por picaduras.

La corrosión por picaduras o pitting es una forma de la corrosión localizada, como característica posee pequeños hoyos o cavidades en la superficie del metal y es muy peligrosa ya que puede avanzar a más profundidad sin dar señales en el exterior,

generalmente su profundidad es mayor a su diámetro. Estas picaduras se forman cuando se debilita o rompe la capa pasiva de la superficie metálica, en el fondo de la picadura se establece una célula electroquímica anódica con difusión limitada de oxígeno y iones agresivos lo que acelera la corrosión en esta zona. Su peligro se debe a que sus cavidades pueden actuar como iniciador de grietas, concentración de esfuerzos o puntos de fatiga lo que va comprometiendo su integridad estructural sin que sea visible en su superficie. (Pérez Valencia, M. Á., 2024; Yang, Z., et al., 2024)

La velocidad de su propagación depende de varios factores como su microestructura metálica, si hay presencia de iones, la temperatura y la tensión superficial del metal, esto lo convierte es un tipo de corrosión crítica en ambientes marino-industriales. (Yang, Z., et al., 2024)

2.2.4 Corrosión filiforme.

Este tipo de corrosión se forma debajo de un recubrimiento que puede ser una pintura, capas orgánicas o un óxido anódico. Son como hilos o filamentos que avanza de la interfaz metal-recubrimiento. Como presenta forma de filamento tiene una cabeza que es anódica activa y una cola que es catódica, además de dejar productos de corrosión. Para que esta ocurra se requieren de diversos factores como humedad, presencia de cloruros, permeabilidad del recubrimiento y defectos de adhesión. Al igual que los otros tipos de corrosión se están estudiando métodos para controlarla y reducir sus velocidades de avance con la evaluación de inhibidores incorporados a recubrimientos. (Cristoforetti et al., 2024)

2.2.5 Corrosión galvánica.

Se presenta cuando dos metales con diferentes potenciales eléctricos entran en contacto eléctrico en presencia de un electrolito. En este caso, el metal con menor potencial o menos noble actúa como ánodo y se corroe más rápidamente. Mientras que el otro metal se convierte en cátodo y recibe la corriente anódica protegiéndolo (Figura 3). Esta forma de corrosión es muy común en estructuras mixtas y debe prevenirse mediante la selección adecuada de materiales o con barreras aislantes. (Martínez-Pérez, F., 2023)

Se encontró en estudios de recubrimientos con aluminio-boruro que la corrosión galvánica es significativa y es más común cuando hay recubrimientos defectuosos lo que crea la necesidad de tener cuidado en la selección de materiales para su diseño. (Lei, B., et al. 2020).



Figura 3. Corrosión galvánica.

2.2.6 Corrosión intergranular.

Se presenta cuando el ataque metálico se propaga a lo largo de los límites de grano, entonces ocurre a nivel microscópico, generalmente como resultado de tratamientos térmicos inadecuados o por la presencia de elementos como el cromo que se precipita fuera de solución. Debilita la cohesión entre los granos lo que afecta su integridad mecánica. Es común en aceros inoxidable mal pasivados por la segregación de impurezas o bastas impurezas y puede debilitar seriamente el material sin afectar su apariencia superficial. Se ha estudiado este fenómeno y se encontró que también está

relacionado con el grado de deformación, el tratamiento térmico y la presencia de fases secundarias. (Martínez-Pérez, F., 2023; Kanjanaprayut., et al. 2024)

2.2.7 Corrosión transgranular.

Este tipo de corrosión se caracteriza porque su ataque atraviesa a los granos individuales no solo a los límites de grano y avanza a través de la estructura cristalina (Figura 4). Ocurre debido a la presencia uniforme de agentes corrosivos o cuando está formada por granos grandes lo que permite que las grietas se propaguen. En investigaciones recientes se encontró que, en ambientes con cloruros bajo tensión mecánica el agrietamiento por corrosión transgranular es complejo y puede confundirse con fisuración por fatiga normal. (Qu et al., 2022)

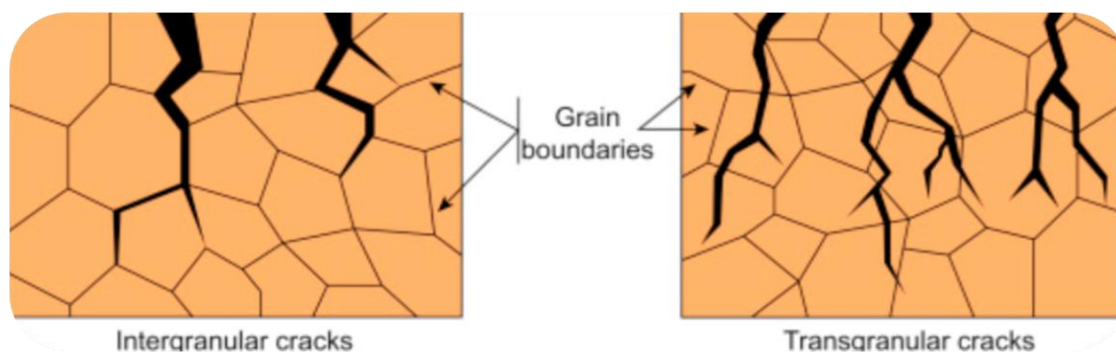


Figura 4. Corrosión intergranular y transgranular. (Ferón, D. et al., 2016)

2.2.8 Corrosión por erosión.

Este tipo de corrosión es la degradación acelerada de un metal debido al impacto de un flujo con partículas además de las reacciones electroquímicas propias de la corrosión. Es decir, combina el efecto químico del medio y el daño mecánico por movimiento de fluidos. Suele afectar a tuberías, bombas o sistemas hidráulicos donde hay velocidad y turbulencia en el flujo. Las partículas suspendidas o el choque constante con líquidos

aceleran la pérdida de material ya que remueven la película protectora ya sea pasiva o con productos de corrosión dando como resultado que la corrosión avance más rápido. Como todos los tipos de corrosión depende de varios factores como la velocidad del fluido, dureza o ángulo de impacto de las partículas, tipo de metal y medio en el que se encuentra. En medios marino-industriales la presencia de cloruros y sales potencian aún más la degradación del material, por lo que un buen diseño, así como la presencia de un inhibidor es esencial ya que constituye una estrategia eficaz. (Verma, C. et al., 2021; Tian, X., et al., 2025)

2.2.9 Corrosión bajo tensión.

Este tipo de corrosión sucede por la suma de dos factores, el ambiente corrosivo y el esfuerzo de tracción. Esta combinación puede llevar a la formación de grietas que pueden crecer drásticamente hasta una falla catastrófica, incluso en materiales que normalmente serían resistentes a la corrosión. La corrosión por picadura suele iniciarla ya que concentra tensiones. Se ha reportado en aleaciones de aluminio, acero inoxidable y otros metales usados en la industria química y aeronáutica, en especial afecta a la infraestructura costera debido a la humedad y cloruros que favorecen las grietas. Para controlarla se suele usar concentradores de esfuerzo, elección de materiales, alivio de tensiones y recubrimientos con inhibidores. (Vakili et al., 2024)

2.2.10 Corrosión microbiológica.

La degradación de la corrosión microbiológica también conocida como biodegradación es causada por la presencia de microorganismos como bacterias reductoras de sulfatos

o biofilm, estas bacterias alteran la química en la interfase metal-biofilm, los microorganismos consumen el oxígeno lo que modifica el cátodo, generan especies corrosivas como ácidos orgánicos, lo que crea ambientes que favorece el pitting. Es frecuente en ambientes con agua estancada, suelos húmedos o en sistemas de almacenamiento de combustibles como oleoductos, tanques o sistemas marinos. (Liu, P. et al., 2023; Lv, X et al., 2024)

2.3 Corrosión atmosférica.

La corrosión atmosférica es una de las formas más comunes y silenciosas de degradación que sufren los metales. A diferencia de otros tipos, no requiere de inmersión directa en líquidos; basta con la exposición del metal al aire y a la humedad para que comience el proceso. Este tipo de corrosión ocurre de forma natural en cualquier entorno abierto, aunque su intensidad varía dependiendo del ambiente, la proximidad al mar, la contaminación y la humedad relativa (Morcillo et al., 2019).

Cuando el metal entra en contacto con la humedad del ambiente, donde puede haber gases contaminantes como dióxido de azufre (SO_2) o cloruros provenientes del ambiente marino, se forma una película de agua delgada sobre su superficie debido a periodos por debajo del punto de rocío. Esta película actúa como electrolito, iniciando reacciones electroquímicas que poco a poco degradan el metal. Por eso, incluso en estructuras que parecen estar en buen estado, la corrosión puede estar avanzando de forma silenciosa y constante. (Di Sarno, L. et al., 2021)

Este tipo de corrosión está en todos lados, pero es especialmente agresiva en zonas costeras debido a la presencia de sales marinas que son transportadas por el viento. Las

partículas salinas, al depositarse en la superficie metálica, retienen la humedad y aceleran el proceso corrosivo. También es agresiva en zonas industriales ya que hay mayor concentración de contaminantes como óxidos de nitrógeno o compuestos sulfurosos que, al combinarse con el agua, generan soluciones ácidas sobre la superficie del metal. (Koushik, B. G et al., 2021)

La velocidad a la que ocurre la corrosión atmosférica depende de varios factores como el tipo de metal, la presencia de recubrimientos, la orientación de la estructura, la ventilación y hasta la sombra o exposición directa al sol pueden influir en cómo y cuánto se corroe una superficie metálica. Las partes del metal que están en sombra o protegidas de las corrientes de viento retienen más humedad por lo que son más propensas a sufrir corrosión (Li, Q. et al., 2022)

El ambiente marino y el industrial son agresivos para los metales, juntos son una problemática de especial interés ya que representa un reto mayor. El acero al carbono que es muy utilizado debido a su bajo costo y buenas propiedades mecánicas es vulnerable a este tipo de ambientes, por lo que estudiar el uso de inhibidores de corrosión es crucial para alargar su vida útil. (Wang, Y. et al., 2021)

2.4 Factores que influyen en el proceso de corrosión.

2.4.1 Acidez de la solución (pH).

Este factor es uno de los más determinantes en la velocidad de corrosión, cuanto menor o más ácido sea tiene mayor tendencia a la degradación del metal debido a que la concentración de H^+ es mayor lo que favorece reacciones anódicas y catódicas. En un estudio reciente se encontró que la acidez no sólo incrementa la velocidad de disolución,

sino que también modifica la composición y la estabilidad de la película pasiva, haciéndola más fácil de desprender, además, se impide el desarrollo de capas protectoras compactas, por lo que el metal permanece expuesto por más tiempo al electrolito agresivo. (Dai, Y., et al., 2024)

2.4.2 Sales disueltas.

Las atmosferas marinas e industriales contienen sales disueltas como iones cloruro (Cl^-) lo que explica porque son tan agresivas ya que estos cloruros reducen la estabilidad de las películas que se forman sobre los aceros además de aumentar la conductividad del electrolito. En un estudio de corrosión atmosférica marina con sensores in situ se mostró que la tasa de corrosión del acero está relacionada con la deposición de cloruros sumado al tiempo que la superficie permanece húmeda lo que forma una película de solución salina en la superficie metálica. Además, los cristales de NaCl captan agua y forman una película electrolítica que mantiene activa la corrosión durante largos periodos. (Daneshian, B., et al., 2023)

2.4.3 Concentración de oxígeno disuelto.

La concentración de oxígeno en el medio controla en gran parte la cinética de las reacciones catódicas es decir el sistema de la corrosión. Cuando la solución es aireada el oxígeno actúa como especie oxidante en el cátodo, pero si hay zonas mal ventiladas estas se vuelven más anódicas lo que las corroe con mayor rapidez. Estudios recientes muestran que también altera la química del electrolito lo que cambia la acidez de esta. También en la corrosión por erosión la presencia de oxígeno en el flujo contribuye a la

ruptura de película lo que forma zonas catódicas y anódicas activas. (Dai, Y., et al., 2024; Joag, S., et al., 2014)

2.4.4 Temperatura.

Al aumentar la temperatura se acelera la cinética de las reacciones electroquímicas y aumenta la difusión de especies, por lo que en la mayoría de los sistemas la corrosión aumenta junto con la temperatura. En la corrosión atmosférica la temperatura además afecta la humedad relativa, el tiempo de humectación y la estabilidad en la capa superficial del metal. Investigaciones recientes sobre corrosión atmosférica señalan que en ambientes cálidos y húmedos se pueden generar capas de óxidos más gruesas, pero menos protectoras, lo que conlleva a la pérdida de resistencia mecánica y fragilización superficial (Daneshian, B., et al., 2023; Vera, R., et al., 2023)

2.4.5. Velocidad de flujo.

Hay dos efectos que produce la velocidad de flujo, por debajo de cierta velocidad favorece el aporte de oxígeno y la formación de películas protectoras, pero al superar esta velocidad existe un arrastre mecánico que debilita la película protectora lo que da como resultado corrosión por erosión. En un estudio con acero inoxidable 316L se observó que la degradación aumenta con la velocidad de flujo 0 y 3.30 m/s, lo que confirma que al incrementar la velocidad aumenta el daño combinado de erosión mecánica y corrosión electroquímica. Además, en investigaciones de acero al carbono en agua de mar se concluyó que la velocidad de flujo mejora el transporte de iones y rompe la película protectora. Esto es especialmente relevante para tuberías, boquillas,

intercambiadores entre otras estructuras de acero al carbono. (Dai, Y., et al., 2024; Xu, Y., et al., 2021)

2.5 Propiedades del acero al carbono.

El acero al carbono es uno de los más utilizados en especial es la industria debido a que su composición lo hace tener resistencia mecánica, su procesamiento es muy fácil y sobre todo es de bajo costo. Como cualquier acero su composición principal es de hierro con un porcentaje de carbono que varía entre el 0.05 % y el 2.0 %, este porcentaje influye directamente en sus propiedades físicas y mecánicas. (Callister, W. D., & Rethwisch, D. G., 2022; Maldonado-Bandala et al., 2020).

La resistencia a la tracción también es otra de sus características importantes debido a que esto permite que soporte cargas grandes sin deformarse. El tener presencia de carbono puede ser una ventaja, pero se debe cuidar el porcentaje de este ya que, si se aumenta demás, el acero se vuelve más duro, aunque también más frágil. Por eso, los aceros de bajo carbono, como el AISI 1018, tiene un equilibrio adecuado entre resistencia, ductilidad y facilidad de soldadura, siendo ideales para componentes estructurales, ejes, engranajes y piezas de maquinaria. (Firmanto, H. et al., 2022)

A pesar de todas las ventajas visibles del acero al carbono su debilidad es la corrosión. Al no tener en su composición elementos como el cromo o el níquel, presentes en aceros inoxidables, el acero al carbono se oxida fácilmente cuando está expuesto a ambientes húmedos o contaminados. Lo que obliga a aplicar recubrimientos o utilizar inhibidores. (Medupin, R.O et al., 2023)

2.5.1 Propiedades del acero AISI 1018.

El acero AISI 1018 es un tipo de acero al carbono de bajo contenido en carbono, ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y estructurales gracias a su buena maquinabilidad, soldabilidad y resistencia moderada. Su composición química según la Especificación Estándar para Requisitos Generales de Barras de Acero, Carbono y Aleación, Forjadas en Caliente se presentan en la Tabla 1.

Mecánicamente, el AISI 1018 presenta una dureza promedio de 131 HV, así como también una resistencia a la tracción de 369 MPa, deducida a partir de la experimentación de Adin, M. Ş., & Okumuş, M. La microestructura está formada principalmente por ferrita y perlita debido a su bajo contenido de carbono, esto explica que tenga ductilidad y facilidad de soldadura. (Kong, H. et al., 2021; Adin, M. Ş., & Okumuş, M., 2022)

Tabla 1. Composición química del AISI 1018 (ASTM A29/A29M, 2020).

Elemento	Rango (%)	Función principal
Carbono (C)	0.14 - 0.20	Aumenta la dureza y resistencia del acero.
Manganeso (Mn)	0.60 - 0.90	Mejora la resistencia y la tenacidad.
Silicio (Si)	0.15 – 0.30	Desoxidante que evita porosidades o defectos internos.
Fósforo (P)	Máx. 0.040	Endurecimiento de ferrita.
Azufre (S)	Máx. 0.050	Mejora la maquinabilidad.
Hierro (Fe)	Balance (resto)	Componente base del acero.

2.6 Inhibidores de corrosión

El control de la corrosión en el acero al carbono AISI 1018 en ambientes marino e industriales representa una gran problemática debido a la presencia de cloruros y contaminantes atmosféricos que aceleran la velocidad de corrosión. Una de las estrategias más viables para controlar la corrosión es el uso de inhibidores, debido a que es una alternativa eficiente, económica y se adapta para la protección de metales en diferentes medios agresivos. (Vasilcsin, N et al., 2023; Kadhim, A et al., 2021)

Se pueden definir como una sustancia química que se agrega en pequeñas concentraciones, del orden de partes por millón (ppm) a un entorno corrosivo con el objetivo de modificar las reacciones electroquímicas para reducir la agresividad y controlar la corrosión produciéndose varios fenómenos en la interfase como la adsorción, la modificación de la doble capa electroquímica, cambios en la cinética y en algunos casos ocurren procesos de pasivación. (Vasilcsin, N et al., 2023; Kadhim, A et al., 2021)

Cuando los inhibidores se adsorben en la superficie del metal crean una barrera que separa al metal del medio ambiente en la interfase. Esta acción forma una barrera física o efecto barrera, que reduce el acceso y adsorción de iones agresivos sobre el metal, alterando los procesos anódicos y catódicos. Los productos de corrosión formados pueden ser considerados no protectores si son porosos, no adherentes y se disuelven en el medio, sin embargo, son considerados protectores si son adherentes al metal, no se disuelven en el medio y presentan pocos poros. (Vasilcsin, N et al., 2023; Kadhim, A et al., 2021)

Los inhibidores eficientes presentan en su estructura moléculas de enlaces insaturados, anillos aromáticos, heteroátomos tales como O, N, S, etc. o grupos funcionales

mostrados en la siguiente Tabla 2. La interacción de estas moléculas con el metal puede hacer que se presenten interacciones electrostáticas llamadas fisisorción, formación de enlaces llamados quimisorción o mecanismos mixtos. (Popoola, L. T., 2019).

Tabla 2. Grupos funcionales que caracterizan a un inhibidor eficiente. (Popoola, L. T., 2019).

Grupo Funcional	Nombre	Grupo Funcional	Nombre
$-OH$	Hidroxi	$-NH_2$	Amino
$-C - N - C$	Amina	$-SH$	Tiol
$-NO_2$	Nitro	$-C \equiv C -$	Alquinos
$-CONH_2$	Amida	$-S = O$	Sulfóxido
$-COOH$	Carboxi	$-NH$	Imino
$-S -$	Sulfuro	$-N = N - N -$	Triazol
$-C = S -$	Tio	$-C - O - C -$	Epoxi
$-P = O$	Fosfonio	$-P -$	Fosfo
$-Se -$	Seleno	$-As -$	Arsano

2.6.1 Clasificación de los inhibidores de corrosión

2.6.1.1 Inhibidores anódicos

Los inhibidores anódicos reducen la velocidad de la reacción de oxidación o disolución del metal, lo que provoca la formación de capas pasivas estables sobre la superficie metálica. Dentro de la electroquímica, desplaza el potencial de corrosión hacia valores más nobles y disminuyen la densidad de corriente anódica. Debe tenerse cuidado con la cantidad del inhibidor que se usa, ya que si se agregan dosis menores a las requeridas se genera una pasivación parcial, lo que favorece la corrosión localizada. Algunos ejemplos de este tipo de inhibidor son los compuestos inorgánicos como cromatos,

nitritos o molibdatos. (Ma, I. W et al., 2022; Al-Amiery et al., 2023; Revie, R. W., & Uhlig, H. H, 2025)

2.6.1.2 Inhibidores catódicos

La forma en la que actúan estos inhibidores es disminuyendo la velocidad de las reacciones catódicas; la reducción del oxígeno donde el medio está aireado o la evolución de hidrógeno en medios ácidos. Bloquea los sitios activos catódicos o formando películas protectoras insolubles. A diferencia de los inhibidores anódicos estos no inducen a la corrosión localizada. Algunos ejemplos de este tipo de inhibidor son las sales de zinc, fosfatos o compuestos de calcio. (Schweitzer, P. A., 2009; Ma, I. W et al., 2022; Al-Amiery et al., 2023)

2.6.1.3 Inhibidores mixtos

Los inhibidores mixtos afectan a ambas ramas, anódicas y catódicas, donde se ve afectado el potencial de corrosión. Protegen debido a que forman una barrera en la superficie del metal, ejemplo de este tipo de inhibidor son los compuestos orgánicos y entre ellos los productos farmacéuticos por lo que se espera que la cefalexina actúe como un inhibidor mixto. (Ma, I. W et al., 2022; Al-Amiery et al., 2023)

2.6.2 Uso de fármacos como inhibidores de corrosión

Debido al uso de inhibidores tóxicos como cromatos, se ha buscado una forma más sostenible y económica, llamados inhibidores verdes que incluyen extractos de plantas, biopolímeros y recientemente medicamentos caducos. (Verma, C. et al., 2018).

El uso de fármacos caducos como inhibidores de corrosión ha despertado interés debido a su estructura química compleja y también a que representa una alternativa al problema de la disposición final de medicamentos vencidos. Antibióticos de la familia de las cefalosporinas como cefalexina, cefazolina y cefradina, contienen múltiples heteroátomos y anillos aromáticos que los hacen ser candidatos a inhibidores de la corrosión eficientes. (Abdallah, M. et al., 2012; Ramírez-Cano, J. A., & Orozco-Cruz, R., 2024)

2.7 Métodos de evaluación de la corrosión

Para evaluar la eficiencia de los inhibidores de la corrosión se hace uso de métodos experimentales descritos en normas ASTM para verificar su reproducibilidad, estos métodos permiten medir la degradación del acero AISI 1018 y analiza los mecanismos electroquímicos implicados. Se clasifican en dos: los métodos gravimétricos y métodos electroquímicos, ambos son complementarios. El método gravimétrico proporciona la relación directa de la pérdida de material metálico, y los métodos electroquímicos permiten analizar los procesos interfaciales de la corrosión. (Bijapur, K. et al., 2023; Revie, R. W., & Uhlig, H. H, 2025)

2.7.1 Método gravimétrico

Este método mide directamente la pérdida de masa de una probeta metálica tras su exposición en un medio corrosivo durante un tiempo determinado. Nos brinda el promedio del daño por corrosión; la disolución metálica y la formación de productos de corrosión. Siendo eficiente en la evaluación de inhibidores por un tiempo prolongado.

El método por pérdida de peso se rige por medio de la norma ASTM G1-03 la cual describe el procedimiento experimental que consiste en: preparación superficial de las probetas limpieza y pulido, medición precisa del peso inicial, exposición de la probeta al medio corrosivo con inhibidor y sin inhibidor, limpieza de los productos de corrosión y medición precisa de la masa final.

Indica la velocidad de corrosión la cual se calcula gracias a la diferencia de masas en el proceso, mediante la ecuación:

$$velocidad\ de\ corrosi3n = \frac{K * W}{A * T * D} \quad (1)$$

Donde:

K = una constante

W = masa perdida en gramos

T = tiempo se exposici3n en horas

D = densidad en g/cm^3

A = 3rea en cm^2

Este m3todo permite evaluar la eficiencia del inhibidor, su grado de cobertura, compara la respuesta del material con y sin inhibidor, adem3s de relacionar los resultados con el m3todo electroqu3mico. (Fontana et al., 2018; ASTM G1-03)

2.7.2 M3todos electroqu3micos

Son m3todos que ayudan a estudiar la corrosi3n y los fen3menos que ocurren al momento y que adem3s tienen gran efectividad. La informaci3n que proporcionan estos m3todos son la cin3tica de las reacciones y los mecanismos de inhibici3n, midiendo la corriente, potencial o impedancia en una celda electroqu3mica de 3 electrodos; de trabajo, de referencia y auxiliar, as3 como el electrolito deseado para simular el medio deseado. Con un potenciostato se controla el potencial, ajusta la corriente y almacenan

los datos, entre otras cosas. En presencia de inhibidores, los mecanismos de corrosión cambian debido al proceso de adsorción, bloqueo de sitios en la superficie y cambios en la doble capa electroquímica, por ello se requieren de estos métodos para observar lo que ocurre y como ocurre. (Crisan, M et al., 2024; Adel, o et al., 2025; Andrade, C. 2020)

2.7.2.1 Potencial en circuito abierto (OCP)

El potencial de circuito abierto es una técnica donde se evalúa la estabilidad inicial del sistema antes de aplicar cualquier estímulo externo, en otras palabras, es el potencial natural entre el metal y el electrolito, donde las reacciones catódicas y anódicas están en equilibrio. (Sawada, K. et al., 2024)

Este método no proporciona velocidad de corrosión únicamente nos dice la tendencia de un metal a corroerse en cierto medio. En este método el desplazamiento hacia potenciales más negativos o activos pueden indicar mayor tendencia a corroerse, mientras potenciales más nobles o menos negativos indican la tendencia a protegerse. (Shin, S.J et al., 2022; Sawada, K. et al., 2024; Cristiani, P. et al., 2025)

La estabilización del potencial a través del tiempo da como resultado un sistema estacionario que se utiliza como punto de partida en otras técnicas electroquímicas como EIS y curvas de polarización. (Cristiani, P. et al., 2025)

2.7.2.2 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)

La espectroscopia de impedancia electroquímica o EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) es una técnica no destructiva por lo que no daña al material mientras la prueba ocurre. Analiza y mide la respuesta en el sistema del metal con electrolito cuando

se le aplica una mínima señal de corriente alterna a baja amplitud al sistema, que ronda alrededor del potencial de circuito abierto en un amplio rango de frecuencias. Permite observar los diferentes procesos electroquímicos que ocurren a diferentes intervalos de tiempo. Y se gráfica en diagramas de Bode y Nyquist para obtener la información. (Figura 5). (Bard, A. J et al., 2022)

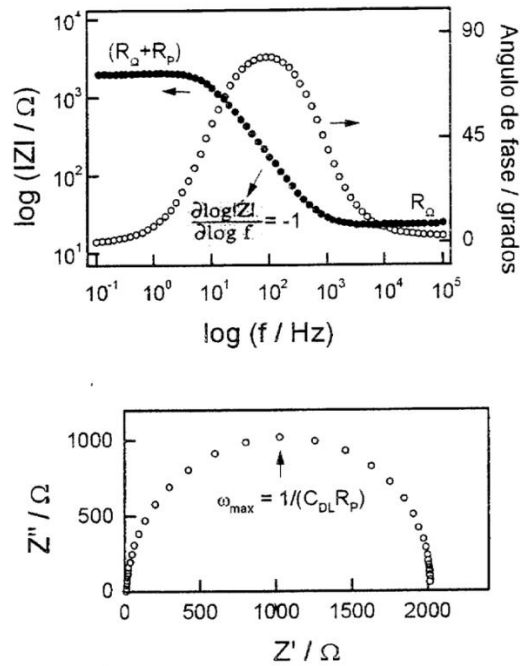


Figura 5. Diagrama de Bode y Nyquist.

Mediante esta técnica es posible obtener la información de los mecanismos de corrosión que ocurren; procesos de transferencia de carga, de difusión, adsorción o desorción de especies. Esto ayuda a observar la formación de películas en la superficie y la resistencia del material a la corrosión. En casos donde se estudian inhibidores el aumento en la transferencia de carga o una disminución en la capacitancia de la doble capa electroquímica podría indicar que el inhibidor actúa eficientemente ya que disminuye la velocidad de corrosión. (Revie, R. W., & Uhlig, H. H, 2025; Asperti, D. et al., 2024; Selim, Y.A et al., 2024)

Esta técnica se realiza utilizando la celda de 3 electrodos; de trabajo, de referencia y auxiliar con ayuda de un potencióstato, los resultados se representan mediante diagramas de Nyquist y Bode y se ajustan utilizando circuitos equivalentes para obtener los parámetros de resistencia a la solución (R_s) resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) y capacitancia de la doble capa (C_{dl}). (Orazem, M. E., & Tribollet, B., 2008; Zhang, R. et al., 2024)

2.7.2.3 Curvas de polarización potenciodinámicas (CP)

La técnica de curvas de polarización potenciodinámicas es una de las más utilizadas para evaluar la corrosión en los metales y la eficiencia de inhibidores en diferentes medios propuestos. Los resultados se obtienen al variar el potencial del electrodo de trabajo con un barrido controlado que parte del potencial de circuito abierto y registra la corriente resultante, llamada densidad de corriente. (Bard, A. J et al., 2022; Zaroual, A. et al., 2024)

Este método electroquímico proporciona los procesos electroquímicos que ocurren en el metal, de las curvas resultantes se obtienen parámetros electroquímicos como el potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente (I_{corr}), estos ayudan a calcular la velocidad de corrosión del metal en el medio estudiado, la densidad de corriente es proporcional a la disolución del metal, por lo que su disminución indica la efectividad del inhibidor. También podemos obtener las pendientes de Tafel anódica y catódica (Figura 6), estas proporcionan información acerca de los mecanismos de las reacciones presentes en el proceso de la corrosión. (Soltani, N. et al., 2012; Zaroual, A. et al., 2024)

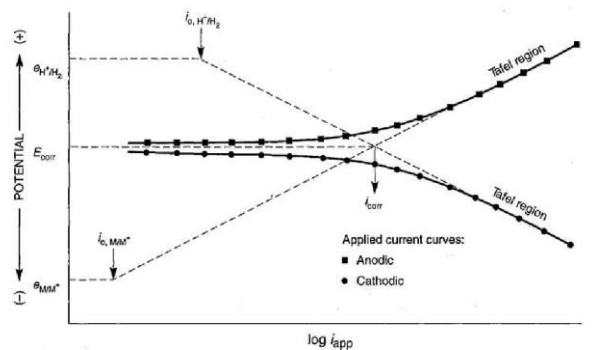


Figura 6. Esquema de curvas de polarización rama anódica y catódica. (Ucci Galasso, M. S, 2025).

En estudios de corrosión con inhibidores las curvas potenciodinámicas indican la eficiencia de este al poder comparar los valores de densidad de corriente y el potencial de la muestra sin inhibidor y con inhibidor. También indica que tipo de inhibidor es, catódico, anódico o mixto. (Verma, C. et al., 2021).

La pasividad es un fenómeno mediante el cual un metal o aleación disminuye considerablemente su velocidad de corrosión debido a la formación de una película protectora de óxidos en su superficie. Esta capa suele desarrollarse de manera natural en ambientes oxidantes y actúa como una barrera que limita la interacción del metal con el medio corrosivo. En el caso del hierro, óxidos como la hematita (Fe_2O_3) y la magnetita (Fe_3O_4) pueden mantenerse estables en determinados rangos de potencial y pH, proporcionando protección al material. La curva de polarización anódica teórica Figura 7 muestra que inicialmente el metal se encuentra en una región activa donde hay una disolución continua; posteriormente, al alcanzarse una densidad de corriente crítica, se forma la película pasiva y la corriente disminuye drásticamente, manteniéndose en valores bajos dentro de la región pasiva. Sin embargo, si el potencial continúa incrementándose y el medio se vuelve excesivamente oxidante, la película protectora

puede perder su estabilidad y comenzar a degradarse, entrando en la región transpasiva, donde la velocidad de corrosión vuelve a aumentar. Por lo tanto, la pasividad constituye un importante mecanismo de protección contra la corrosión, aunque su efectividad depende de las condiciones electroquímicas del entorno. (Parangusan, H. et al., 2021; Ucci Galasso, M. S, 2025).

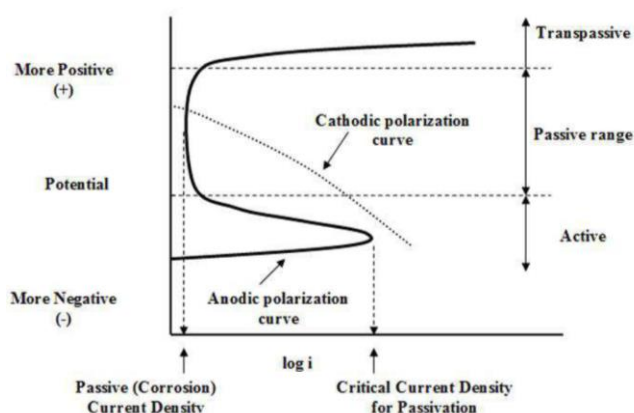


Figura 7. Curva de polarización anódica teórica. (Ucci Galasso, M. S, 2025).

2.7.2.4 Resistencia a la Polarización Lineal (LPR)

La técnica de resistencia a la polarización lineal o LPR (Linear Polarization Resistance) mide la respuesta de corriente generada al aplicar una perturbación de potencial, generalmente alrededor del potencial de corrosión. La gráfica que se genera tiene una pendiente que corresponde a la resistencia a la polarización (R_p), además es una técnica no destructiva y puede monitorear continuamente la corrosión. (Li, X. et al., 2021; Sun, Y.P. et al., 2019).

La ecuación Stern- Geary relaciona la resistencia a la polarización con la densidad de corriente: (Sun, Y.P. et al., 2019)

$$i_{corr} = \frac{\beta}{R_p} \quad (2)$$

Donde β es una constante de proporcionalidad que depende de la pendiente de Tafel anódica (b_a) y pendiente catódica (b_c). (Sun, Y.P. et al., 2019; ASTM G59-97)

$$\beta = \frac{b_a * b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad (3)$$

2.7.3 Normas ASTM aplicables a ensayos de corrosión

Para llevar a cabo las pruebas gravimétricas y electroquímicas en el estudio de la corrosión se requieren de normas ASTM, estas proporcionan procedimientos estandarizados para la preparación de muestras, ejecución de pruebas, cálculos y análisis. Garantiza la reproducibilidad de todas las pruebas y a que sean válidas.

- ASTM G1-03: Indica los procedimientos recomendados para la preparación, limpieza y evaluación de las muestras utilizadas para el estudio de la corrosión. Describe métodos para eliminar productos de corrosión formados en las pruebas sin alterar al material base. Da recomendaciones sobre métodos químicos y mecánicos de limpieza dependiendo del tipo de metal y del medio corrosivo. Esta norma asegura que los resultados de pérdida de masa sean confiables y reproducibles. (ASTM 51-03, 2012)
- ASTM G31-21: Describe los procedimientos para las pruebas de inmersión de un metal en un electrolito, describe como preparar las muestras, el volumen a utilizar, como exponerlo, como manejar la temperatura y como calcular la velocidad de corrosión. (ASTM G31-21, 2025)

- ASTM G59-97: Dice el procedimiento para realizar mediciones de resistencia a la polarización mediante técnicas electroquímicas. Describe cómo aplicar pequeñas perturbaciones de potencial al electrodo de trabajo y registrar la respuesta de corriente para determinar la resistencia de polarización del sistema. La norma también da recomendaciones sobre el rango de potencial, la velocidad de barrido y la interpretación de resultados. (ASTM G59-97, 2020)
- ASTM G102-23: Da los métodos para calcular la velocidad de corrosión a partir de datos electroquímicos; mediante curvas de polarización o resistencia de polarización lineal. También describe la aplicación de la ecuación de Stern-Geary para relacionar la resistencia de polarización con la corriente de corrosión. Esta norma es importante para interpretar los resultados de técnicas electroquímicas. (ASTM G102-23, 2023)
- ASTM G193-22: Esta norma define conceptos fundamentales como potencial de corrosión, densidad de corriente de corrosión, resistencia de polarización, pasivación, corrosión uniforme, entre muchos otros términos utilizados en investigaciones electroquímicas, homogeneizando el lenguaje técnico. (ASTM G193-22, 2022)

2.8 Circuitos equivalentes y fundamentos electroquímicos de la corrosión

Cuando se utiliza la técnica electroquímica de espectroscopia de impedancia electroquímica se necesitan de circuitos equivalentes para interpretar los datos. Los circuitos representan los procesos electroquímicos que ocurren en la interfase metal–electrolito mediante resistencias, capacitancias e inductancias. Cada componente del circuito se asocia con fenómenos físicos que ocurren durante el proceso de corrosión (Zhang et al., 2024).

La mayoría de los sistemas de corrosión incluyen la resistencia de la solución (R_s) que representa la oposición del electrolito al flujo de corriente, la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) que se relaciona con la velocidad de las reacciones electroquímicas que ocurren en la superficie metálica y la capacitancia de la doble capa eléctrica (C_{dl}) que se origina por la acumulación de cargas en la interfaz metal-electrolito. (Hoshi & Itagaki, 2018)

Los circuitos equivalentes ayudan a ajustar los datos obtenidos de los diagramas de Nyquist y Bode, con ellos se comprenden los mecanismos de corrosión. Además, para el estudio de la corrosión con presencia de inhibidores es muy útil el simular circuitos equivalentes ya que podemos representar fenómenos como la difusión de especies, formación de productos de corrosión y la presencia de recubrimientos. (Zhang et al., 2024; Policastro et al., 2023)

2.8.1 Cinética de la corrosión

La corrosión es un proceso electroquímico regido por la cinética de las reacciones anódicas y catódicas que ocurren al mismo tiempo sobre la superficie del metal. La cinética estudia la velocidad a la que estas reacciones actúan, describe que tan rápido ocurren, dependiendo de factores como la transferencia de carga o la difusión de especies. (Ionescu, G. C. et al., 2024)

La densidad de corriente está relacionada con la velocidad de corrosión y representa la transferencia electrónica que ocurre entre metal y electrolito. Los inhibidores modifican la cinética, ya sea disminuyendo la velocidad de reacción anódica, catódica o ambas. (Revie, R. W., & Uhlig, H. H., 2025)

La reacción de oxidación o anódica es donde el metal se disuelve en el electrolito perdiendo electrones formando iones metálicos, se representa como:



La reacción de reducción o catódica, los electrones son consumidos por especies oxidantes que están en el medio como protones y oxígeno. En medios ácidos se reduce el ión hidrógeno representado como :



En medios neutros o básicos se reduce el oxígeno representado como:



Estas reacciones ocurren al mismo tiempo y la velocidad de corrosión está dada por el equilibrio de la producción de electrones formados en la reacción anódica y su consumo en la reacción catódica. Y se puede analizar por métodos electroquímicos como EIS, curvas de polarización y LPR. (Zhang et al., 2024; Avdeev, Y.G. et al., 2024)

2.8.2 Ley de Faraday y su aplicación en corrosión

La ley de Faraday relaciona la cantidad de material que se oxida en el electrodo de trabajo con la cantidad de carga eléctrica. Lo que ayuda en las pruebas electroquímicas a relacionar con el material que se disuelve. Técnicamente la ley dice: la masa disuelta durante la corrosión es proporcional a la carga eléctrica transferida en la reacción y se puede representar como: (Verma, C., et al., 2021; Revie, R. W., & Uhlig, H. H., 2025)

$$m = \frac{ItM}{nF} \quad (7)$$

Donde:

m = masa disuelta

M = masa molar del metal

I = corriente eléctrica

n = número de electrones transferidos

$t = \text{tiempo}$

$F = \text{constante de Faraday}$

2.8.5 Diagramas de Pourbaix

Estos diagramas representan la estabilidad termodinámica de metales en un electrolito acuoso. Muestran regiones donde el metal puede encontrarse en estado inmune, corrosión activa o pasivación. Los diagramas únicamente muestran datos termodinámicos y no dicen nada acerca de la velocidad de corrosión. (Barthel, J., & Deiss, R., 2021)

Se representan en el eje de las Y el potencial eléctrico (E) y el en eje de las X el pH del electrolito, lo que ayuda a predecir su comportamiento frente a diferentes ambientes acuosos. También es importante recalcar que es para metales puros y no para aleaciones, por lo que ayuda a darnos una idea sin ser exacto en cuanto a su comportamiento. (Farsi, C. et al., 2025)

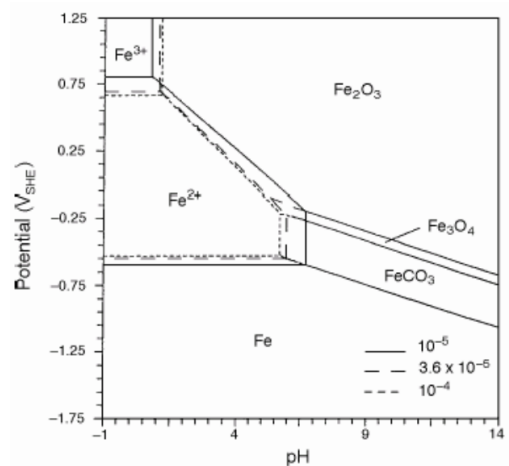


Figura 8. Diagrama de Pourbaix de hierro. (Santos, R. 2014)

2.9 Isotermas de adsorción

Son modelos teóricos matemáticos que se utilizan para relacionar la interacción del inhibidor de la corrosión con la superficie metálica mostrando el grado de cobertura y la eficiencia obtenida, proporciona así información sobre el mecanismo de adsorción; fisisorción o quimisorción y la naturaleza de la interacción inhibidor–metal. (Verma et al., 2021).

2.9.1 Isoterma de Langmuir

Este modelo se emplea para obtener la eficiencia de los inhibidores, es uno de los más usados en este tipo de estudios esto se debe a que es simple y tiene una buena correlación de la adsorción. En este modelo se asume que la superficie metálica es homogénea, cada sitio activo puede ocuparse solo por una molécula y no existen interacciones entre las moléculas adsorbidas. Verma et al., 2021).

El modelo permite relacionar la fracción cubierta de la superficie (θ) con la concentración del inhibidor mediante la ecuación:

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C \quad (8)$$

Donde:

C = Concentración del inhibidor

K_{ads} = constante de adsorción

También se puede calcular la energía libre estándar de adsorción a partir de la constante de adsorción, lo que ayuda a saber si es fisisorción (valores cercanos a -20 kJ/mol) o quimisorción (valores cercanos a -40 kJ/mol). (Zhang, J. et al., 2023)

2.9.2 Isoterma de Freundlich

La isoterma de Freundlich es un modelo experimental para procesos de adsorción en superficies heterogéneas, donde los sitios activos de adsorción tienen diferentes energías. Se expresa mediante la ecuación en su forma logarítmica:

$$\log \theta = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad (9)$$

Donde:

θ = fracción cubierta de la superficie n = parámetro de la intensidad de adsorción

K = constante de adsorción C = concentración del inhibidor

Cuando los datos experimentales no se ajustan con la isoterma de Langmuir significa que la superficie es heterogénea, hay interacciones complejas o condiciones no ideales y es necesario usar este modelo de isoterma. Además, en investigaciones recientes es usado este modelo para inhibidores orgánicos. (Ituen, E., Akaranta, O., & James, A., 2017)

2.9.3 Isoterma de Temkin

Este modelo considera que disminuye la energía de la capacidad de adherencia con el aumento de la cobertura superficial debido a que las moléculas adsorbidas interactúan de manera repulsiva o atractiva. Se utiliza en sistemas no ideales donde las moléculas tienen interacciones, además se ha utilizado junto con Langmuir y Freundlich para describir mejor los comportamientos. Se expresa como:

$$\theta = \frac{1}{a} \ln(KC) \quad (10)$$

O de forma lineal como

$$\theta = B \ln C + B \ln K \quad (11)$$

Donde:

θ = fracción cubierta de la superficie B = parámetro de la intensidad de adsorción

K = constante de adsorción C = concentración del inhibidor

(Zhang et al., 2021; Ituen, E., Akaranta, O., & James, A., 2017).

2.9.4 Isoterma de Frumkin

Este modelo también toma en cuenta la interacción entre las moléculas adsorbidas permitiendo distinguir entre interacciones atractivas y repulsivas. Con este modelo podemos interpretar la estabilidad de la película protectora. Se expresa como: (Vaszilcsin, C et al., 2023; Al-Amiery, A. et al., 2023)

$$\ln \left(\frac{\theta}{1 - \theta} \right) = \ln(KC) + a\theta \quad (12)$$

Donde:

θ = fracción cubierta de la superficie a = parámetro de la interacción lateral

K = constante de adsorción C = concentración del inhibidor

3. Metodología.

3.1 Reactivos

3.1.1 Cloruro de sodio.

También conocido como sal común, el cloruro de sodio es un compuesto iónico formado por iones sodio (Na^+) y cloruro (Cl^-). Es uno de los electrolitos más utilizados en estudios de corrosión. (Figura 9)



Figura 9. Reactivo cloruro de sodio.

- Aplicación: Se utiliza en la industria alimentaria, farmacéutica, química, tratamiento de aguas, deshielo de carreteras y como electrolito en estudios electroquímicos y de corrosión.
- Fórmula: NaCl
- Peso molecular: 58.44 g/mol
- Apariencia: Sólido cristalino blanco, inodoro y soluble en agua.

3.1.2 Sulfato de sodio

El sulfato de sodio es una sal inorgánica compuesta por cationes sodio (Na^+) y aniones sulfato (SO_4^{2-}). En estudios de corrosión se emplea frecuentemente para simular medios industriales o atmosféricos con presencia de sulfatos (Figura 10).

- Aplicación: Se utiliza en la fabricación de detergentes, papel, vidrio, textiles, productos químicos y como reactivo en laboratorios de investigación.
- Fórmula: Na_2SO_4
- Peso molecular: 142.04 g/mol
- Apariencia: Sólido cristalino blanco, inodoro y altamente soluble en agua.



Figura 10. Reactivo sulfato de sodio.

3.2 Inhibidor.

El inhibidor se obtiene de productos farmacéuticos caducos, específicamente de la cefalexina, que presenta un espectro antimicrobiano eficaz contra los patógenos más comunes en el ámbito clínico. La cefalexina pertenece a una clase de medicamentos

llamados antibióticos de cefalosporina. Se propone este medicamento como inhibidor de la corrosión ya que posee los elementos y grupos funcionales (enlaces insaturados, anillos aromáticos, heteroátomos tales como N y S.) mostrados en la Figura 11, además tiene enlaces π presentes en la estructura insaturada, estos grupos poseen pares de electrones que favorece la interacción y adsorción sobre la superficie metálica, lo que permite formar una película protectora que reduce el contacto metal con electrolito y dificulta las reacciones de corrosión dando como resultado la reducción de transferencia de carga y velocidad de corrosión esto lo hace candidato a ser utilizado como un inhibidor de la corrosión. Además de que es soluble en agua. (L.E. Tsygankova et al., 2022).

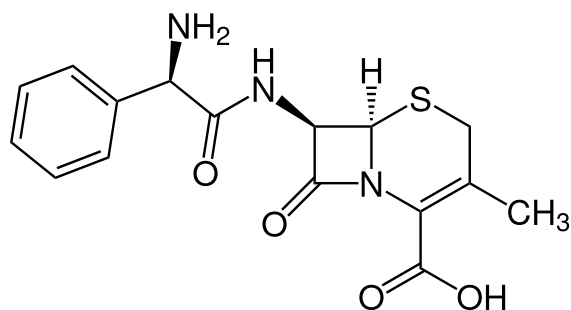


Figura 11. Estructura molecular de la Cefalexina

La Cefalexina se agrega en 400 ml del electrolito de la experimentación preparado con 0.1 M Na_2SO_4 + 3 wt % NaCl en agua destilada que simulan atmósfera marina e industrial para obtener las concentraciones de 50, 100 y 300 ppm.

3.3 Pruebas de pérdida de masa.

3.3.1 Corte de las muestras.

Para el cortado de las muestras de acero al carbono se hizo uso de una cortadora de disco, llevando a cabo los cortes a bajas revoluciones para evitar que la temperatura

afecte al material. Las muestras se cortan en cilindros de 1 centímetro de diámetro por 1cm de altura.

3.3.2 Pulido de las muestras para la prueba de pérdida de masa.

Una vez que se tienen las muestras cortadas, se lleva a cabo el desbastado de todos los lados del cilindro con lija de carburo de silicio de grano: 100, 220, 360, hasta grano 600 (Figura 12). Al finalizar el pulido las muestras se limpian con acetona.



Figura 12. Muestras de acero al carbono AISI 1018 pulidas.

3.3.3 Medición inicial de las muestras.

Se mide con calibrador vernier el diámetro y altura de las muestras para calcular el área de contacto y se pesan en la balanza analítica para la obtención de peso inicial.

3.3.4 Inmersión de las muestras.

Las muestras pulidas se sumergen por 7 días en una solución 0.1 M Na_2SO_4 + 3 wt % NaCl en agua destilada que simulan atmósfera marina e industrial con 4 concentraciones; blanco, 50 ppm, 100 ppm y 300 ppm, con volumen de 50 mL en un recipiente de vidrio

donde en la base tendrá perlas de ebullición para evitar que la muestra tenga contacto directo con el recipiente (Figura 13).

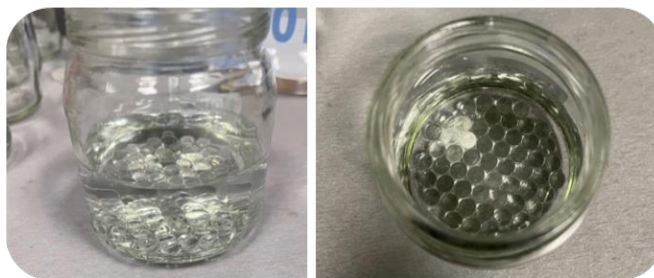


Figura 13. Solución 0.1 M Na_2SO_4 + 3 wt% NaCl en agua destilada con perlas de ebullición en el fondo listo para la inmersión de las muestras.

3.3.5 Limpieza de las muestras.

Los productos de corrosión que generen las muestras Figura 14, serán retirados por medio de ultrasonido en una solución de HCl, sp gr 1.19 con concentración 37% p/p. Las muestras se colocaron en un baño ultrasónico con dicha solución durante el tiempo necesario para remover los productos de corrosión adheridos a la superficie, evitando una limpieza excesiva que pudiera afectar el metal base. Después las probetas se enjuagaron con agua destilada y etanol y se secaron con aire antes de realizar las mediciones correspondientes.



Figura 14. Solución 0.1 M Na_2SO_4 + 3 wt% NaCl en agua destilada a 50 ppm de Cefalexina caduca con la muestra inmersa en el día 7 donde se observan productos de corrosión formados.

3.3.6 Medición final de las muestras.

Por último, cuando las muestras están limpias de los productos de corrosión formados se vuelven a pesar en balanza analítica para obtener el peso final.

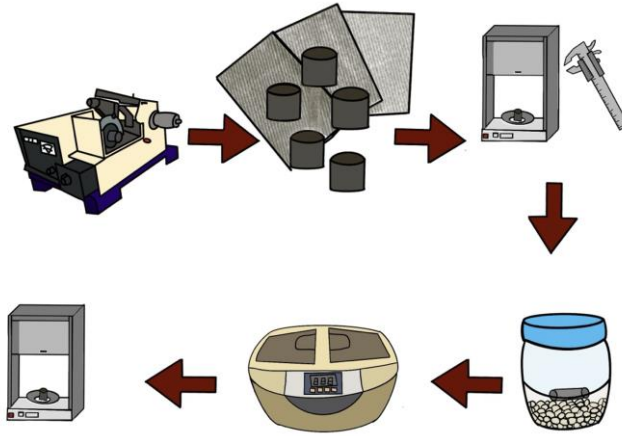


Figura 15. Metodología de probetas acero al carbono AISI 1018 para su uso en las pruebas de pérdida de masa.

Después de los 7 días de inmersión las muestras se remueven de la solución y se procederá a limpiarlas para obtener la pérdida de masa total ΔW_T utilizando la siguiente fórmula (Martínez-González, J. J et al., 2025; ASTM G1-03, 2012):

$$\Delta W_T = \frac{(m_i - m_f)}{At} \quad (13)$$

Donde:

m_i = Peso de la muestra al inicio de la prueba

m_f = Peso de la muestra al final de la prueba

A = área de la muestra expuesta

t = tiempo de inmersión

La eficiencia del inhibidor será obtenida a partir de esta prueba con la siguiente ecuación (Martínez-González, J. J et al., 2025; ASTM G1-03, 2012):

$$\text{I. E. (\%)} = \frac{(\Delta W_1 - \Delta W_2)}{\Delta W_1} \quad (14)$$

Donde:

$\Delta W_1 = \text{Pérdida de masa de la muestra sin inhibidor}$

$\Delta W_2 = \text{Pérdida de masa de la muestra con inhibidor}$

Y la velocidad de corrosión se obtendrá de la siguiente ecuación:

$$\text{velocidad de corrosión} = \frac{K * W}{A * t * D} \quad (15)$$

Donde:

$K = \text{constante de conversión dimensional}$

$t = \text{tiempo de exposición en horas}$

$A = \text{área en cm}^2$

$W = \text{masa perdida en gramos}$

$D = \text{densidad en g/cm}^3$

3.4 Pruebas electroquímicas.

Para realizar las pruebas electroquímicas se utilizarán probetas para hacer la experimentación, se realizaron utilizando la siguiente metodología ilustrada en la Figura 16 y descrita a continuación.

3.4.1 Cortado de las muestras.

Para el cortado de las muestras de acero al carbono se hace uso de una cortadora de disco, llevando a cabo los cortes a bajas revoluciones para evitar que la temperatura afecte al material. Las muestras se cortan en cilindros de 1 cm x 1 cm.

3.4.2 Encapsulado de las muestras.

Para elaborar las pruebas electroquímicas de corrosión se realizará el encapsulado de las muestras para así enfocar el ataque en una zona específica. Para este procedimiento se utilizará resina epóxica, catalizador y un alambre de cobre.

3.4.3 Pulido de las muestras.

Una vez que se tengan las muestras con las dimensiones deseadas, se llevará a cabo el devastado con lija de carburo de silicio de grano: 100, 220, 360, hasta grano 600. Se lavarán las muestras con acetona para su posterior uso Figura 17.

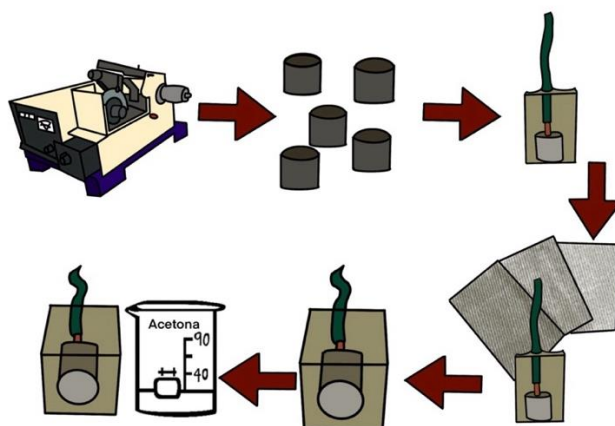


Figura 16. Metodología de elaboración de las probetas acero al carbono AISI 1018 para su uso en las pruebas electroquímicas.



Figura 17. Probeta de acero al carbono AISI 1018, encapsulada con resina epóxica con alambre de cobre, pulida y lavada con acetona para su posterior uso.

Para estas pruebas se utilizará el sistema de referencia de los tres electrodos: electrodo de trabajo, que son las muestras de acero al carbono, electrodo de referencia (Ag/AgCl) y electrodo auxiliar de grafito (Figura 18).

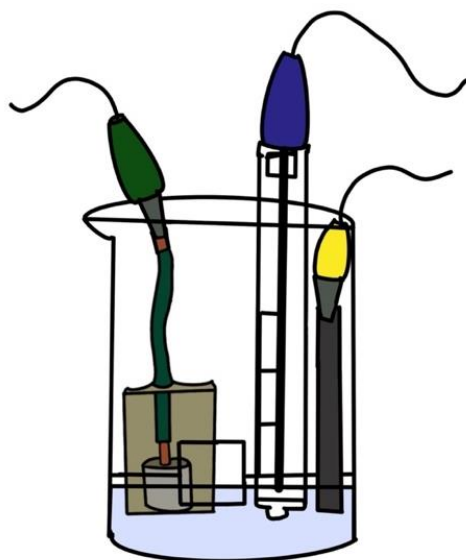


Figura 18. Modelo de pruebas electroquímicas, electrodo de trabajo probeta con el acero al carbono, electrodo de referencia (Ag/AgCl) y electrodo auxiliar de grafito.

En la Figura 19 se observa el sistema real de pruebas electroquímicas antes de iniciar las mediciones. El montaje consiste en un vaso de precipitado de 400 mL con la solución del electrolito que consiste en Na_2SO_4 0.1 M + NaCl 3 wt% en agua destilada que simula la atmósfera marina e industrial, donde se encuentran sumergidos los electrodos de trabajo, referencia y auxiliar. El electrodo de trabajo (acero AISI 1018) está con su superficie metálica uniforme para el comienzo de la prueba. Los cables de conexión hacia el potencióstato se encuentran sujetos mediante pinzas tipo caimán y pasan a través de la tapa plástica que asegura la posición de los electrodos durante la medición además la solución se ve completamente homogénea.

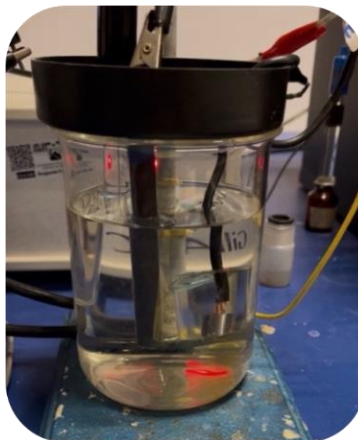


Figura 19. Sistema electroquímico recién preparado, con electrolito transparente, electrodo de trabajo de acero AISI 1018, electrodo de referencia Ag/AgCl y electrodo auxiliar de grafito.

Las técnicas empleadas en este trabajo serán, potencial de circuito abierto (OCP), espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), Resistencia a la polarización lineal (LPR) y curvas de polarización (CP).

Para la medición de OCP se introducirá el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia en el electrolito alrededor de 60 minutos hasta que el potencial de corrosión se estabilice. Para LPR se sumergirá en el sistema de 3 electrodos al electrolito, se polarizará de -10 a +10 mV con una velocidad de barrido de 10 mV/minuto.

En EIS se usará el sistema de 3 electrodos sumergidos en el electrolito, las mediciones se realizarán con corriente alterna AC con un barrido de -10 mV a +10 mV y frecuencia de 10 kHz a 0.01 Hz. Para las curvas de polarización también se sumergen los 3 electrodos al electrolito donde se realizarán en un intervalo de -1000 a +1000 mV respecto al OCP con una velocidad constante de 30 mV/minuto. Para estandarizar las diferentes pruebas electroquímicas se utiliza la norma ASTM G59-97 (2020) que es un método de prueba estándar para la medición de la resistencia de polarización

potenciodinámica, ASTM G3-14 (2019) es una práctica estándar que establece convenciones para la presentación y el reporte de datos electroquímicos de corrosión y ASTM G106-89 (2015) describe un método electroquímico para verificar la precisión de los equipos y algoritmos utilizados en mediciones de impedancia electroquímica.

3.5 Caracterización Química y estructural.

3.5.1 Espectroscopia Infrarroja

El análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) permite identificar los grupos funcionales presentes en una muestra a partir de las bandas de absorción correspondientes a vibraciones moleculares específicas. Se analiza la muestra de cefalexina caduca con el objetivo de confirmar la presencia de grupos funcionales que expliquen su comportamiento como inhibidor de corrosión sobre acero AISI 1018.

3.5.2 Espectroscopia Ultravioleta Visible (UV-Vis)

La espectroscopía UV-Vis se emplea para el seguimiento de cambios en la concentración del inhibidor en solución. En el caso de medicamentos caducos, la espectroscopía UV-Vis permite verificar que las estructuras cromóforas responsables de la adsorción permanecen intactas. Se realizará la caracterización del inhibidor de Cefalexina caduca para determinar su absorbancia y correlacionarla a su concentración.

3.5.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS).

La microscopia electrónica de barrido se utilizará para determinar la morfología de la superficie del material base y material con el uso de inhibidor después de las pruebas electroquímicas. Y la espectroscopía de energía dispersiva se utilizará como una técnica

complementaria al MEB con el propósito de identificar los elementos químicos presentes en la superficie de las muestras permitiendo determinar los productos de corrosión.

3.5.4 Análisis Metalográfico

Se realizó mediante preparación superficial, seguida de un ataque químico con Nital. Posteriormente, las muestras fueron observadas mediante microscopía óptica para identificar las características de la microestructura del acero.

4. Resultados.

4.1 Caracterización Química y estructural.

4.1.1 SEM y EDS

La composición elemental del acero AISI 1018 fue analizada mediante espectroscopía de energía dispersiva (EDS) antes de las pruebas de corrosión para verificar la composición química del acero. La Figura 20 muestra el espectro EDS del acero AISI 1018, mientras que la Tabla 3 resume la composición elemental correspondiente. Se identificó al Fe como el elemento predominante, acompañado de C, Mn, Si, P y S, características de los aceros bajos en carbono. Sin embargo, los valores elevados de C, Mn, P y S respecto a la composición del AISI 1018 pueden estar relacionados con la toma localizada del análisis, la presencia de heterogeneidades superficiales además de las condiciones de preparación y medición de la muestra. La cuantificación de C puede ser sensible a contaminación superficial o a materiales utilizados durante la preparación. Por lo que los resultados deben considerarse como una caracterización localizada de la superficie y no como la composición química global del AISI 1018.

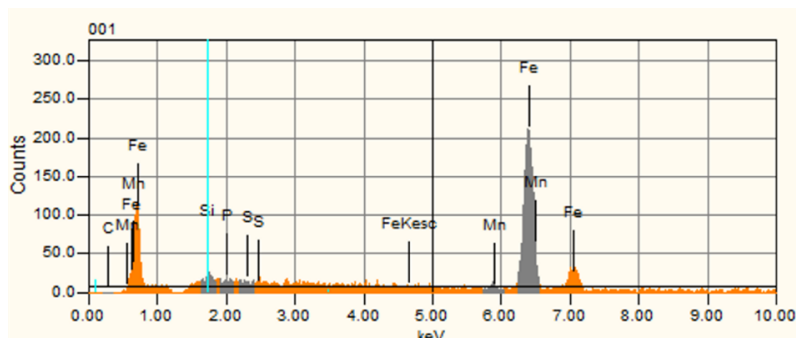


Figura 20. Espectro EDS del acero AISI 1018.

Tabla 3. Composición elemental del blanco de acero AISI 1018 obtenido por el análisis EDS.

Element	Weight (wt.%)
C	7.56
Si	0.38
P	0.18
S	0.13
Mn	2.04
Fe	89.71
Total	100.00

La micrografía SEM del acero AISI 1018 en condición inicial (Figura 21) antes de su exposición al medio corrosivo, muestra una superficie de tonalidad gris y aspecto homogéneo. Se observan líneas finas, paralelas y uniformemente distribuidas, asociadas al proceso de preparación superficial mediante desbaste.

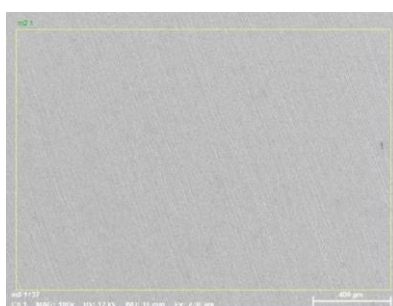


Figura 21. Micrografía SEM (1000X) AISI 1018.

4.1.2 Análisis Metalográfico.

El ataque químico permitió revelar las características de la microestructura del material y diferenciar las regiones presentes en la superficie. En la micrografía del acero 1018 (Figura 22) se observa una microestructura constituida principalmente por una matriz de ferrita, correspondiente a las zonas claras, en menor proporción se encuentran regiones más oscuras asociadas con perlita; es una microestructura formada por ferrita y cementita que es generada durante el enfriamiento del acero a partir de la austenita. La presencia de ambas microestructuras ferrita-perlita es característica de un acero AISI 1018.

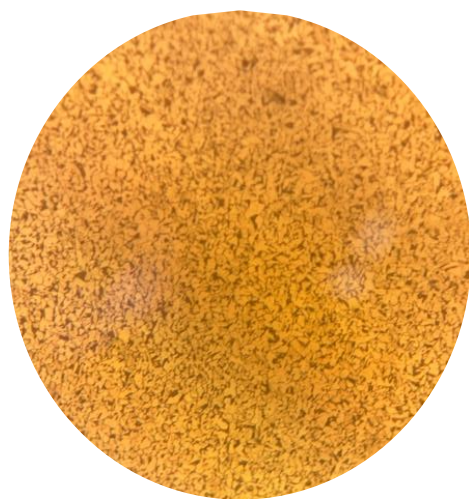


Figura 22. Microestructura del acero AISI 1018 después del ataque químico con Nital, observada mediante microscopía óptica utilizando un objetivo de 400×.

4.1.3 FTIR

En el espectro FTIR obtenido Figura 23, se identificaron diversas bandas de absorción significativas. Entre ellas, destaca una banda alrededor de 3300 cm^{-1} , la cual puede atribuirse a vibraciones de estiramiento O–H o N–H, típicas de alcoholes, ácidos o aminas primarias presentes en estructuras farmacológicas como la cefalexina. Estas

vibraciones indican la capacidad del compuesto para establecer puentes de hidrógeno y adsorberse sobre la superficie metálica. (Skoog, D. A et al., 1998)

En la zona de $3000\text{--}3100\text{ cm}^{-1}$ se observa un pico característico del estiramiento C–H aromático, y en el intervalo de $2850\text{--}2960\text{ cm}^{-1}$ se encontró C–H alifático, vinculadas a cadenas metilo o metileno.

De 2550 a 2600 se observa un pico leve característico del grupo funcional tiol S–H también se observa un pico entre $2300\text{--}2400\text{ cm}^{-1}$ que es característico de CO_2 , es común que en muestras de polvo el equipo lo detecte ya que se encuentra dentro del compartimiento del FTIR (Smal, I.M et al., 2014)

También se observa una absorción en torno a 1700 cm^{-1} característico del grupo C=O (β -lactámico) que suele encontrarse en cefalosporinas. La banda entre $1660\text{--}1680\text{ cm}^{-1}$ se atribuye al grupo –COOH del grupo carboxílico. Entre $1450\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ se detectan vibraciones asociadas al C=C aromático, y a partir de 1350 cm^{-1} hacia abajo se localizan múltiples bandas relacionadas con deformaciones del C–H/ CH_2 / CH_3 . (Socrates, G., 2004).

Las bandas que aparecen entre 1300 y 1000 cm^{-1} suelen asociarse con enlaces C–N y C–O, presentes en estructuras como aminas, éteres o ésteres. Estas vibraciones confirman la presencia de heteroátomos (como azufre y nitrógeno). (Skoog, D. A. et al., 1998).

Finalmente, en la zona inferior del espectro, entre 600 y 900 cm^{-1} , se identifican varias señales que corresponden a torsiones del anillo β -lactámico, confirmando la integridad estructural de la cefalexina caduca desde el 2023. El espectro FTIR obtenido para la

cefalexina coincide de manera general con las bandas características reportadas para este antibiótico

Tabla 4. En ambos casos, la señal más distintiva corresponde al estiramiento del grupo carbonilo del anillo β -lactámico, el cual aparece alrededor de $1700\text{--}1770\text{ cm}^{-1}$, es importante ya que confirma la integridad del anillo β -lactámico de la molécula.

La comparación confirma que las posiciones de las bandas principales, los grupos amida y el anillo, coinciden con lo reportado en la literatura Figura 24, lo cual valida la correcta identificación de la cefalexina utilizada en este estudio y confirma que su estructura no presenta modificaciones significativas estando caduca. (Reddy,B.B et al., 2018)

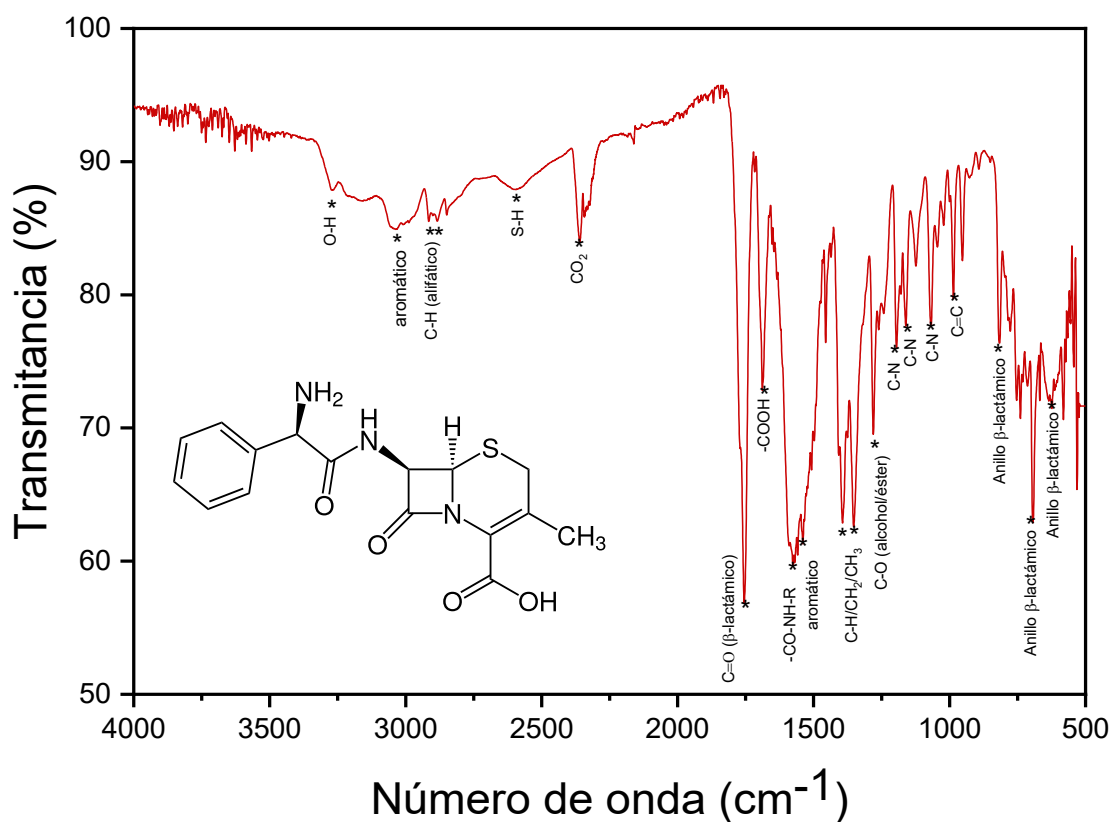


Figura 23. FTIR de la cefalexina caduca

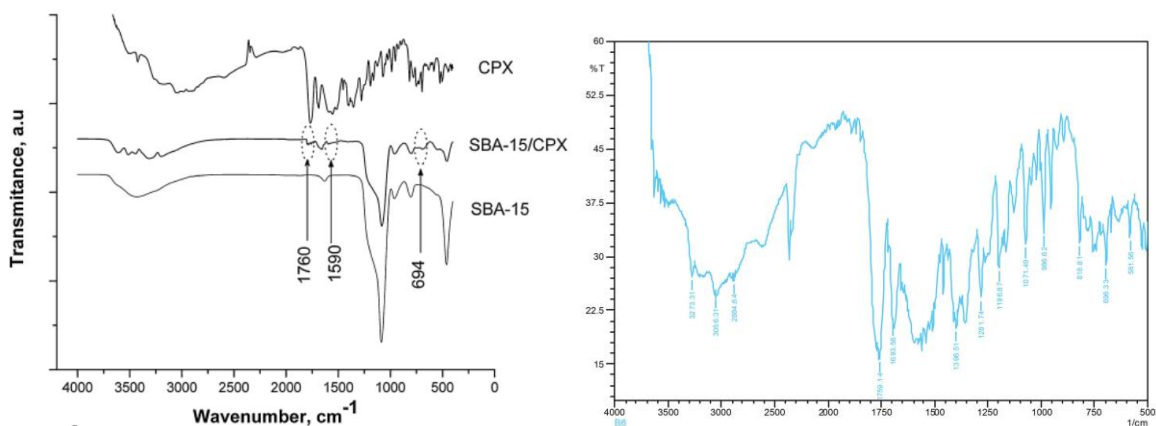


Figura 24. Comparación de FTIR a) CPX Basaldella, E. & Legnoverde, María. (2010) y b) Reddy,B.B et al., 2018

Tabla 4. Bandas de absorción FTIR y grupos funcionales identificados en la cefalexina cadauca.

Número de onda (cm ⁻¹)	Grupo funcional asignado	Tipo de vibración	Interpretación / presencia en cefalexina
~3300	O–H / N–H	Estiramiento	Indica presencia de grupos hidroxilo o aminas.
3000–3100	C–H aromático	Estiramiento	Señal del anillo aromático presente en la estructura.
2850–2960	C–H alifático	Estiramiento	Vibraciones típicas de grupos metilo y metileno.
2550–2600	S–H (tiol)	Estiramiento	Señal débil atribuida al grupo tiol.
2300–2400	CO ₂	Estiramiento asimétrico	Señal externa de CO ₂ del ambiente atrapado en el FTIR
1700–1770	C=O (β-lactámico)	Estiramiento	Banda principal del carbonilo del anillo β-lactámico; confirma integridad del antibiótico.
1660–1680	–COOH (carboxilo)	Estiramiento	Grupo carboxílico presente en cefalexina.

1450–1600	C=C aromático	Estiramiento	Vibraciones del anillo aromático.
1350–1450	C–H / CH ₂ / CH ₃	Deformación	Característico en cadenas laterales
1300–1000	C–N y C–O	Estiramiento	Enlaces presentes en aminas y éteres; confirman heteroátomos
900–600	Anillo β- lactámico	Torsión / deformación	Modo vibracional característico del anillo β-lactámico intacto

4.1.4 UV-VIS

Se realizó la caracterización de cefalexina caduca en una concentración de 15 mg/L en una solución de 0.1 M de Na₂SO₄ + 3 % wt de NaCl Figura 25. El espectro obtenido mostró dos regiones principales de absorción. La primera banda con un pico en 204 nm, mientras que la segunda se observó aproximadamente entre 259 y 262 nm.

La banda de mayor intensidad ubicada en la región cercana a 210 nm puede atribuirse a transiciones electrónicas asociadas a los grupos carboxilo, amida y al anillo β-lactámico característicos de la estructura molecular de la cefalexina. Por otra parte, la absorción observada alrededor de 260–262 nm está relacionada con transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$ de los sistemas aromáticos presentes en la molécula. Estas señales son consistentes con los espectros reportados en la literatura para cefalexina. (Panda et al., 2013)

La presencia de estas bandas indica que la estructura molecular principal de la cefalexina se encuentra conservada en la solución. También la ausencia de desplazamientos significativos en las longitudes de onda máximas de absorción con respecto a los valores reportados para cefalexina de grado farmacéutico sugiere que los grupos funcionales

responsables de la interacción con la superficie metálica permanecen disponibles.
(Panda et al., 2013)

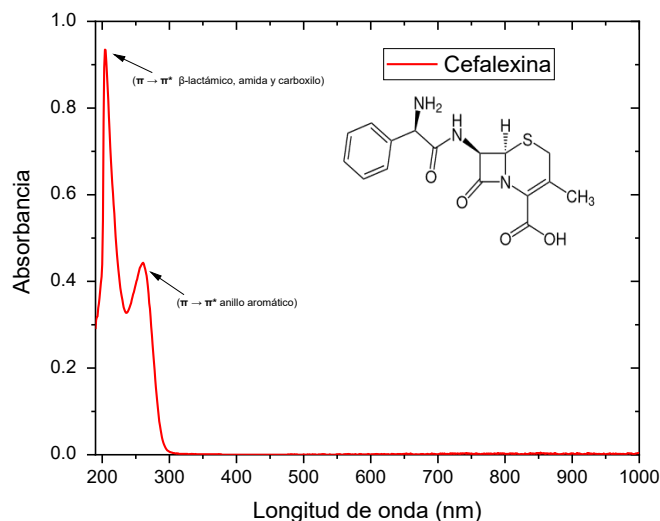


Figura 25. UV-Vis de 15 mg/L de cefalexina caduca en 0.1 M de Na_2SO_4 + 3 % wt de NaCl.

4.2 Pruebas de pérdida de masa

La Tabla 5 muestra los resultados de la prueba de pérdida de masa del acero AISI 1018 en ausencia y presencia del inhibidor a base de Cefalexina caduca después de 7 días de inmersión en la solución 0.1 M Na_2SO_4 +3%wt NaCl. La muestra sin inhibidor presentó la mayor pérdida de material, con una ΔW de 0.0065 g y una velocidad de corrosión de 1.64×10^{-1} mm/año. La concentración de 50 ppm no mostró una mejora significativa respecto al blanco, ya que sus valores de pérdida de masa y velocidad de corrosión son prácticamente iguales. Las concentraciones de 100 y 300 ppm sí evidenciaron una disminución clara en la corrosión. A 100 ppm, la ΔW bajó a 0.0041 g y la velocidad de corrosión se redujo a 1.04×10^{-1} mm/año, con una eficiencia inhibidora cercana al 36%. La mejor respuesta se obtuvo a 300 ppm, donde la pérdida de masa fue la menor 0.0031

g y la velocidad de corrosión disminuyó hasta 0.816×10^{-2} mm/año, alcanzando una eficiencia del 50%.

Los resultados indican que la cefalexina comienza a ser efectiva a partir de 100 ppm y su mejor desempeño se observa a 300 ppm durante los 7 días de inmersión. Lo que concuerda con Aziz, R. J. (2016), ellos reportaron que el incremento de la concentración del inhibidor favorece su adsorción sobre la superficie metálica y aumenta la eficiencia inhibitoria.

Tabla 5. Parámetros gravimétricos y eficiencia de inhibición del acero AISI 1018 utilizando un inhibidor a base de cefalexina caduca después de 7 días de inmersión en la solución 0.1 M Na₂SO₄ + 3%wt.

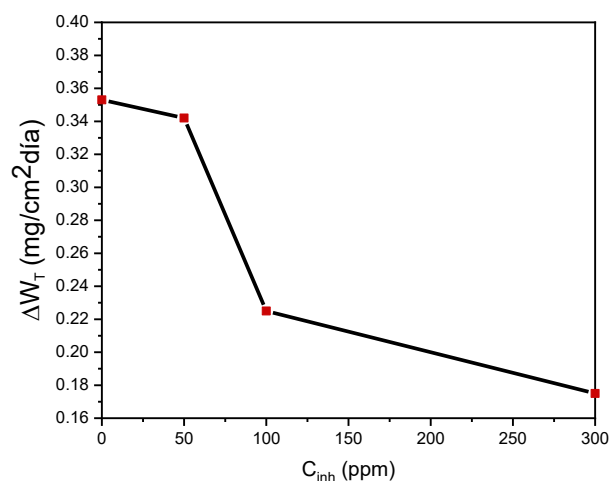
Condición	ΔW (g)	ΔW_T mg/cm²*día	Velocidad de corrosión (mm/año)	Eficiencia (%)	Grado de cobertura superficial (θ)
Blanco	0.0065	0.353	1.64×10^{-1}	-	-
50 ppm	0.0066	0.342	1.59×10^{-1}	3.12	0.0312
100 ppm	0.0041	0.225	1.04×10^{-1}	36.27	0.3627
300 ppm	0.0031	0.175	0.816×10^{-2}	50.21	0.5021

En la Figura 26 (a) se presenta la variación de la pérdida de peso del acero AISI 1018 en ausencia y presencia del inhibidor a las concentraciones 50, 100 y 300 ppm evaluado en la solución 0.1 M Na₂SO₄ + 3%wt NaCl durante 7 días. Para el caso del blanco se observa que tiene la mayor pérdida de masa. En el caso de 50 ppm disminuye ligeramente la pérdida de peso, mientras que para 100 y 300 ppm disminuye notablemente. Esto indica

que al incrementar la concentración de inhibidor disminuye su velocidad de corrosión debido a la formación de la película protectora sobre la superficie del acero.

La Figura 26 (b) se presenta la eficiencia en función de la concentración del inhibidor. Se observa un incremento progresivo de la eficiencia al aumentar la concentración, alcanzando el valor máximo a 300 ppm. Este comportamiento concuerda con la disminución de la pérdida de peso observada en la Figura 26 (a), ambas gráficas muestran que la cefalexina no presenta una protección relevante a bajas concentraciones, pero mejora su desempeño conforme aumenta la concentración, siendo 300 ppm la condición evaluada más efectiva.

(a)



(b)

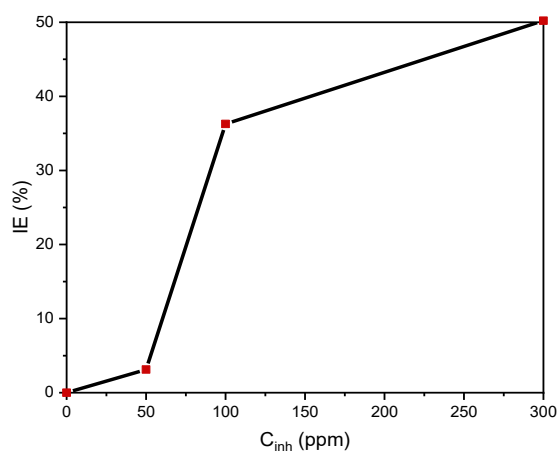


Figura 26. Variación de (a) peso perdido a través del tiempo y (b) eficiencia del acero AISI 1018 en ausencia y presencia del inhibidor a las concentraciones 50, 100 y 300 ppm evaluado en la solución 0.1M Na₂SO₄ + 3%wt NaCl.

La Figura 27 muestra visualmente como se ve el acero al carbono AISI 1018 después de estar inmerso por 7 días en la solución de la prueba de pérdida de masa.

- La muestra (a), correspondiente al blanco presenta una capa extensa de corrosión con tonalidades café-rojizas típicas de óxidos de hierro. La superficie se observa completamente cubierta con manchas profundas y homogéneas que indican un ataque severo desde los primeros días de exposición, sin presencia de zonas protegidas. Estas afirmaciones deberán corroborarse mediante SEM.
- La muestra (b), a 50 ppm muestra un deterioro similar al blanco. Aunque la distribución de la corrosión es ligeramente menos uniforme, la superficie continúa cubierta por productos de corrosión oscuros. Esto señala que esta concentración es insuficiente para frenar la reacción corrosiva y que la protección ofrecida es prácticamente nula. Estas afirmaciones deberán corroborarse mediante SEM.
- La muestra (c), 100 ppm presenta corrosión visible, pero en menor extensión. La superficie muestra áreas parcialmente oxidadas e incluso algunas zonas menos afectadas, lo que sugiere que la presencia del inhibidor comienza a generar un efecto protector. Aun así, la capa de corrosión sigue siendo evidente, lo que indica una protección moderada. Estas afirmaciones deberán corroborarse mediante SEM.
- La muestra (d), correspondiente a 300 ppm es la que presenta el mejor desempeño. La superficie conserva parte de su color metálico original y solo muestra manchas leves y aisladas de corrosión. No se observan capas gruesas ni corrosión generalizada, lo que confirma que a esta concentración el inhibidor

forma una película más efectiva y estable durante los 7 días de inmersión. Estas afirmaciones deberán corroborarse mediante SEM.

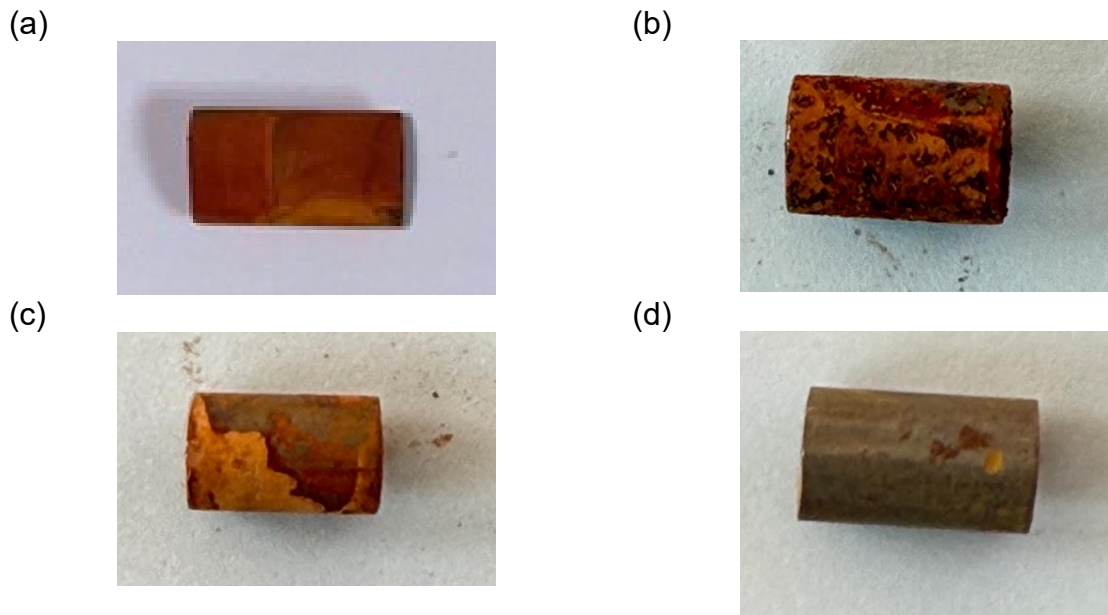


Figura 27. Muestras de pérdida de masa después de los 7 días de inmersión. (a) blanco, (b) 50 ppm, (c) 100 ppm y (d) 300 ppm

4.3 Pruebas electroquímicas

4.3.1 Potencial de circuito abierto (OCP).

En la Figura 28 se muestra la evolución del OCP del acero AISI 1018 durante 60 minutos en presencia y ausencia del inhibidor cefalexina caduca, en concentraciones de 50, 100 y 300 ppm. En el caso del blanco muestra un potencial más negativo y estable cercano a -675 mV, el cual tiende a volverse más activo conforme pasa el tiempo hasta los 10 minutos para posteriormente tener un comportamiento cuasi estacionario para después volver a ser más activo el potencial.

Para el caso de 50 ppm, se observa como el potencial tiende a volverse más noble que el blanco, no obstante, su potencial tiende a volverse activo durante los primeros 5 min para después tener un comportamiento similar al material base.

En el caso de 100 ppm se tiene que su potencial de nueva cuenta presenta valores más nobles, pero al cabo de 20 min presenta un comportamiento similar al blanco y 50 ppm.

Para 300 ppm su potencial se torna a un valor más noble al inicio de la prueba para después volverse activo durante los primeros 10 min de la prueba, posteriormente su potencial incrementa hacia valores más nobles, que muestra una tendencia ascendente y estable con el tiempo.

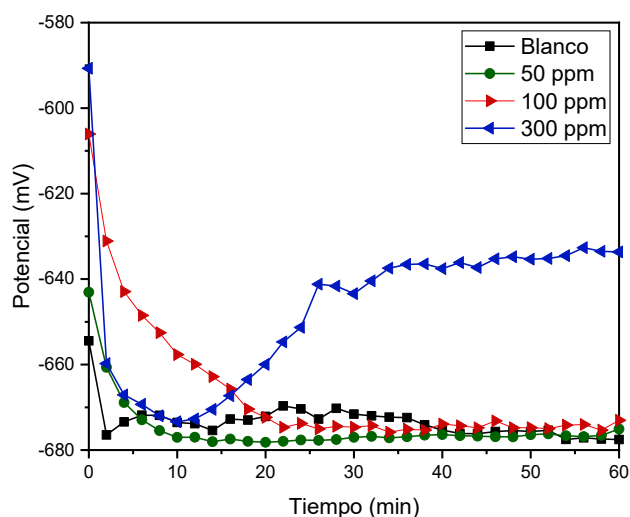


Figura 28. Potencial de circuito abierto en función del tiempo de blanco y material con el uso de inhibidor a diferentes concentraciones 50, 100 y 300 ppm evaluado en la solución 0.1 M Na₂SO₄ + 3%wt NaCl.

4.3.2 Curvas de polarización potenciodinámicas (CP).

En la Figura 29 se presentan las curvas de polarización del acero AISI 1018 en ausencia y presencia de inhibidor a 50, 100 y 300 ppm. En el caso del blanco muestra un potencial de -762.05 mV con un comportamiento activo (disolución).

Para el material con el uso de inhibidor a 50 ppm presenta un desplazamiento en su potencial de corrosión hacia valores más activos con respecto al blanco, además de dos zonas pseudopasivas donde la más grande comienza en -577 mV hasta -530 mV donde inicia la zona de picado seguido de una disolución continua. Para el caso de 100 ppm se tiene un comportamiento bastante similar que a 50 ppm con dos zonas pseudopasivas donde la más grande comienza en -572 mV hasta -512 mV. A 300 ppm se tiene que su potencial de corrosión se vuelve más activo con respecto al base, pero más noble en comparación a las otras condiciones, pero con una tendencia similar a las otras condiciones con dos zonas pseudopasivas donde la más grande comienza en -587 mV hasta -497 mV. Se ha demostrado que otros inhibidores de la corrosión tiene comportamientos similares (Lebrini, M et al., 2010; Mohamedien, H. A., et al., 2022; Al-Amiery, A. et al., 2023), cuando se agrega el inhibidor puede haber desplazamiento en el potencial de corrosión hacia valores más activos o nobles. En este caso de estudio dado el cambio en la rama anódica y rama catódica observada sería un inhibidor de tipo mixto con predominancia catódica.

La Tabla 6 muestra los parámetros electroquímicos obtenidos del análisis de Tafel para el acero AISI 1018 en ausencia y presencia de cefalexina a 50, 100 y 300 ppm. Se observa que, al incorporar el inhibidor, el potencial de corrosión (E_{corr}) se desplaza ligeramente hacia valores más negativos respecto al blanco. Asimismo, la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) disminuye de manera progresiva con la concentración del inhibidor, destacando el efecto más notorio a 300 ppm.

El incremento del grado de cobertura superficial (θ) y de la eficiencia de inhibición confirma que la cefalexina logra adsorberse sobre el acero y reducir la cinética de

corrosión. En particular, la eficiencia alcanza su mayor valor en 300 ppm, indicando que esta concentración favorece la formación de una película protectora más estable y uniforme en la superficie metálica.

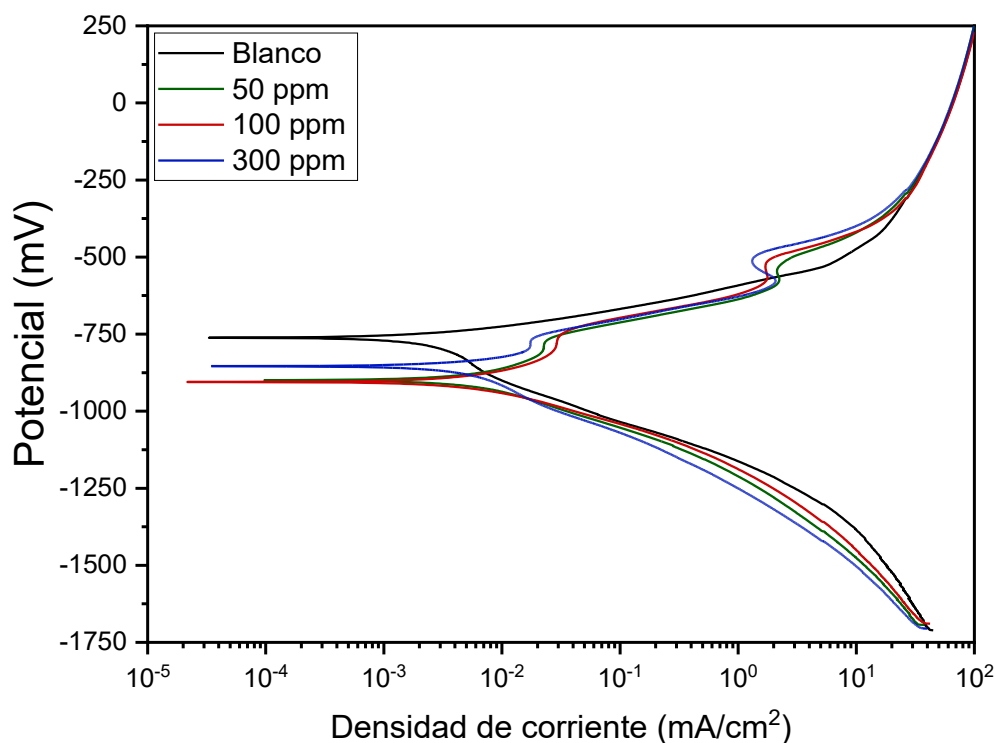


Figura 29. Curvas de polarización potenciodinámicas del acero AISI 1018 en ausencia y presencia de inhibidor a 50, 100 y 300 ppm evaluados en la solución 0.1 M Na_2SO_4 +3%wt NaCl.

Tabla 6. Parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización del acero AISI 1018 en ausencia y presencia de cefalexina a 50, 100 y 300 ppm.

Muestra	E_{corr} (mV)	I_{corr} (mA/cm ²)	$I_{\text{corr pas}}$ (mA/cm ²)	E_{pic} (mV)	β_a (mV/dec)	β_c (mV/dec)	Efi %	θ
Blanco	-762	3.84E-03	-	-	120	219	-	-
50 ppm	-900	3.80E-03	2.22E-02 2.24	-759 -530	-	100	1.04	0.01

100 ppm	-903	3.49E-03	2.87E-02 1.75	-739 -512	-	92	9.11	0.09
300 ppm	-852	1.92E-03	1.62E-02 2	-754 -497	-	126	50	0.50

4.3.3 Resistencia a la polarización lineal (LPR).

La Tabla 7 se presenta los valores de resistencia a la polarización lineal (R_p) del acero AISI 1018 en ausencia y presencia de cefalexina a concentraciones de 50, 100 y 300 ppm durante 21 días de exposición. Al adicionar el inhibidor incrementó la resistencia a la polarización respecto al blanco, indicando una disminución de la velocidad de corrosión y una mayor protección de la superficie metálica.

Al inicio de la exposición (0 días), todas las concentraciones mostraron valores de R_p superiores al blanco ($1184 \Omega \cdot \text{cm}^2$). La muestra con 50 ppm presentó el valor inicial transitorio más alto ($1557 \Omega \cdot \text{cm}^2$), seguida por 300 ppm ($1373 \Omega \cdot \text{cm}^2$) y 100 ppm ($1325 \Omega \cdot \text{cm}^2$). Las eficiencias de inhibición calculadas fueron de 23.96 %, 13.77 % y 10.64 % para 50, 300 y 100 ppm, mostradas en la Tabla 8. Estos resultados indican que la adsorción inicial de la cefalexina sobre la superficie del acero comienza desde los primeros momentos de exposición, aunque la protección es menor.

Después de 7 días, el blanco disminuyó hasta $565 \Omega \cdot \text{cm}^2$, mientras que la muestra con 300 ppm alcanzó el valor más alto de toda la serie experimental ($2154 \Omega \cdot \text{cm}^2$), correspondiente a una eficiencia de inhibición de 73.77 %. La muestra con 100 ppm presentó un R_p de $1106 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y una eficiencia de 48.92 %. La concentración de 50 ppm registró un valor de R_p de $416 \Omega \cdot \text{cm}^2$, menor al blanco, produciendo una eficiencia

negativa (-35.82 %). Este comportamiento sugiere que dicha concentración no fue suficiente para formar una película protectora estable durante esta etapa.

A los 14 días se observó una disminución continua de R_p para el blanco hasta $224 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Sin embargo, las muestras con inhibidor mantuvieron valores superiores. La concentración de 300 ppm presentó un R_p de $1444 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y una eficiencia de inhibición de 84.49 %, mientras que 100 ppm alcanzó $1044 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y una eficiencia de 78.54 %. Por su parte, 50 ppm registró $325 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y una eficiencia de 31.08 %. Estos resultados demuestran que las concentraciones de 100 y 300 ppm favorecen la formación de una capa adsorbida más estable y protectora sobre la superficie del acero.

Tras 21 días de inmersión, se observó una disminución general de R_p en todas las condiciones experimentales, atribuida al deterioro gradual de la película protectora por la exposición prolongada al medio corrosivo. Sin embargo, las muestras con inhibidor mostraron valores superiores al blanco ($184 \Omega \cdot \text{cm}^2$). La concentración de 300 ppm conservó el mejor desempeño con un R_p de $452 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y una eficiencia de inhibición de 59.29 %, seguida por 100 ppm con $326 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y una eficiencia de 43.56 %, mientras que 50 ppm alcanzó $303 \Omega \cdot \text{cm}^2$ con una eficiencia de 39.27 %.

Tabla 7. Resistencia a la polarización lineal del acero AISI 1018 en ausencia y presencia de inhibidor a 50, 100 y 300 ppm a través del tiempo.

Muestra	0 días ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	7 días ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	14 días ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	21 días ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Blanco	1184	565	224	184
50 ppm	1557	416	325	303
100 ppm	1325	1106	1044	326

300 ppm	1373	2154	1444	452
----------------	------	------	------	-----

Tabla 8. Eficiencias de la resistencia a la polarización lineal del acero AISI 1018 en ausencia y presencia de inhibidor a 50, 100 y 300 ppm a través del tiempo.

Muestra	0 días (%)	7 días (%)	14 días (%)	21 días (%)
50 ppm	23.96	-	31.08	39.27
100 ppm	10.64	48.92	78.54	43.56
300 ppm	13.77	73.77	84.49	59.29

4.3.4 Espectroscopia de impedancia Electroquímica (EIS).

La *Figura 30* muestra la variación del módulo de la impedancia a lo largo de 28 días de inmersión del acero AISI 1018 en ausencia y presencia del inhibidor de la corrosión a base del medicamento caduco cefalexina a diferentes concentraciones (50, 100 y 300 ppm) evaluados en la solución que simula corrosión atmosférica marina-industrial. En el caso del blanco presenta valores del módulo de la impedancia que disminuyen a lo largo del tiempo, esto es atribuido a la disolución continua del material. Para 50 ppm presenta una tendencia similar al blanco, esto es debido a que el inhibidor no logra formar una película protectora y el material está activo. Para 100 ppm se logra observar un cambio aparente en su comportamiento, debido a la formación de una capa protectora la cual sugiere el bloqueo de sitios activos, reduciendo su velocidad de corrosión. Por último, para 300 ppm la magnitud del módulo de la impedancia alcanza sus valores máximos durante los primeros 14 días, indicando la formación de una película protectora con buena estabilidad ya que mantiene la superficie protegida durante los 28 días.

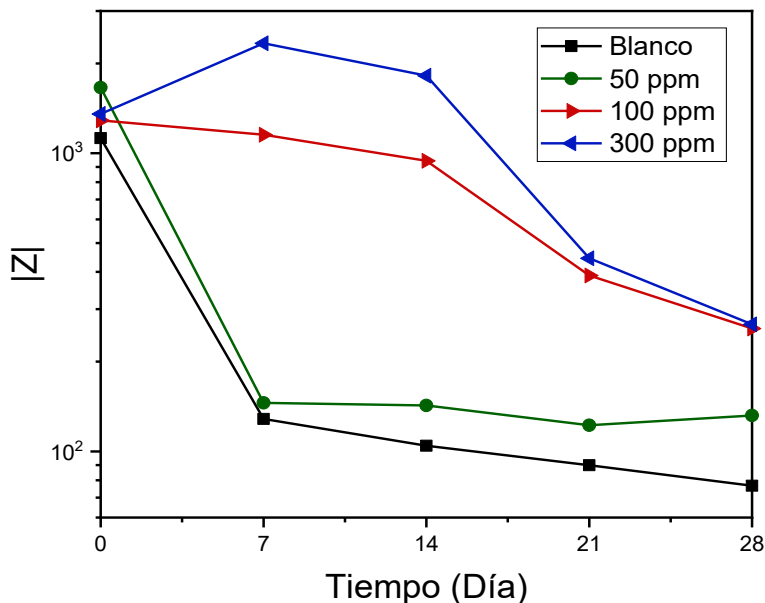


Figura 30. Magnitud de impedancia en función del tiempo del acero AISI 1018 en ausencia y presencia del inhibidor a 50 ppm, 100 ppm y 300 ppm después de 28 días de inmersión en la solución 0.1 M Na₂SO₄+3%wt NaCl.

Desde el primer momento de inmersión, después de dejar estabilizar a la probeta usando OCP, la Figura 31 (a) presenta el diagrama de Nyquist del acero AISI 1018 en ausencia y presencia del inhibidor a diferentes concentraciones evaluadas en una solución que simula corrosión atmosférica marina-industrial. Para el caso del blanco a las 0 h de inmersión, se puede observar un semicírculo capacitivo con la presencia de un rizo inductivo en la región de bajas frecuencias, este comportamiento es asociado con la relajación de especies adsorbidas formadas durante el proceso de corrosión, incluyendo intermediarios tales como FeOH_{ads} y FeCl_{ads}, así como a fenómenos de adsorción y desorción de iones cloruro sobre la superficie metálica. Este comportamiento ha sido

ampliamente reportado para aceros al carbono en medios que contienen cloruros y suelen relacionarse con el mecanismo de disolución activa (Zhao, S. et al., 2020; Hernández, H. et al., 2020; Jero, D. et al., 2025)

Para 50 ppm se observa que al agregar el inhibidor de la corrosión hay un incremento considerable en su resistencia a la transferencia de carga alcanzando el valor máximo, debido a la adsorción del inhibidor sobre la superficie metálica formando una película protectora que reduce los sitios activos. En el caso de 100 ppm también se obtiene un incremento en el diámetro del semicírculo capacitivo con respecto al blanco, pero de menor diámetro en consideración con 50 ppm. Para 300 ppm se visualiza un incremento en el diámetro del semicírculo capacitivo obteniendo un valor mayor que el blanco y 100 ppm. El diagrama de Nyquist indica que la respuesta electroquímica está dominada por procesos de transferencia de carga.

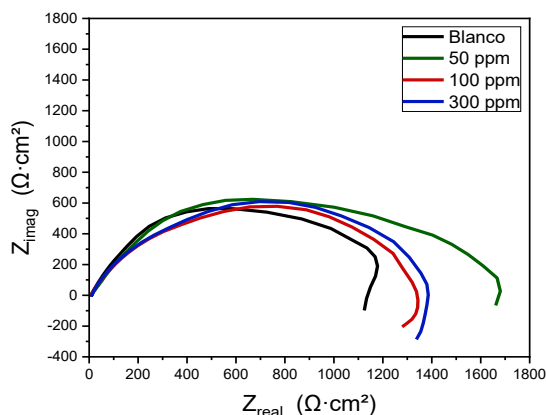
En el diagrama de Bode Figura 31 (b), el análisis se basa en regiones de frecuencia: baja frecuencia ($<1-10$ Hz), corresponde a los procesos de superficie; frecuencia intermedia ($10-1000$ Hz), asociado a los procesos de transferencia de carga y alta frecuencia (>1000 Hz), relacionado con la resistencia del electrolito. El módulo de la impedancia del blanco y material con el uso de inhibidor muestran una meseta en la región de alta frecuencia, el cual sugiere la ausencia de una película en la superficie. En la región de frecuencia intermedia exhibe dos relaciones lineales $\log f - \log |Z|$, indicando dos constantes de tiempo correspondientes a dos semicírculos capacitivos traslapados observados en Nyquist.

Para el diagrama de Bode en su formato ángulo de fase, se observa en la región de alta frecuencia que el ángulo de fase tiende a cero en frecuencias mayores a 1000 Hz. En la

región de baja frecuencia se observa la primera constante de tiempo para el blanco de 66.79° , mientras que para las condiciones con el uso del inhibidor de la corrosión se tiene que hay una disminución para 50 ppm, pero incremento para 100 y 300 ppm. Este comportamiento de incrementó y desplazamiento del ángulo de fase de izquierda a derecha en función de la frecuencia indica la formación de productos de corrosión protectores los cuales reducen la velocidad de disolución.

Lebrini et al. (2010) señala que, durante los primeros momentos de inmersión, la respuesta electroquímica del acero está dominada por la doble capa natural y no por el inhibidor. Sugiriendo que las moléculas orgánicas requieren un periodo de adsorción antes de modificar la impedancia del sistema, de modo que los valores de $|Z|$ y del ángulo de fase permanecen prácticamente iguales al blanco hasta que la película protectora comienza a formarse.

(a)



(b)

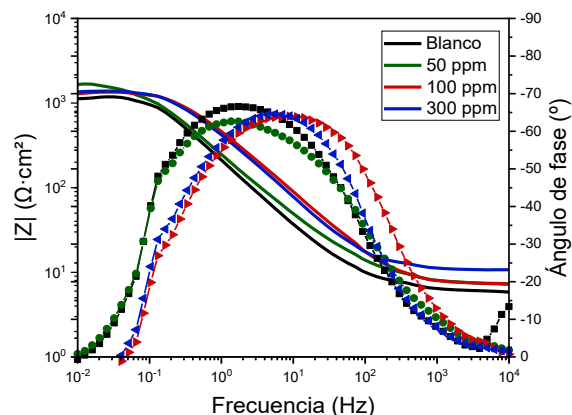


Figura 31. Diagrama de Nyquist (a) y Bode (b) en el día 0 en su formato módulo de la impedancia y ángulo de fase del acero AISI 1018 a través del tiempo evaluado en la solución 0.1 M de Na_2SO_4 + 3% wt NaCl.

La Figura 32 (a) muestra el diagrama de Nyquist del acero AISI 1018 después de estar 7 días en inmersión. Para el caso del blanco se puede observar la disminución del diámetro del semicírculo capacitivo con respecto a 0 días con la presencia de un rizo inductivo en la región de bajas frecuencias, este comportamiento es asociado con la relajación de especies adsorbidas formadas durante el proceso de corrosión, incluyendo intermediarios tales como FeOH_{ads} y FeCl_{ads} , así como a fenómenos de adsorción y desorción de iones cloruro sobre la superficie metálica. Este comportamiento ha sido ampliamente reportado para aceros al carbono en medios que contienen cloruros y suelen relacionarse con el mecanismo de disolución activa (este comportamiento se presenta para el blanco, 100 y 300 ppm). (Zhao, S. et al., 2020; Hernández, H. et al., 2020; Jero, D. et al., 2025)

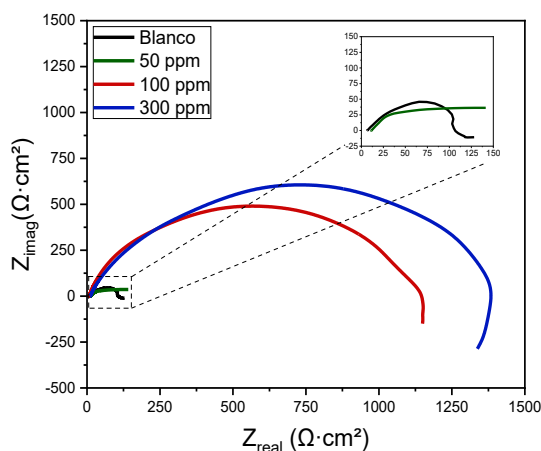
Para 50 ppm se tiene un comportamiento similar al blanco, una reducción en el diámetro del semicírculo capacitivo, indicando una disminución en su resistencia a la transferencia de carga debido a un deterioro parcial de la capa protectora formada durante las etapas iniciales de la inmersión, además, cabe destacar que ya no hay presencia de un rizo inductivo, esto sugiere el agotamiento o la estabilización de los intermediarios adsorbidos que intervienen en el proceso de corrosión. En el caso de 100 y 300 ppm también se visualiza un incremento en el diámetro de los semicírculos capacitivos debido a la formación de productos o una capa protectora. El diagrama de Nyquist indica que la respuesta electroquímica está dominada por procesos de transferencia de carga.

A medida que avanza el tiempo, en los diagramas de bode Figura 32 (b) el módulo de la impedancia del blanco y material con el uso de inhibidor muestran una meseta en la

región de alta frecuencia, el cual sugiere la ausencia de una película en la superficie. En la región de frecuencia intermedia exhibe dos relaciones lineales $\log f - \log |Z|$, indicando dos constantes de tiempo correspondientes a dos semicírculos capacitivos traslapados observados en Nyquist.

Para el diagrama de Bode en su formato ángulo de fase, se observa en la región de frecuencia intermedia que el ángulo de fase tiende a cero en frecuencias mayores a 100 Hz. En la región de baja frecuencia se observa la primera constante de tiempo del blanco de 43° , lo que indica una reducción en su ángulo de fase con respecto a la inmersión. Para 50 ppm también presenta una reducción del ángulo de fase con un desplazamiento hacia la izquierda, indicando la disolución de los productos de corrosión formados. Mientras que para 100 y 300 ppm se presenta un incremento del ángulo de fase atribuido a la formación de productos de corrosión protectores o un incremento en el espesor de estos.

(a)



(b)

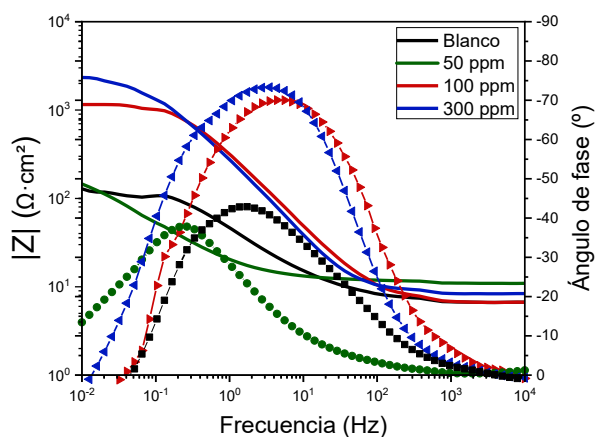


Figura 32. Diagrama de Nyquist (a) y Bode (b) en el día 7 en su formato módulo de la impedancia y ángulo de fase del acero AISI 1018 a través del tiempo evaluado en la solución 0.1 M de Na_2SO_4 + 3% wt NaCl.

En el día 14 de inmersión Figura 33 (a), muestra el diagrama de Nyquist del acero AISI 1018 a diferentes concentraciones. Para el caso del blanco se puede observar la disminución del diámetro del semicírculo capacitivo con respecto a 0 y 7 días. A 50 ppm se visualiza de nueva cuenta la disminución del diámetro de semicírculo capacitivo, siguiendo la tendencia del día 7.

Para 100 ppm se tiene una disminución en el diámetro del semicírculo capacitivo debido a un deterioro parcial de la capa protectora formada durante las etapas iniciales de la inmersión. Mientras que para 300 ppm se observa un incremento en el diámetro del semicírculo capacitivo indicando un incremento en la resistencia a la transferencia de carga esto debido a un incremento en el espesor de los productos de corrosión. Por lo tanto, el proceso está dominado por transferencia de carga y transporte de masa.

En los diagramas de bode Figura 33 (b) el módulo de la impedancia del blanco y material con el uso de inhibidor muestran una meseta en la región de alta frecuencia, el cual sugiere la ausencia de una película en la superficie. En la región de frecuencia intermedia exhibe dos relaciones lineales $\log f - \log |Z|$, indicando dos constantes de tiempo correspondientes a dos semicírculos capacitivos traslapados observados en Nyquist.

Para el diagrama de Bode en su formato ángulo de fase, se observa en la región de frecuencia intermedia que el ángulo de fase tiende a cero en frecuencias mayores a 100 Hz. En el caso de las constantes de tiempo presentes en la región de baja frecuencia del blanco, 50 y 300 ppm muestran un decremento y desplazamiento del ángulo de fase de derecha a izquierda, este comportamiento está asociado a un proceso de disolución de los productos de corrosión. Mientras que para el caso de 100 ppm no hay cambio

aparente en su ángulo de fase, esto indica que no hay un deterioro significativo en las propiedades de los óxidos u oxihidroxidos formados.

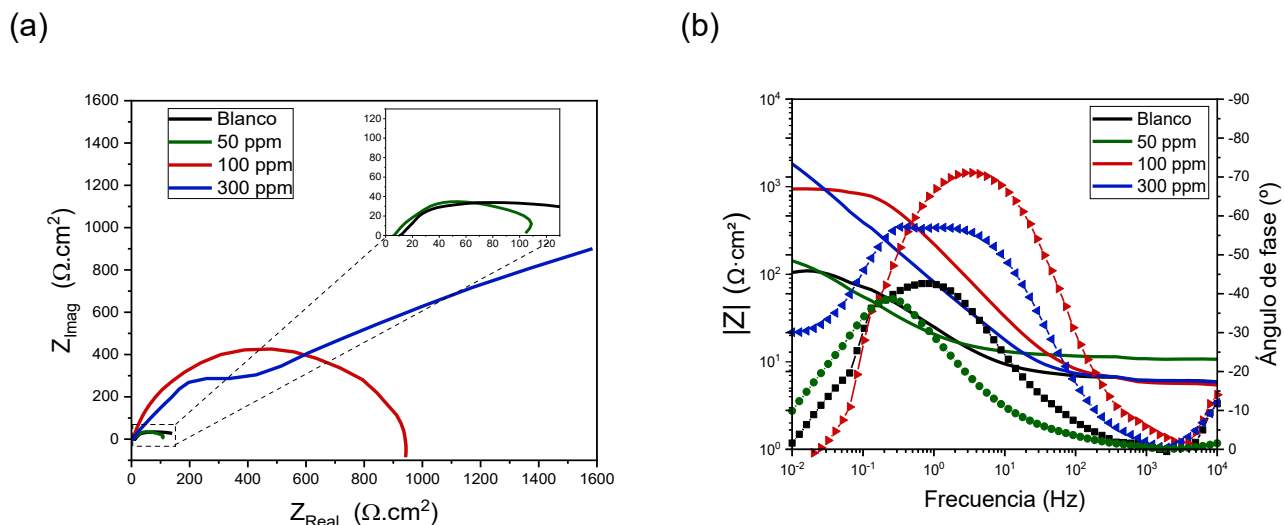


Figura 33. Diagrama de Nyquist (a) y Bode (b) en el día 14 en su formato módulo de la impedancia y ángulo de fase del acero AISI 1018 a través del tiempo evaluado en la solución 0.1 M de Na_2SO_4 + 3% wt NaCl .

En el día 21 de inmersión, la Figura 34 (a) muestra el diagrama de Nyquist del acero AISI 1018 en diferentes concentraciones. Para el caso del blanco se puede observar la disminución del diámetro del semicírculo capacitivo con respecto a 0, 7 y 14 días. Para todos los casos es posible observar una disminución en el diámetro de los semicírculos capacitivos debido a un deterioro parcial de la capa protectora formada durante las etapas iniciales de la inmersión. En el caso del blanco sigue el mismo comportamiento del día 14.

El diagrama de Nyquist indica que la respuesta electroquímica está dominada por procesos de transferencia de carga. Mientras que los diagramas de bode Figura 34 (b) el módulo de la impedancia del blanco y material con el uso de inhibidor muestran una

meseta en la región de alta frecuencia, el cual sugiere la ausencia de una película en la superficie. En la región de frecuencia intermedia exhibe dos relaciones lineales $\log f - \log |Z|$, indicando dos constantes de tiempo correspondientes a dos semicírculos capacitivos traslapados observados en Nyquist.

Para el diagrama de Bode en su formato ángulo de fase, se observa en la región de frecuencia intermedia que el ángulo de fase tiende a cero en frecuencias mayores a 100 Hz. En el caso de las constantes de tiempo presentes en la región de baja frecuencia de 50, 100 y 300 ppm muestran un decremento y desplazamiento del ángulo de fase de derecha a izquierda, este comportamiento es asociado a un proceso de disolución de los productos de corrosión. Sin embargo, para el caso del blanco se visualiza un incremento del ángulo de fase, así como un desplazamiento hacia la derecha, atribuido a la formación de productos de corrosión protectores y/o un incremento en el espesor de los productos de corrosión.

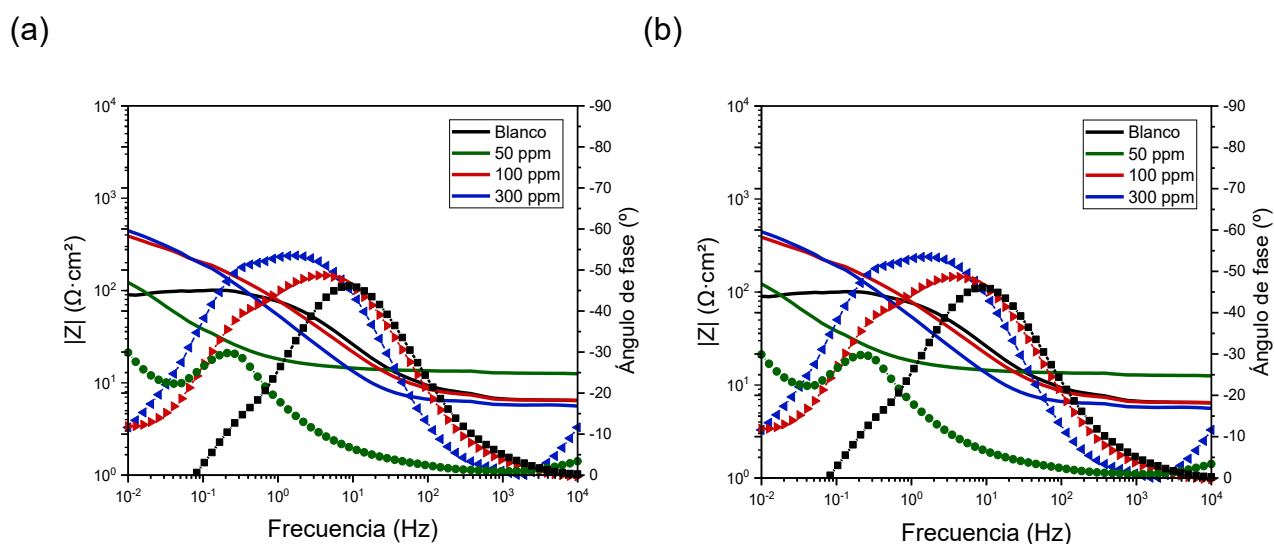


Figura 34. Diagrama de Nyquist (a) y Bode (b) en el día 21 en su formato módulo de la impedancia y ángulo de fase del acero AISI 1018 a través del tiempo evaluado en la solución 0.1 M de Na_2SO_4 + 3% wt NaCl.

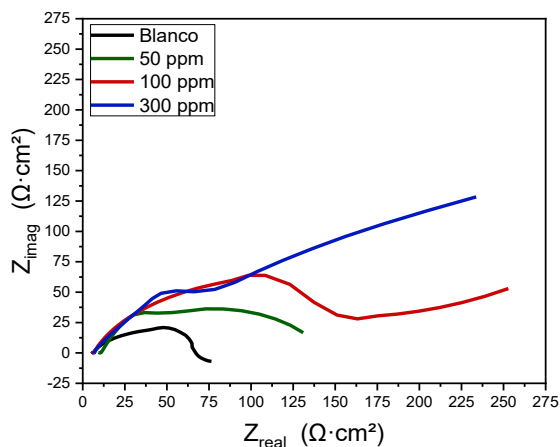
En el día 28 de inmersión Figura 35 (a), muestra el diagrama de Nyquist del acero AISI 1018 en ausencia y presencia del inhibido. Para todos los casos es posible observar una disminución en el diámetro de los semicírculos capacitivos debido a un deterioro parcial de la capa protectora formada durante las etapas iniciales de la inmersión. En el caso del blanco cabe resaltar que se mantiene el rizo inductivo en la región de bajas frecuencias.

Además, para 300 ppm el semicírculo asociado a la transferencia de carga disminuye debido a la disolución de la capa protectora. Por lo tanto, el proceso está dominado por transferencia de carga y transporte de masa.

Para los diagramas de Bode del día 28 Figura 35 (b), el módulo de la impedancia del blanco y material con el uso de inhibidor muestran una meseta en la región de alta frecuencia, el cual sugiere la ausencia de una película en la superficie. En la región de frecuencia intermedia exhibe dos relaciones lineales $\log f - \log |Z|$, indicando dos constantes de tiempo correspondientes a dos semicírculos capacitivos traslapados observados en Nyquist.

Para el diagrama de Bode en su formato ángulo de fase, se observa en la región de alta frecuencia que el ángulo de fase tiende a cero en frecuencias mayores a 1000 Hz. En el caso de las constantes de tiempo presentes en la región de baja frecuencia de todas las condiciones, muestran un decremento y desplazamiento del ángulo de fase de derecha a izquierda, este comportamiento es asociado a un proceso de disolución de los productos de corrosión.

(a)



(b)

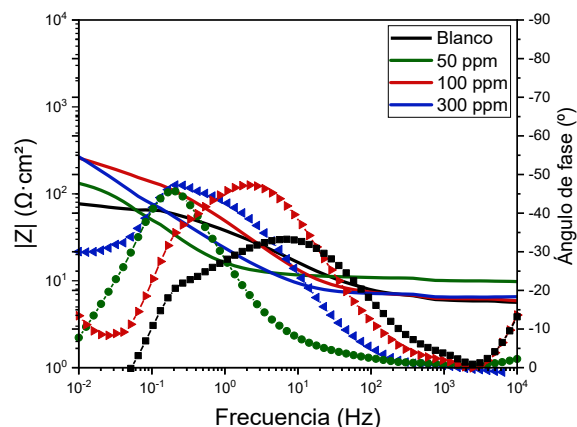
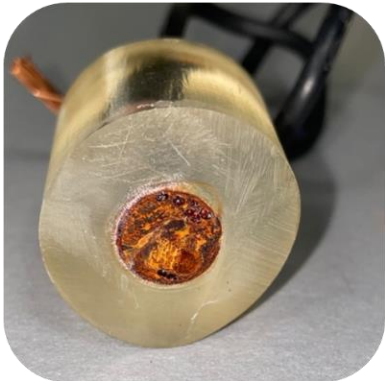
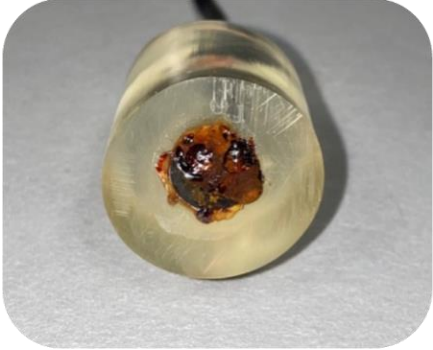
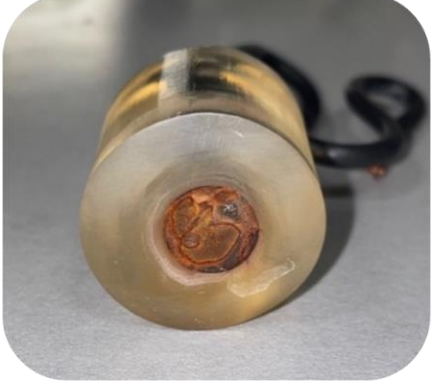
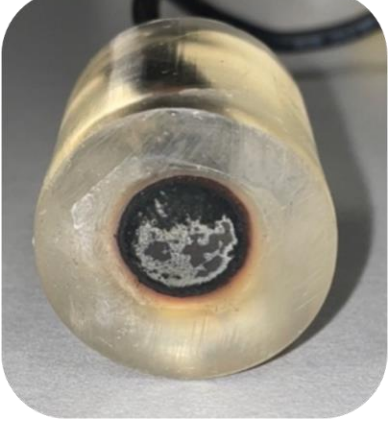


Figura 35. Diagrama de Nyquist (a) y Bode (b) en el día 28 en su formato módulo de la impedancia y ángulo de fase del acero AISI 1018 a través del tiempo evaluado en la solución 0.1 M de Na_2SO_4 + 3% wt NaCl.

La Tabla 9 muestra la superficie metálica del AISI 1018 después de estar inmersa por 28 días, demostrando el efecto que tiene la concentración del inhibidor sobre la reacción de corrosión.

Tabla 9. Probetas de la prueba Impedancia electroquímica después de 28 días de Inmersión.

C_{inh} (ppm)	Figura	Descripción
0		Degradación visible y severa. La superficie metálica aparece cubierta por una capa irregular de corrosión en tonos café y rojizos, indicando pérdida de material y formación de óxido de hierro sobre el área expuesta.

50		Daño notable donde la zona expuesta del metal presenta una capa gruesa y oscura de corrosión, con desprendimiento visible y acumulación de óxidos. La superficie luce irregular y fuertemente degradada.
100		El área expuesta presenta zonas oxidadas y manchas irregulares, aunque la capa de corrosión es menos gruesa y extendida. Esto coincide con un nivel de protección intermedio, mejor que 50 ppm, pero todavía insuficiente para mantener una película estable durante 28 días.
300		Nivel de corrosión significativamente más bajo. Aunque se observan manchas asociadas a productos de corrosión, la capa formada es delgada y no cubre toda el área expuesta. La presencia de zonas metálicas visibles indica que película protectora fue más estable, reduciendo el ataque directo del electrolito sobre el acero.

4.3.4.1 Circuitos equivalentes

Los circuitos eléctricos equivalentes utilizados para ajustar los datos de espectroscopía electroquímica de impedancia (EIS) de la muestra en blanco y el material en presencia del inhibidor a diferentes concentraciones y tiempos de inmersión se muestran en la Figura 36. Los circuitos equivalentes seleccionados se basaron en modelos comúnmente reportados en la literatura sobre corrosión para acero al carbono expuesto a ambientes que contienen cloruro (Hermoso-Díaz, I.A et al., 2021; Omari et al., 2025)

Los parámetros electroquímicos obtenidos de la EIS se resumen en la Tabla 10, Tabla 11, Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14, obtenidos mediante el ajuste de los espectros utilizando circuitos eléctricos equivalentes en el software ZView. Los valores obtenidos presentaron errores de ajuste inferiores al 5 %, indicando una adecuada concordancia entre los datos experimentales y los simulados.

Los elementos del circuito proporcionan información sobre el proceso de corrosión y el comportamiento protector de la película inhibidora. La resistencia a la transferencia de carga (ECA) está asociada con la reacción de corrosión que ocurre en la interfaz metal/electrolito, donde valores más altos indican una mejor resistencia a la corrosión. En los sistemas inhibidos, la resistencia de la película (R_f) está relacionada con la capa protectora formada por la adsorción de moléculas inhibidoras en la superficie del acero. Un aumento en R_f y R_{ct} generalmente se asocia con una mayor protección superficial y una menor actividad corrosiva. Los elementos de fase constante, CPE_{dl} y CPE_f , corresponden respectivamente a la respuesta eléctrica de la doble capa y la película inhibidora. Las variaciones en estos parámetros proporcionan información sobre la cobertura superficial, los fenómenos de adsorción y la estabilidad de la película. Valores

de capacitancia más bajos suelen asociarse a una mayor adsorción de inhibidores y una reducción en el número de sitios activos de corrosión, mientras que valores más altos sugieren una mayor exposición de la superficie metálica al medio corrosivo. Los parámetros n y n_f están relacionados con el grado de desviación del comportamiento capacitivo ideal y proporcionan información sobre la heterogeneidad superficial. Los valores cercanos a la unidad indican una superficie más homogénea y compacta, mientras que valores más bajos suelen asociarse con un aumento de rugosidad, porosidad y una distribución de corriente no uniforme. Para tener en cuenta las inhomogeneidades superficiales y los semicírculos deprimidos observados en los diagramas de Nyquist, se empleó un elemento de fase constante (CPE) en lugar de un condensador ideal. La impedancia de la CPE se describe mediante la ecuación (9):

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y(j\omega)^n} \quad (16)$$

Donde Y es la admitancia del sistema; Y_{0dl} de la doble capa y Y_{0f} de la película, un factor que combina propiedades relacionadas con la superficie de las especies electroactivas y es independiente de la frecuencia, j es la unidad imaginaria ($\sqrt{-1}$); ω es la frecuencia angular ($2\pi f$), f es la frecuencia; y n está relacionado con la pendiente de $\log|Z|$ vs $\log|f|$. Si n es igual a 1, el CPE es un condensador ideal, donde Y es igual a la capacitancia. Sin embargo, si es $0.5 < n < 1$, entonces la CPE describe una distribución de tiempos de relajación dieléctrica en el rango de frecuencias (Hermoso-Díaz, I.A et al., 2021; Omari, M. et al., 2025; Noriega, O.A.G et al., 2025)

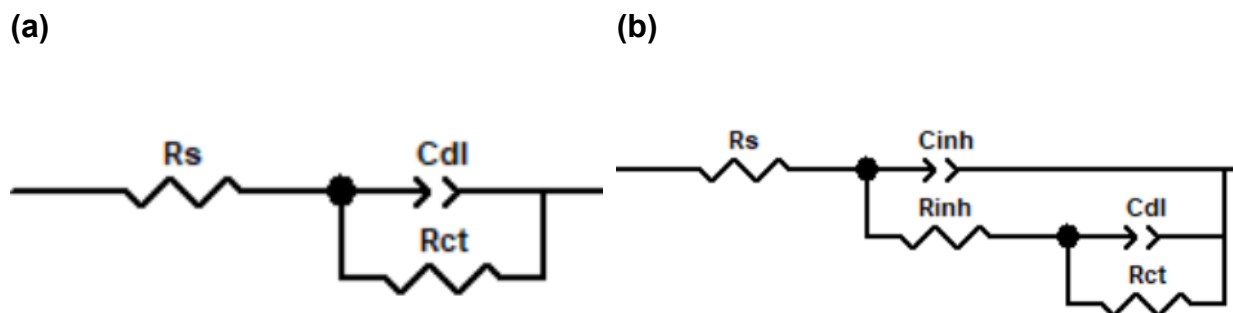


Figura 36. Circuitos eléctricos equivalentes usados para ajustar los espectros EIS de la muestra en blanco (a) y los sistemas inhibidos (b) a diferentes concentraciones inhibidoras durante la inmersión.

Los valores de resistencia de la solución (R_s) permanecieron relativamente constantes durante todo el periodo de inmersión para todas las condiciones evaluadas, oscilando entre 5.68 y 13.1 $\Omega \cdot \text{cm}^2$. Este comportamiento indica que la incorporación de cefalexina no modificó significativamente la conductividad del medio corrosivo, por lo que las variaciones observadas en la respuesta electroquímica pueden atribuirse principalmente a los procesos interfaciales que ocurren sobre la superficie metálica.

En el tiempo inicial (0 días) Tabla 10, la muestra sin inhibidor presentó un valor de R_{ct} de 1140 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, correspondiente al proceso natural de formación de productos de corrosión sobre la superficie metálica. La adición de cefalexina produjo un incremento de R_{ct} , particularmente a 50 ppm, donde alcanzó 1729 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ y una eficiencia de inhibición de 34.07 %, indicando una adsorción inicial rápida de moléculas inhibidoras sobre la superficie metálica. Sin embargo, las concentraciones de 100 y 300 ppm presentaron eficiencias menores durante esta etapa inicial, sugiriendo que el proceso de adsorción aún no había alcanzado el equilibrio y que la película protectora se encontraba en formación. El valor de n_f cercano a 0.80 indica una película relativamente homogénea,

la disminución de Y_{0dl} y de Cdl respecto al blanco sugiere una reducción del área metálica expuesta al electrolito debido a la adsorción inicial de las moléculas de cefalexina sobre la superficie del acero.

Tabla 10. Parámetros electroquímicos utilizados para ajustar los datos EIS de la muestra en blanco y material con el uso de inhibidor durante inmersión 0 días. El error medio de ajuste para los circuitos eléctricos equivalentes simulados fue inferior al 5%.

Muestra	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_f ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPEf		R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPEdl		Cdl ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$\eta\%$	θ
			Y_0 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \text{sn}$)	n		Y_0 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \text{sn}$)	n			
Blanco	6.32	-	9.59×10^{-4}	0.82	1140	-	-	1066	-	-
50 ppm	7.67	192	8.81×10^{-4}	0.77	1729	6.00×10^{-5}	0.66	703	34.07	0.34
100 ppm	7.25	72	4.14×10^{-4}	0.80	1350	3.57×10^{-5}	0.69	900	15.58	0.16
300 ppm	6.31	56	9.72×10^{-4}	0.81	1378	3.20×10^{-5}	0.68	882	17.27	0.17

Después de 7 días de inmersión (Tabla 11) se observó un cambio significativo en el comportamiento electroquímico. El blanco presentó una disminución drástica de R_{ct} hasta $133 \Omega \cdot \text{cm}^2$, evidenciando una intensa degradación del acero. En contraste, las muestras con 100 y 300 ppm alcanzaron valores de R_{ct} de 1060 y $2194 \Omega \cdot \text{cm}^2$, respectivamente, con eficiencias de inhibición de 87.45 % y 93.94 %. Este incremento estuvo acompañado por una disminución importante de Cdl , especialmente a 300 ppm ($698 \mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$), indicando una reducción del área metálica expuesta al electrolito debido a la formación de una película protectora adsorbida sobre la superficie del acero. Los valores de R_f y los bajos valores de Y_{0f} obtenidos para 100 y 300 ppm indican una película protectora más compacta y resistente al paso de especies corrosivas. Los valores de n_f cercanos a 0.90 para 300 ppm sugieren una mayor homogeneidad superficial, mientras que la disminución de Y_{0dl} confirma la reducción de la actividad electroquímica en la interfaz metal-solución.

Tabla 11. Parámetros electroquímicos utilizados para ajustar los datos EIS de la muestra en blanco y material con el uso de inhibidor durante inmersión de 7 días. El error medio de ajuste para los circuitos eléctricos equivalentes simulados fue inferior al 5%.

Muestra	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Rf ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPEf		Rct ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPEdl		Cdl ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$\eta\%$	θ
			Y0 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}\text{s}$)	n		Y0 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}\text{s}$)	n			
Blanco	6.78	-	5.34×10^{-3}	0.72	133	-	-	3572	-	-
50 ppm	11.35	10.79	5.82×10^{-2}	0.41	150	2.59×10^{-2}	0.63	8099	11.33	0.11
100 ppm	6.69	100	5.65×10^{-4}	0.88	1060	4.55×10^{-5}	0.66	1146	87.45	0.87
300 ppm	8.54	41	6.80×10^{-4}	0.90	2194	6.94×10^{-4}	0.88	698	93.94	0.94

A los 14 días de inmersión (Tabla 12), la tendencia protectora se mantuvo. La muestra a 300 ppm presentó el valor más alto de Rct ($1240 \Omega \cdot \text{cm}^2$) y una eficiencia de inhibición de 90.32 %, mientras que 100 ppm alcanzó $947 \Omega \cdot \text{cm}^2$ con una eficiencia de 87.33 %. Resulta particularmente relevante la disminución extrema de Cdl observada a 300 ppm ($4 \mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$), lo que indica una cobertura superficial muy elevada y una disminución considerable de los sitios activos disponibles para la reacción de corrosión. Simultáneamente, el aumento de Rf hasta $192 \Omega \cdot \text{cm}^2$ confirma la formación de una película inhibidora más compacta y estable. Los valores reducidos de Y_{0dl} y Y_{0f} , junto con exponentes n entre 0.73 y 0.88, evidencian una superficie más uniforme y una película protectora con mejores propiedades, favoreciendo la protección.

Tabla 12. Parámetros electroquímicos utilizados para ajustar los datos EIS de la muestra en blanco y material con el uso de inhibidor durante inmersión de 14 días. El error medio de ajuste para los circuitos eléctricos equivalentes simulados fue inferior al 5%.

Muestra	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Rf ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPEf		Rct ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPEdl		Cdl ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$\eta\%$	θ
			Y0 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}\text{s}$)	n		Y0 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}\text{s}$)	n			
Blanco	6.27	-	1.09×10^{-2}	0.70	120	-	-	10124	-	-
50 ppm	11.19	11.88	2.09×10^{-2}	0.54	125	2.18×10^{-2}	0.71	24965	4.00	0.04
100 ppm	5.93	83	8.22×10^{-4}	0.88	947	8.44×10^{-5}	0.56	800	87.33	0.87
300 ppm	6.10	192	3.02×10^{-3}	0.75	1240	2.13×10^{-5}	0.73	4	90.32	0.90

En el día 21 (Tabla 13) se observó una disminución generalizada de R_{ct} para todas las condiciones. La concentración de 100 ppm conservó el mejor desempeño electroquímico con un valor de R_{ct} de $344.6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y una eficiencia de 32.97 %, mientras que la condición de 300 ppm descendió hasta $270 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Estos resultados sugieren el inicio del deterioro de la película adsorbida debido a la exposición prolongada al medio agresivo que contiene cloruros. No obstante, la presencia de valores elevados de R_f , particularmente a 300 ppm ($150 \Omega \cdot \text{cm}^2$), indica que aún persisten regiones protegidas sobre la superficie metálica. El incremento de Y_0f y Y_{0dl} respecto a los tiempos anteriores, además del aumento de C_{dl} , evidencia una mayor penetración del electrolito a través de la película protectora. Sin embargo, los valores de n_f y n permanecen estables, indicando que aún existe una cobertura parcial del inhibidor sobre la superficie del acero.

Tabla 13. Parámetros electroquímicos utilizados para ajustar los datos EIS de la muestra en blanco y material con el uso de inhibidor durante inmersión de 21 días. El error medio de ajuste para los circuitos eléctricos equivalentes simulados fue inferior al 5%.

Muestra	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_f ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_f		R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_{dl}		C_{dl} ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^2$)	$\eta\%$	θ
			Y_0 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \text{s}^n$)	n		Y_0 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \text{s}^n$)	n			
Blanco	6.63	-	1.63×10^{-3}	0.77	231	-	-	398	-	-
50 ppm	13.1	12.97	3.74×10^{-2}	0.64	135	2.41×10^{-4}	0.64	2780	-	- 0.71
100 ppm	6.19	8.81	3.55×10^{-3}	0.66	344.6	3.58×10^{-3}	0.64	13	32.97	0.33
300 ppm	5.75	150	4.83×10^{-3}	0.73	270	7.86×10^{-4}	0.65	33	14.44	0.14

Después de 28 días de inmersión (Tabla 14), los valores de R_{ct} disminuyeron considerablemente en todas las condiciones evaluadas. El blanco alcanzó únicamente $76 \Omega \cdot \text{cm}^2$, mientras que las muestras inhibidas mostraron valores comprendidos entre 136 y $178 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Aunque la eficiencia disminuyó respecto a los días 7 y 14, las

concentraciones de 100 y 300 ppm mantuvieron eficiencias superiores al 50 %, indicando que aún existe un efecto protector residual. El incremento de C_{dl} hasta valores superiores a $6800 \mu F \cdot cm^{-2}$ sugiere que parte de la película protectora se degradó, permitiendo una mayor interacción entre el electrolito y la superficie metálica. En este tiempo hubo disminución de R_f e incremento de los valores de Y_{of} y Y_{odl} que confirman la pérdida progresiva de las propiedades de barrera de la película adsorbida. A pesar de ello, los valores de R_{ct} permanecieron por encima de los obtenidos para el blanco, demostrando que una fracción de la película inhibidora continuó adherida a la superficie y proporcionó protección residual frente al proceso corrosivo.

Tabla 14. Parámetros electroquímicos utilizados para ajustar los datos EIS de la muestra en blanco y material con el uso de inhibidor durante inmersión de 28 días. El error medio de ajuste para los circuitos eléctricos equivalentes simulados fue inferior al 5%.

Muestra	R_s ($\Omega \cdot cm^2$)	R_f ($\Omega \cdot cm^2$)	CPEf		R_{ct} ($\Omega \cdot cm^2$)	CPEdl		C_{dl} ($\mu F \cdot cm^{-2}$)	$\eta\%$	θ
			Y_0 ($\Omega^{-1} \cdot cm^{-2} s^n$)	n		Y_0 ($\Omega^{-1} \cdot cm^{-2} s^n$)	n			
Blanco	5.68	-	6.87×10^{-3}	0.57	76	-	-	15986		
50 ppm	10.59	41.66	2.52×10^{-2}	0.75	136	1.84×10^{-2}	0.66	8933	44.12	0.44
100 ppm	6.04	6.4	6.65×10^{-3}	0.65	178	5.05×10^{-3}	0.76	6825	57.30	0.57
300 ppm	6.46	45	1.53×10^{-2}	0.64	163	1.54×10^{-2}	0.63	9389	53.37	0.53

4.4 Isoterma de adsorción

El comportamiento de cómo se adsorbió la cefalexina sobre la superficie del acero AISI 1018 fue evaluado mediante diferentes modelos de isotermas de adsorción, para así comprender el mecanismo de interacción entre las moléculas del inhibidor y la superficie metálica. Se aplicaron los modelos de isotermas de Langmuir, Freundlich, Temkin y Frumkin, utilizando los valores de cobertura superficial (θ) obtenidos de la eficiencia de inhibición calculada mediante curvas de polarización. Los ajustes lineales permitieron

determinar el coeficiente de correlación (R^2) y las constantes de adsorción correspondientes para cada modelo. Tabla 15

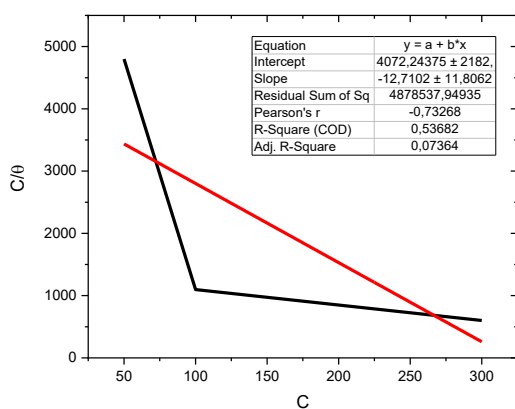
Los coeficientes de correlación obtenidos de las diferentes isothermas indican diferencias significativas en el comportamiento de adsorción del inhibidor. Entre los modelos evaluados, la isoterma de Freundlich presentó el coeficiente de correlación más alto ($R^2 = 0.96$), seguida de los modelos de Temkin ($R^2 = 0.94$) y Frumkin ($R^2 = 0.89$). En contraste, la isoterma de Langmuir mostró un mal ajuste a los datos experimentales ($R^2 = 0.53$), lo que sugiere que el proceso de adsorción no sigue las suposiciones de adsorción monocapa ideal sobre una superficie homogénea. El ajuste satisfactorio obtenido con el modelo de Freundlich indica que la adsorción ocurre sobre una superficie heterogénea de acero que contiene sitios activos con diferentes energías de adsorción. Del mismo modo, las isothermas de Temkin y Frumkin sugiere la existencia de interacciones entre moléculas inhibidoras adsorbidas. Por lo tanto, el mecanismo de adsorción del inhibidor farmacéutico caducado parece estar controlado por la heterogeneidad superficial y las interacciones intermoleculares.

Tabla 15. Parámetros obtenidos de isothermas de adsorción

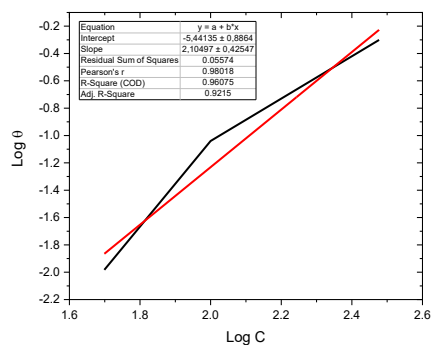
Isoterma	R^2	K_{ads} (L/mg)	K_{ads} (L/mol)	Interpretación
Langmuir $\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C_{inh}$	0.5368	2.45×10^{-4}	85.31	-
Freundlich $\log \theta = \log K_{ads} + \log C_{inh}$	0.9607	3.62×10^{-6}	1.257	Adsorción heterogénea
Temkin	0.9438	0.0177	6,148.8	Interacción molecular

$\theta = \frac{2.303}{f} \log K_{ads}$ $+ \frac{2.303}{f} \log C_{inh}$ $= \frac{1}{K_{ads}} + C_{inh}$				
Frumkin $\log \left(\frac{\theta C_{inh}}{1 - \theta} \right) = \log K_{ads} + 2a\theta$	0.8961	1.17	406,446.3	Interacciones laterales

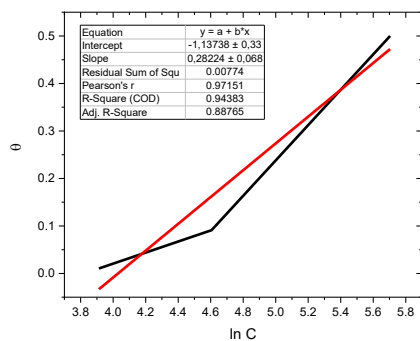
Langmuir



Freundlich



Temkin



Frumkin

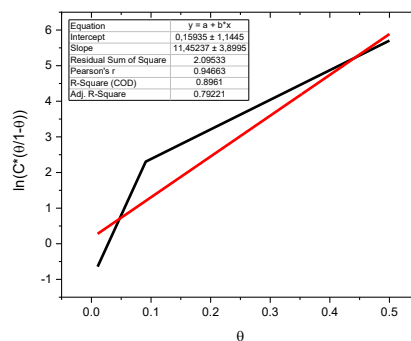


Figura 37. Isotermas de adsorción de la cefalexina caduca en el acero AISI 1018.

4.4.1 Mecanismo de adsorción del inhibidor.

Debido a que el modelo que mejor se ajusta es la isoterma de Freundlich con R^2 de 0.9607 este modelo se selecciona para obtener el tipo de adsorción que tiene el inhibidor.

Se calculó la energía libre de Gibbs estándar de adsorción (ΔG°_{ads}) a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta G^\circ_{ads} = -RT \ln(K_{ads}) \quad (16)$$

Para sistemas en solución acuosa:

$$\Delta G^\circ_{ads} = -RT \ln(55.5 * K_{ads}) \quad (17)$$

Donde:

ΔG°_{ads} : Energía libre de Gibbs estándar de adsorción

R: Constante universal de los gases ideales

T: Temperatura absoluta

K_{ads} : Constante de equilibrio de adsorción expresada en unidades molares

55.5 : Concentración molar del agua pura

Sustituyendo:

$$\Delta G^\circ_{ads} = -(8.314 \frac{J}{mol})(298.15 K) \ln(55.5 * 1.257 \frac{L}{mol}) \quad (18)$$

$$\Delta G^\circ_{ads} = -10.52 \frac{kJ}{mol}$$

Debido a que el resultado se encuentra en el rango de 0 a -20 kJ/mol se rige por una adsorción de proceso de fisisorción, las moléculas de la cefalexina se adhieren a la superficie del metal por interacciones electrostáticas débiles y fuerzas de Van der Waals.

4.5 Reacciones electroquímicas.

La Figura 38 presenta el esquema de la celda electroquímica utilizada para evaluar el comportamiento corrosivo del acero AISI 1018 en un medio compuesto por cloruro de sodio (NaCl) y sulfato de sodio (Na_2SO_4). En esta configuración, el electrodo de hierro funciona como ánodo, donde ocurre la reacción de oxidación del metal, generándose iones Fe^{2+} y liberándose electrones al circuito. Por su parte, el electrodo de grafito actúa como cátodo, proporcionando una superficie inerte sobre la cual tienen lugar las reacciones de reducción presentes en el sistema. Los iones cloruro favorecen el proceso corrosivo al incrementar la conductividad del electrolito y promover la disolución del hierro, mientras que los iones sulfato participan principalmente como especies espectadoras.

A partir de las semirreacciones anódica y catódica y de sus potenciales estándar (Tabla 16), se calculó un potencial de celda de aproximadamente -0.39 V . Este valor indica que el sistema presenta una tendencia termodinámica a la corrosión, favoreciendo la oxidación del hierro y la formación de productos de corrosión en la superficie metálica. Este comportamiento reproduce de manera simplificada las condiciones presentes en ambientes marino-industriales, donde la presencia simultánea de cloruros y sulfatos acelera el deterioro de los materiales ferrosos.

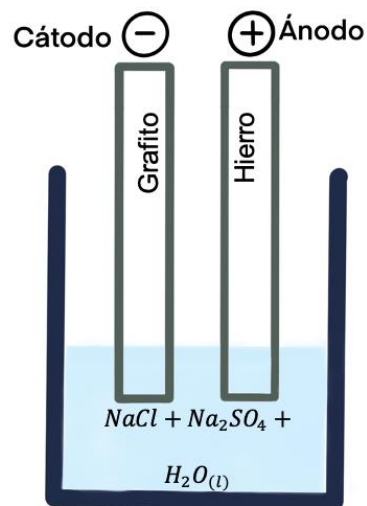


Figura 38. Celda electroquímica del sistema.

Tabla 16. Especies químicas de la celda.

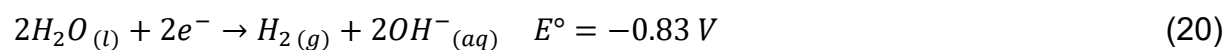
Na^+	-2.925 V	Catión
Cl^-	+1.359 V	Anión
SO_4^{-2}	_____	Espectador
H^+	-0.83 V	Catión
OH^-	-0.83 V	Anión

Reacciones químicas de la celda:

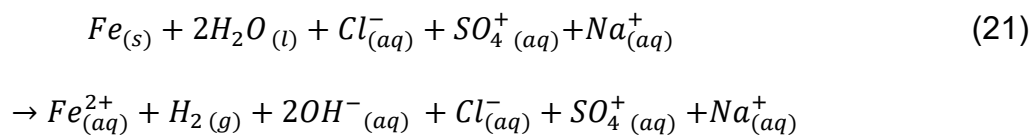
Reacción química de oxidación (ánodo):



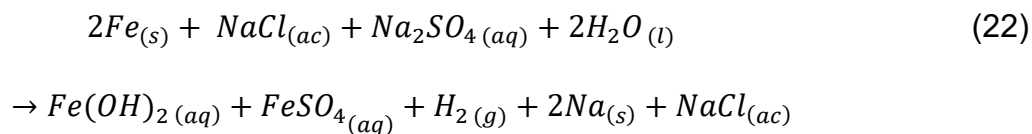
Reacción química de reducción (cátodo):



Reacción iónica:



Reacción neta:



Potencial de corrosión: $E^\circ_{celda} = E^\circ_{cátodo} - E^\circ_{ánodo}$

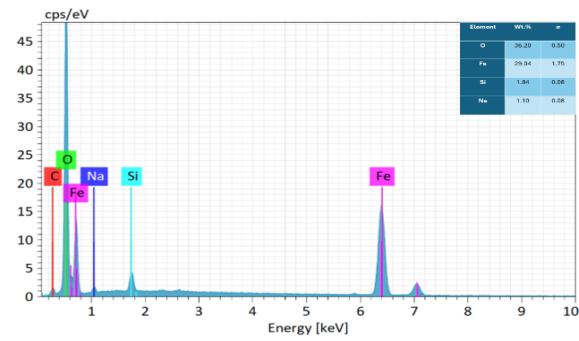
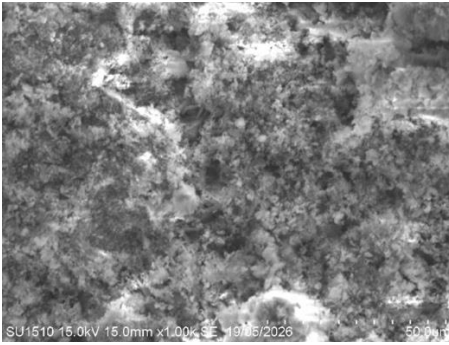
$$E^\circ_{celda} = -0.83 \text{ V} - (-0.440 \text{ V}) = -0.39 \text{ V} \quad (23)$$

4.6 Caracterización posterior a pruebas electroquímicas.

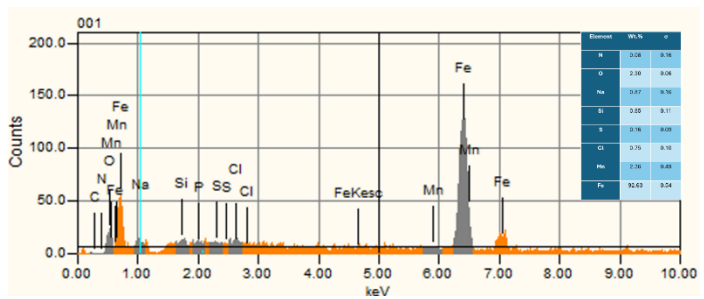
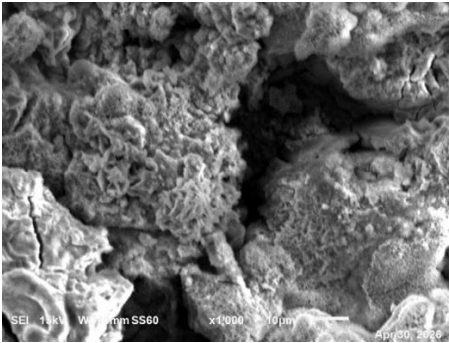
4.6.1 SEM y EDS

La Figura 39 muestra la morfología superficial y la composición elemental del acero AISI 1018 en ausencia y presencia de diferentes concentraciones (50, 100 y 300 ppm) de cefalexina caducada tras 7 días de exposición a 0.1 M Na_2SO_4 + 3% en peso de NaCl con una amplificación de 1000X. La muestra en blanco (a) reveló una superficie severamente corroída y heterogénea, caracterizada por productos de corrosión porosos e irregulares distribuidos sobre el sustrato. Se observaron daños superficiales localizados y alta rugosidad, lo que indica procesos activos de corrosión promovidos por iones cloruro. Además, la naturaleza no compacta de la capa de corrosión sugiere un comportamiento protector limitado, permitiendo una interacción continua de los electrolitos con la superficie del acero. La muestra expuesta a 50 ppm(b) mostró una superficie altamente heterogénea cubierta por grandes depósitos aglomerados con morfología nodular "similar a coliflor" y regiones porosas localizadas. A 100 ppm (c), la superficie parecía comparativamente más uniforme, sin grandes aglomerados y una capa superficial más uniformemente distribuida, aunque aún se observaban algunas porosidades e irregularidades superficiales. La muestra tratada con 300 ppm(d) mostró la morfología más suave y homogénea entre las condiciones evaluadas, con menos discontinuidades y menor porosidad aparente. La capa superficial más continua formada a mayor concentración inhibidora sugiere una mejor cobertura superficial y propiedades de barrera mejoradas frente al medio corrosivo.

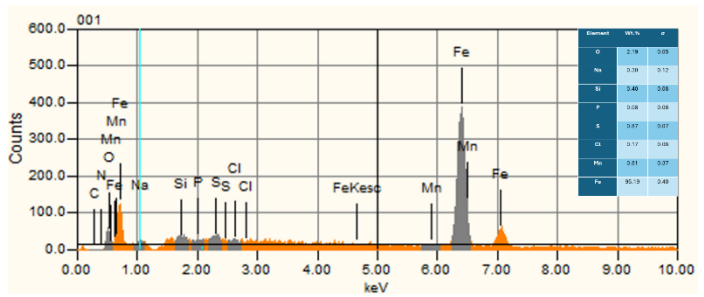
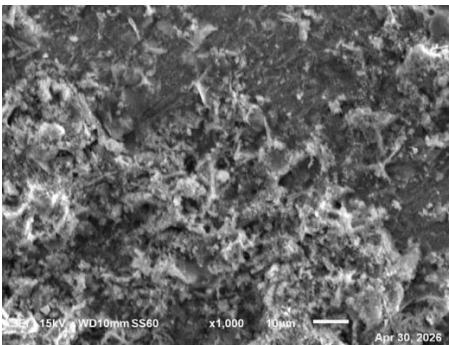
(a)



(b)



(c)



(d)

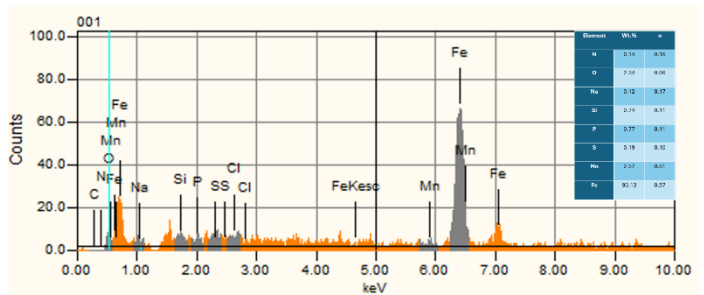
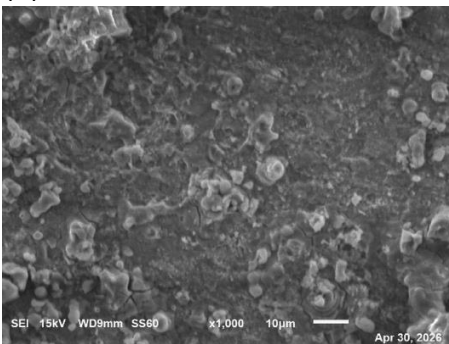


Figura 39. Micrografías SEM (1000X) y espectros EDS correspondientes de la superficie del acero tras mediciones de pérdida de masa durante 7 días en el medio corrosivo: (a) blanco, (b) 50 ppm, (c) 100 ppm, (d) 300 ppm.

4.7 Mecanismo de corrosión.

La corrosión del acero AISI 1018 en la solución compuesta por 0.1 M de Na_2SO_4 + 3 % en peso de NaCl ocurre mediante un mecanismo electroquímico controlado principalmente por la disolución anódica del hierro y la reducción catódica del oxígeno disuelto. La presencia de iones cloruro favorece la ruptura de los productos de corrosión formados sobre la superficie metálica, promoviendo la disolución continua del material y el desarrollo de zonas localizadas de ataque.

Durante los primeros instantes de inmersión, el hierro se oxida liberando electrones al medio y generando especies ferrosas solubles. Debido a la elevada concentración de cloruros presente en el medio, esta capa resulta poco compacta y presenta porosidad, permitiendo la penetración continua del electrolito hacia la superficie metálica.

Los resultados de OCP mostraron que el blanco presentó los potenciales más negativos durante toda la prueba, indicando una superficie electroquímicamente activa y una continua disolución del acero. Las curvas de polarización evidenciaron una elevada densidad de corriente de corrosión y ausencia de fenómenos significativos de protección superficial. Estas observaciones coinciden con los resultados de pérdida de masa y SEM, donde la muestra sin inhibidor presentó la mayor degradación superficial, abundantes productos de corrosión y una morfología altamente heterogénea.

Cuando se incorpora cefalexina al sistema, el mecanismo electroquímico cambia significativamente. El análisis FTIR confirmó la presencia de grupos funcionales ricos en electrones, principalmente oxígeno, nitrógeno y azufre, asociados a grupos amino, carboxilo y al anillo β -lactámico. Asimismo, los resultados UV-Vis demostraron que la estructura molecular principal del antibiótico permaneció conservada aun después de su

fecha de caducidad, manteniendo disponibles los centros activos responsables de la interacción con la superficie metálica.

Una vez que las moléculas de cefalexina (Figura 40) entran en contacto con la superficie del acero, los heteroátomos presentes en su estructura comienzan a adsorberse sobre sitios activos del metal mediante interacciones electrostáticas y coordinativas. Este proceso produce una película adsorbida que actúa como barrera física entre el electrolito y la superficie metálica.

La evidencia de este fenómeno proviene de los resultados de EIS. Entre los días 7 y 14 de inmersión se registraron los mayores valores de resistencia a la transferencia de carga, alcanzando $2194 \Omega \cdot \text{cm}^2$ para 300 ppm, acompañados por una disminución importante de la capacitancia de doble capa. Este comportamiento indica una reducción significativa de la superficie metálica expuesta al electrolito y una disminución en la velocidad de transferencia electrónica asociada al proceso corrosivo.

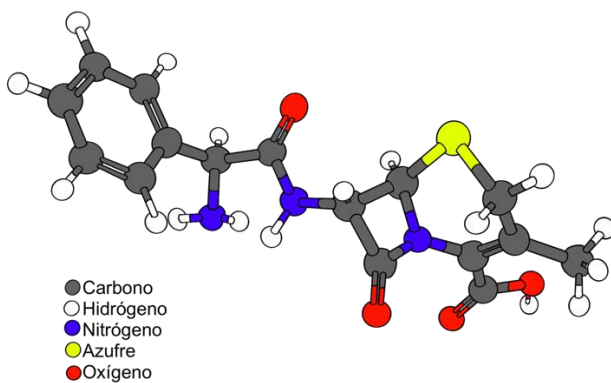


Figura 40. Molécula de Cefalexina tridimensional.

Las curvas de polarización mostraron además una disminución progresiva de la densidad de corriente de corrosión conforme aumentó la concentración de inhibidor. La reducción de la corriente anódica fue más evidente que los cambios observados en la rama

catódica, lo que sugiere que la cefalexina actúa predominantemente sobre la reacción de disolución del hierro, aunque sin modificar completamente el mecanismo catódico de reducción de oxígeno.

Los resultados gravimétricos respaldan este comportamiento. La eficiencia de inhibición aumentó desde valores prácticamente nulos a 50 ppm hasta aproximadamente 50 % a 300 ppm después de 7 días de inmersión. Simultáneamente, las micrografías SEM mostraron una transición desde superficies altamente corroídas y porosas hasta superficies más homogéneas y compactas conforme aumentó la concentración de cefalexina. La condición de 300 ppm presentó la menor porosidad y la mejor continuidad superficial, confirmando una mayor cobertura protectora.

Los resultados de adsorción aportan información adicional sobre la naturaleza del mecanismo. La isoterma de Freundlich presentó el mejor ajuste experimental ($R^2 = 0.9607$), indicando que la adsorción ocurre sobre una superficie heterogénea y que existen sitios con diferentes energías de adsorción. Además, los ajustes obtenidos mediante Temkin y Frumkin sugieren la existencia de interacciones laterales entre moléculas adsorbidas, lo que favorece la formación de una película protectora más compleja que una monocapa ideal.

El mecanismo global propuesto (Figura 41) consiste en una adsorción progresiva de moléculas de cefalexina sobre la superficie del acero AISI 1018, formando una película protectora heterogénea que reduce la transferencia de carga, limita la adsorción de especies agresivas y disminuye la velocidad de disolución del hierro. La máxima protección se alcanza a 300 ppm entre los días 7 y 14 de inmersión, donde la película

adsorbida presenta su mayor estabilidad. La acción continua de los iones cloruro provoca un deterioro gradual de la capa protectora; sin embargo, parte de la película permanece adsorbida incluso después de 28 días, proporcionando protección residual frente al medio corrosivo.

Este comportamiento permite concluir que la cefalexina caduca actúa como un inhibidor de corrosión basado principalmente en un mecanismo de adsorción superficial, con predominio de la inhibición de la reacción anódica de disolución del hierro y una contribución secundaria al bloqueo físico de la interfaz metal/electrolito.

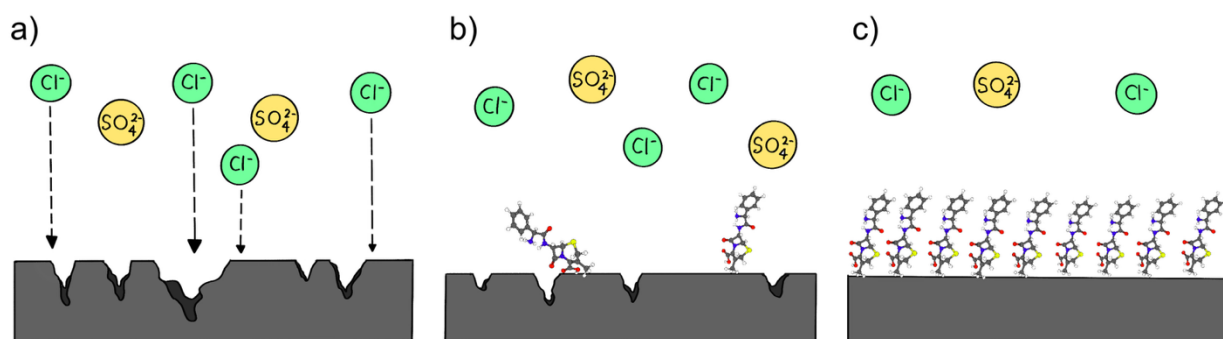


Figura 41. Mecanismo global de Cefalexina. a) Acero AISI 1018 sin protección, b) Acero AISI 1018 con baja concentración de inhibidor a base de cefalexina caduca y c) Acero AISI 1018 con la concentración óptima de inhibidor a base de cefalexina caduca.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

→ El análisis FTIR confirmó la presencia de grupos funcionales característicos de la cefalexina, asociados principalmente a funciones amida, amino y carboxilo. La presencia de estos grupos, que contienen átomos de nitrógeno, oxígeno y azufre, estos grupos funcionales son responsables de la interacción con la superficie del acero y contribuye al proceso de adsorción responsable del efecto inhibidor.

- El espectro UV-Vis mostró bandas de absorción características alrededor de 204 nm y 260 nm. La ausencia de desplazamientos significativos respecto a los valores reportados para cefalexina de grado farmacéutico indica que la estructura molecular responsable de la adsorción sobre la superficie metálica se mantiene estable lo que sugiere que la estructura molecular principal permanece sin modificaciones importantes en el medio corrosivo, conservando los grupos funcionales responsables de la interacción con la superficie metálica.
- Los resultados gravimétricos mostraron una disminución progresiva de la velocidad de corrosión conforme aumentó la concentración de cefalexina. La mejor respuesta se obtuvo a 300 ppm, con una eficiencia de inhibición de 50.21 %, lo que demuestra la capacidad del inhibidor para reducir la pérdida de material durante la exposición al medio corrosivo.
- Los resultados de potencial de circuito abierto mostraron que la adición de cefalexina desplazó el potencial hacia valores más nobles respecto al blanco. La concentración de 300 ppm presentó el comportamiento más estable durante la inmersión.
- Los resultados de espectroscopía de impedancia electroquímica mostraron un incremento de la resistencia a la transferencia de carga y una disminución de la capacitancia de doble capa en presencia de cefalexina. Estos cambios indican la formación de una película adsorbida que actúa como barrera frente al transporte de especies agresivas. La concentración de 300 ppm presentó la mayor respuesta protectora, alcanzando una eficiencia máxima cercana al 94 % durante los primeros 7 días de inmersión, después de ese tiempo la eficiencia fue disminuyendo.

- El análisis de isothermas indicó que el modelo de Freundlich presentó el mejor ajuste experimental ($R^2 = 0.9607$), sugiriendo que la adsorción de la cefalexina ocurre sobre una superficie energéticamente heterogénea. Asimismo, los ajustes obtenidos mediante los modelos de Temkin y Frumkin muestran que hay de interacciones intermoleculares entre las especies adsorbidas y respaldan el mecanismo de inhibición propuesto. Además de que la adsorción del inhibidor es por medio de la fisisorción.
- Las observaciones mediante SEM mostraron una disminución del deterioro superficial y una menor formación de productos de corrosión conforme aumentó la concentración del inhibidor. La muestra expuesta a 300 ppm presentó una superficie más homogénea y compacta, corroborando el efecto protector de la película adsorbida y los resultados obtenidos mediante las técnicas electroquímicas.
- La integración de los resultados electroquímicos, gravimétricos y de caracterización superficial demuestra que la cefalexina caduca actúa como un inhibidor prometedor de corrosión eficaz para el acero AISI 1018 en la solución 0.1 M Na_2SO_4 + 3 % wt NaCl. La eficiencia gravimétrica máxima fue ≈ 50 % mientras que EIS alcanzó ≈ 94 %. Su mecanismo de acción está asociado a la adsorción de sus moléculas sobre la superficie metálica, formando una película protectora que reduce los procesos de transferencia de carga y limita el avance de la corrosión.
- Desde una perspectiva ambiental, el presente trabajo demuestra el potencial de la cefalexina caduca como materia prima para el desarrollo de inhibidores de corrosión sostenibles. La valorización de medicamentos fuera de especificación mediante aplicaciones industriales ofrece una alternativa prometedora para disminuir la

generación de residuos farmacéuticos, reducir riesgos de contaminación ambiental y promover el aprovechamiento responsable de recursos dentro de un esquema de economía circular.

5.2 Recomendaciones

1. Se recomienda realizar estudios teóricos mediante Teoría del Funcional de la Densidad (DFT) con el fin de profundizar en el mecanismo de inhibición de la cefalexina sobre el acero AISI 1018. Estos estudios podrían incluir el cálculo de parámetros globales de reactividad química, tales como las energías de los orbitales frontera (HOMO y LUMO), diferencia de energía (ΔE), electronegatividad (χ), dureza (η), suavidad (σ), potencial químico (μ), electrofilicidad (ω) y fracción de electrones transferidos (ΔN). Asimismo, se recomienda determinar el potencial electrostático molecular (MEP) para identificar las regiones con mayor probabilidad de interacción con la superficie metálica, así como el análisis de funciones de Fukui e índices de reactividad local para establecer los sitios preferenciales de adsorción asociados a los átomos de nitrógeno, oxígeno y azufre presentes en la molécula. La integración de estos resultados permitiría correlacionar las propiedades electrónicas de la cefalexina con el mecanismo de adsorción propuesto a partir de las evidencias electroquímicas y de caracterización superficial obtenidas experimentalmente.
2. Se recomienda implementar técnicas de ruido electroquímico para evaluar los procesos de corrosión e inhibición bajo condiciones de inmersión prolongada. Esta metodología permitiría obtener información en tiempo real sobre la estabilidad de la película protectora formada por la cefalexina, así como detectar eventos

localizados de corrosión que no siempre son evidentes mediante técnicas electroquímicas convencionales.

3. Se propone investigar la incorporación de cefalexina caduca en sistemas de recubrimientos inteligentes con capacidad de liberación controlada. Esta estrategia podría favorecer la formación continua de una película protectora sobre la superficie metálica, incrementar la vida útil del sistema de protección anticorrosiva y ampliar las posibilidades de reutilización de residuos farmacéuticos dentro de aplicaciones de ingeniería de materiales.
4. Se recomienda evaluar el desempeño del inhibidor bajo diferentes condiciones de agresividad ambiental, incluyendo variaciones de temperatura, pH y concentración de cloruros, con el propósito de determinar los límites de aplicación y estabilidad del sistema inhibidor en escenarios más cercanos a condiciones de servicio reales.
5. Se sugiere complementar el estudio con técnicas avanzadas de caracterización superficial, tales como espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS), microscopía de fuerza atómica (AFM) y difracción de rayos X (XRD) para obtener información detallada sobre la composición química, espesor y uniformidad de la película protectora formada sobre la superficie del acero.

6. Referencias.

- Abdallah, M., Zaaferany, I., Al-Fahemi, J. H., Abdallah, Y., & Fouda, A. S. (2012). Antibacterial cephalosporin as inhibitors for the corrosion of iron in hydrochloric acid solutions. *International Journal of Electrochemical Science*, 7(8), 6622-6637. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)15735-X](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)15735-X)
- Adin, M. Ş., & Okumuş, M. (2022). Investigation of microstructural and mechanical properties of dissimilar metal weld between AISI 420 and AISI 1018 STEELS. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(7), 8341-8350. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06243-w>
- Adel, O., Mohamed, M. E., & Khamis, E. (2025). Thermodynamic, electrochemical and surface characterization of copper corrosion inhibition in acidic solution using rice straw extract. *Scientific Reports*, 15(1), 27753. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12482-w>
- Al-Amiery, A. A., Isahak, W. N. R. W., & Al-Azzawi, W. K. (2023). Corrosion inhibitors: natural and synthetic organic inhibitors. *Lubricants*, 11(4), 174. <https://doi.org/10.3390/lubricants11040174>
- Al-Amiery, A., Isahak, W. N. R. W., & Al-Azzawi, W. K. (2023). Multi-method evaluation of a 2-(1, 3, 4-thiadiazole-2-yl) pyrrolidine corrosion inhibitor for mild steel in HCl: combining gravimetric, electrochemical, and DFT approaches. *Scientific Reports*, 13(1), 9770. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36252-8>
- Al-Amiery, A. A., Yousif, E., Isahak, W. N. R. W., & Al-Azzawi, W. K. (2023). A review of inorganic corrosion inhibitors: types, mechanisms, and applications. *Tribology in Industry*, 44(2), 313. <https://doi.org/10.24874/ti.1456.03.23.06>

- Al-Otaibi, M. S., Al-Mayouf, A. M., Khan, M., Mousa, A. A., Al-Mazroa, S. A., & Alkhathlan, H. Z. (2014). Corrosion inhibitory action of some plant extracts on the corrosion of mild steel in acidic media. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(3), 340-346. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.01.015>
- Alamry, K. A., Khan, A., Aslam, J., Hussein, M. A., & Aslam, R. (2023). Corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid solution by the expired Ampicillin drug. *Scientific Reports*, 13(1), 6724. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33519-y>
- Andrade, C. (2020). Electrochemical methods for on-site corrosion detection. *Structural concrete*, 21(4), 1385-1395. <https://doi.org/10.1002/suco.201900426>
- Asperti, D., Cabrini, M., Lorenzi, S., Rosace, G., Omrani, A., & Pastore, T. (2024). Electrochemical impedance spectroscopy analysis of organic epoxy coatings reinforced with nano clay. *Materials*, 17(12), 3028. <https://doi.org/10.3390/ma17123028>
- ASTM A29/A29M – 20. (2020). Standard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought. ASTM International.
- ASTM G1-03 (2012). Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM G3-14 (2019). Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM G31-21 (2025). Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM G59-97 (2020). Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM G102-23 (2023). Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM G193-22 (2022). Standard Terminology and Acronyms Relating to Corrosion. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA
- Avdeev, Y. G., Nenasheva, T. A., Luchkin, A. Y., Marshakov, A. I., & Kuznetsov, Y. I. (2024). Effect of organic corrosion inhibitors on the kinetics of the cathodic hydrogen evolution reaction on steel in a sulfuric acid solution. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 18(1), 111-124. <https://doi.org/10.1134/S1990793124010044>
- Ayón, V. A., Quesada, A. L. R., & Rodríguez, Y. L. (2005). Influencia de los parámetros medioambientales en la corrosión de elementos estructurales metálicos. *Ciencias Holguín*, 11(4), 1-11. ISSN: 1027-2127. <https://www.redalyc.org/pdf/1815/181517866003.pdf>
- Aziz, R. J. (2016). Study of some drugs as corrosion inhibitors for mild steel in 1M H₂SO₄ solution. *Int. J. Curr. Res. Chem. Pharm. Sci*, 3(12), 1-7. <http://dx.doi.org/10.22192/ijcpcps.2016.03.12.001>
- Bard, A. J., Faulkner, L. R., & White, H. S. (2022). *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons. ISBN: 9781119334064

- Barthel, J., & Deiss, R. (2021). The limits of the Pourbaix diagram in the interpretation of the kinetics of corrosion and cathodic protection of underground pipelines. *Materials and Corrosion*, 72(3), 434–445. <https://doi.org/10.1002/maco.202011977>
- Barrón Vázquez, S. (2022). Evaluación de la corrosión en aceros AISI 1018 y 8620 en medios ácidos utilizando inhibidores orgánicos de la corrosión. Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información. <https://doi.org/10.24275/uama.6737.9416>
- Basaldella, E. & Legnoverde, María. (2010). Functionalized silica matrices for controlled delivery of cephalexin. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 56. 191-196. <https://doi.org/10.1007/s10971-010-2293-7>
- Benea, L., Simionescu, N., & Mardare, L. (2020). The effect of polymeric protective layers and the immersion time on the corrosion behavior of naval steel in natural seawater. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 13174-13184. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.059>
- Benítez, L. P. T., Castellar, P. J. M., Percy, E. D. A., & Bravo, M. J. B. (2014). Uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión. *Informador técnico*, 78(2), 155-164. <https://doi.org/10.23850/22565035.99>
- Bijapur, K., Molahalli, V., Shetty, A., Toghan, A., De Padova, P., & Hegde, G. (2023). Recent trends and progress in corrosion inhibitors and electrochemical evaluation. *Applied Sciences*, 13(18), 10107. <https://doi.org/10.3390/app131810107>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2022). Fundamentals of materials science and engineering. John Wiley & Sons. ISBN: 978-1-119-82056-7

- Crisan, M., Muntean, C., Chumakov, Y., & Plesu, N. (2024). Investigating the corrosion inhibition mechanisms of alkanol ammonium salts: a case study with ethylethanolammonium 4-nitrobenzoate on carbon steel in saline solution. *Applied Sciences*, 14(5), 1832. <https://doi.org/10.3390/app14051832>
- Cristiani, P., Moradi, M., Basseguy, R., Macdonald, D., Gu, T., Zhang, D., ... & Xu, D. (2025). Fundamentals and critical appraisal of electrochemical techniques for investigating microbial corrosion. *Corrosion Science*, 246, 112694. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.112694>
- Cristoforetti, A., Rossi, S., Deflorian, F., & Fedel, M. (2024). Unlocking the Potential of Sebacate: Investigating Its Role in the Inhibition of Filiform Corrosion on Organic Coated Steel. *Metals*, 14(6), 623. <https://doi.org/10.3390/met14060623>
- Dai, Y., Wan, C., Yan, S., Wang, G., Yang, Y., & Liao, Y. (2024). Erosion-Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel in Chloropropene. *Materials*, 18(1), 120. <https://doi.org/10.3390/ma18010120>
- Daneshian, B., Höche, D., Knudsen, O. Ø., & Skilbred, A. W. B. (2023). Effect of climatic parameters on marine atmospheric corrosion: correlation analysis of on-site sensors data. *npj Materials Degradation*, 7(1), 10. <https://doi.org/10.1038/s41529-023-00329-6>
- Di Sarno, L., Majidian, A., & Karagiannakis, G. (2021). The effect of atmospheric corrosion on steel structures: A state-of-the-art and case-study. *Buildings*, 11(12), 571. <https://doi.org/10.3390/buildings11120571>

- Ekeocha, C. I., Onyeachu, I. B., Etim, I.-I. N., & Oguzie, E. E. (2023). Review of forms of corrosion and mitigation techniques: A visual guide. *African Scientific Reports*, 2(3), 117. <https://doi.org/10.46481/asr.2023.2.3.117>
- Farsi, C., Zergane, S., Amroune, S., Mohamad, B., & Benyahia, A. (2025). Evolution of the electrical potential for the cathodic protection of pipelines according to the variation of the imposed current. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 32(4), 82-89. <https://doi.org/10.11916/j.issn.1005-9113.2024049>
- Fayomi, O. S. I., Akande, G., Ighravwe, D. E., & Aikhuele, D. O. (2021). Inhibitive characteristics of cefalexin drug addition on corrosion evolution of mild steel in chloride medium. *Key Engineering Materials*, 886, 119-125. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.886.119>
- Fernández-Pérez, B. M., González-Guzmán, J. A., González, S., & Souto, R. M. (2014). Electrochemical impedance spectroscopy investigation of the corrosion resistance of a waterborne acrylic coating containing active electrochemical pigments for the protection of carbon steel. *International Journal of Electrochemical Science*, 9(4), 2067-2079. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)07911-7](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)07911-7)
- Féron, D., Guerre, C., Herms, E., & Laghoutaris, P. (2016). Stress corrosion cracking of Alloy 600: Overviews and experimental techniques. In *Stress Corrosion Cracking of Nickel Based Alloys in Water-cooled Nuclear Reactors* (pp. 325-353). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100049-6.00009-4>
- Firmanto, H., Candra, S., Hadiyat, M. A., Triastomo, Y. P., & Wirawan, I. (2022). Tensile strength and microstructure of rotary friction-welded carbon steel and

stainless-steel joints. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(1), 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7010007>

- Fontana, Mars Guy, and Norbert D. Greene. *Corrosion engineering*. McGraw-hill, (2018). ISBS 00702214611
- Fouda, A. S., & Elabbasy, H. M. (2019). Corrosion inhibition effect of methanol extract of Nerium oleander on copper in nitric acid solutions. *International Journal of Electrochemical Science*, 14(7), 6884-6901. <https://doi.org/10.20964/2019.07.31>
- Gece, G. (2011). Drugs: A review of promising novel corrosion inhibitors. *Corrosion science*, 53(12), 3873-3898. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.006>
- Hermoso-Diaz, I. A., Lopez-Cecenes, R., Rios, J. F. D. L., Landeros-Martínez, L. L., Sarmiento-Bustos, E., Uruchurtu-Chavarin, J., & Gonzalez-Rodriguez, J. G. (2021). Experimental and theoretical studies of α -linolenic acid as green corrosion inhibitor for carbon steel in 0.5 M sulfuric acid. *Molecules*, 26(20), 6169. <https://doi.org/10.3390/molecules26206169>
- Hernández, H. H., Reynoso, A. R., González, J. T., Morán, C. G., Hernández, J. M., Ruiz, A. M., ... & Cruz, R. O. (2020). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): A Review Study of Basic Aspects of the Corrosion Mechanism Applied to Steels, *Electrochem. Impedance Spectrosc.*, IntechOpen, London, 2020. *Intech open*, 137-144. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94470>
- Hoshi, Y., e Itagaki, M. (2018). II. Fundamentos de la medición electroquímica de la corrosión: impedancia electroquímica. *Materiales y Medio Ambiente* , 67 (2), 55-58. <https://doi.org/10.3323/jcorr.67.55>

- Iannuzzi, M., & Frankel, G. S. (2022). The carbon footprint of steel corrosion. *npj Materials Degradation*, 6, 101. <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00318-1>
- Ionescu, G. C., Ionescu, G. L., & Marin, L. (2024). Modern Theoretical and Practical Protection Methods of Metallic Structures Against the Effects of Corrosion. *J. Appl. Eng. Sci*, 14, 97-102. <https://doi.org/10.2478/jaes-2024-0012>
- Ituen, E., Akaranta, O., & James, A. (2017). Evaluation of performance of corrosion inhibitors using adsorption isotherm models: an overview. *Chem. Sci. Int. J*, 18(1), 1-34. ISSN: 2249-0205
- Jero, D., Caussé, N., Marsan, O., Buffeteau, T., Chaussec, F., Buvignier, A., ... & Pébère, N. (2023). Film-forming amines adsorption and corrosion kinetics on carbon steel surface in neutral solution investigated by EIS and PM-IRRAS analysis. *Electrochimica Acta*, 443, 141925. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.141925>
- Joag, S., Kiesewetter, J., & Chellam, S. (2024). Electrode corrosion, pH, and dissolved oxygen dynamics, and hardness/silicon removal during aluminum electrocoagulation of hypersaline produced water. *ACS ES&T Engineering*, 5(1), 86-102. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.4c00459>
- Kadhim, A., Al-Amiery, A. A., Alazawi, R., Al-Ghezi, M. K. S., & Abass, R. H. (2021). Corrosion inhibitors. A review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(1), 54-67. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-1-3>
- Kanjanaprayut, N., Siripongsakul, T., & Promdirek, P. (2024). Intergranular Corrosion Analysis of Austenitic Stainless Steels in Molten Nitrate Salt Using Electrochemical Characterization. *Metals*, 14(1), 106. <https://doi.org/10.3390/met14010106>

- Koch, G. (2017). *Cost of Corrosion*. En *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies* (pp. 1–29). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2>
- Kong, H., Jiao, Z., Lu, J., & Liu, C. T. (2021). Low-carbon advanced nanostructured steels: microstructure, mechanical properties, and applications. *Science China Materials*, 64(7), 1580-1597. <https://doi.org/10.1007/s40843-020-1595-2>
- Koushik, B. G., Van den Steen, N., Mamme, M. H., Van Ingelgem, Y., & Terry, H. (2021). Review on modelling of corrosion under droplet electrolyte for predicting atmospheric corrosion rate. *Journal of Materials Science & Technology*, 62, 254-267. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.061>
- L.E. Tsygankova, V. A. Bryksina, A. A. Uryadnikov and A. E. Abramov (2022). Protective efficiency of expired drug against acid corrosion of carbon steel. *The international journal of corrosion and scale inhibition*. Vol.11, No.2, Pages 564-576. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-2-7>
- Lebrini, M., Robert, F., & Roos, C. (2010). Inhibition effect of alkaloids extracts from *Annona squamosa* plant on the corrosion of C38 steel in normal hydrochloric acid medium. *International Journal of Electrochemical Science*, 5(11), 1698-1712. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)15422-8](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)15422-8)
- Lee, Y.-H., Kim, G.-I., Kim, K.-M., Kim, J.-G., & Kang, S.-J. (2022). Localized corrosion occurrence in low-carbon steel pipe caused by microstructural Inhomogeneity. *Materials*, 15, 1870. <https://doi.org/10.3390/ma15051870>

- Lei, B., Peng, M., Liu, L., Hu, S., Zhang, W., & Meng, G. (2020). Galvanic corrosion performance of an Al–BN abradable seal coating system in chloride solution. *Coatings*, 11(1), 9. <https://doi.org/10.3390/coatings11010009>
- Li, P., Geng, Y., & Du, M. (2021). Research on the pitting mechanism of dispersion-strengthened high-strength steel under wet-dry cycling in a marine environment. *Journal of Ocean University of China*, 20(6), 1459-1468. <https://doi.org/10.1007/s11802-021-4838-5>
- Li, Q., Xia, X., Pei, Z., Cheng, X., Zhang, D., Xiao, K., ... & Li, X. (2022). Long-term corrosion monitoring of carbon steels and environmental correlation analysis via the random forest method. *Npj Materials Degradation*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00211-3>
- Li, X., Deng, S., & Fu, H. (2011). Triazolyl blue tetrazolium bromide as a novel corrosion inhibitor for steel in HCl and H₂SO₄ solutions. *Corrosion Science*, 53(1), 302-309. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.09.036>
- Liu, P., Zhang, H., Fan, Y., & Xu, D. (2023). Microbially influenced corrosion of steel in marine environments: a review from mechanisms to prevention. *Microorganisms*, 11(9), 2299. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11092299>
- Lv, X., Wang, C., Liu, J., Sand, W., Nabuk Etim, I-I., Zhang, Y., Xu, A., Duan, J., & Zhang, R. (2024). The Microbiologically Influenced Corrosion and Protection of Pipelines: A Detailed Review. *Materials*, 17(20), 4996. <https://doi.org/10.3390/ma17204996>
- Ma, I. W., Ammar, S., Kumar, S. S., Ramesh, K., & Ramesh, S. (2022). A concise review on corrosion inhibitors: types, mechanisms and electrochemical evaluation

studies. *Journal of Coatings Technology and Research*, 19(1), 241-268.

<https://doi.org/10.1007/s11998-021-00547-0>

- Maldonado-Bandala, E., Higuereado-Moctezuma, N., Nieves-Mendoza, D., Gaona-Tiburcio, C., Zambrano-Robledo, P., Hernández-Martínez, H., & Almeraya-Calderón, F. (2020). Corrosion behavior of AISI 1018 carbon steel in localized repairs of mortars with alkaline cements and engineered cementitious composites. *Materials*, 13(15), 3327. <https://doi.org/10.3390/ma13153327>
- Martinez-Gonzalez, J. J., Trujillo-Luna, K. F., Porcayo-Calderon, J., Pérez-Tijerina, E., Kumar, Y., Gonzalez-Rodriguez, J. G., & Agarwal, V. (2025). Exploring the role of NS codoped carbon dots for enhanced corrosion inhibition of carbon steel in sulfuric acid. *Results in Chemistry*, 102710. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102710>
- Martínez-Pérez, F. (2023). Corrosión. Tipos. Prevención. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 32(2). ISSN 2071-0054
- Medupin, R. O., Ukoba, K. O., Yoro, K. O., & Jen, T. C. (2023). Sustainable approach for corrosion control in mild steel using plant-based inhibitors: A review. *Materials Today Sustainability*, 22, 100373. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100373>
- Mohamedien, H. A., Kamal, S. M., El-Deen, A. G., Taha, M., & El-Deeb, M. M. (2022). Electrochemical and computational estimations of cephalosporin drugs as eco-friendly and efficient corrosion inhibitors for aluminum in alkaline solution. *Scientific Reports*, 12(1), 13333. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17423-5>
- Morcillo, M., Díaz, I., Cano, H., Chico, B., & de la Fuente, D. (2019). Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts.

Construction and Building Materials, 213, 723– 737.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.334>

- National Transportation Safety Board. (1971). Collapse of U.S. 35 Highway Bridge, Point Pleasant, West Virginia December 15, 1970. (Report HAR-71-1). NTSB. <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/HAR7101.pdf>
- National Transportation Safety Board. (1984). Collapse of a Suspended Span of Interstate Toute 95 Highway Bridge Over the Mianus River Bridge, Greenwich, Connecticut, June 28,1983 (Report HAR-84-03). NTSB. <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/HAR8403.pdf>
- National Transportation Safety Board. (1989). Aircraft Accident Report Aloha Airlines, Flight 243, Boeing 737–200, near Maui, Hawaii April 28, 1998 (Report AAR-89-03). NTSB. <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/AAR8903.pdf>
- Negm, N. A., Ghuiba, F. M., & Tawfik, S. M. (2011). Novel isoxazolium cationic Schiff base compounds as corrosion inhibitors for carbon steel in hydrochloric acid. Corrosion Science, 53(11), 3566-3575. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.06.029>
- Noriega, O. A. G., Nicolás, A. F., Chavarín, J. U., Islas, A. T., Campos, E. C. M., & Valencia, H. M. (2025). Influence of a Plasma Nitriding Treatment on the Corrosion Behavior of API 5L X70 Steel in Simulated Soil Solution. Electrochem, 6(4), 42. <https://doi.org/10.3390/electrochem6040042>
- O. Benali, M. Zebida, U. Maschke (2021). Synthesis and inhibition corrosion effect of two thiazole derivatives for carbon steel in 1M HCl. Journal of the Indian chemical society. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100113>

- Omari, M., Bouiti, K., Jebbari, S., Lahache, N., Barhoumi, A., Labjar, N., Hajjaji, S. E., Said-Ahmed, M., Lebrini, M., Nasrellah, H., et al. (2025). Corrosion inhibition of C38 steel in 1 M HCl using benzoxazole-2-thione: Electrochemical, SEM-EDX, and theoretical studies. *Metals*, 15(7), 810. <https://doi.org/10.3390/met15070810>
- Orazem, M. E., & Tribollet, B. (2008). *Electrochemical impedance spectroscopy*. New Jersey, 1(906), 383-389. ISBN: 9781118527399
- Parangusan, H., Bhadra, J., & Al-Thani, N. (2021). A review of passivity breakdown on metal surfaces: influence of chloride-and sulfide-ion concentrations, temperature, and pH. *Emergent Materials*, 4(5), 1187-1203. <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00194-6>
- Panda, S. S., Kumar, B. V. R., Dash, R., & Mohanta, G. (2013). Determination of cephalexin monohydrate in pharmaceutical dosage form by stability-indicating RP-UFLC and UV spectroscopic methods. *Scientia pharmaceutica*, 81(4), 1029. <https://doi.org/10.3797/scipharm.1306-07>
- Pérez Valencia, M. Á. (2024). Efecto de la temperatura de revenido en la resistencia a la corrosión por picaduras y localizada de un acero inoxidable austenítico AISI304. [Tesis de licenciatura, Fundación América] Repositorio Universidad América. <https://repository.uamerica.edu.co/items/fa1d267d-c0b9-4fae-8887-2ffd562c3946>
- Policastro, S. A., Anderson, R. M., Hangarter, C. M., Arcari, A., & Iezzi, E. B. (2023). Incorporating physics-based models into equivalent circuit analysis of EIS data from organic coatings. *Coatings*, 13(7), 1285. <https://doi.org/10.3390/coatings13071285>

- Popoola, L. T. (2019). Progress on pharmaceutical drugs, plant extracts and ionic liquids as corrosion inhibitors. *Heliyon*, 5(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01143>
- Pozos Reyes, R. (2014). Evaluación de la inhibición de la corrosión del acero api 5L x52 mediante una cefalosporina de primera generación en medio ácido. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana (México)] Coordinación de Servicios de Información. <https://hdl.handle.net/11191/5608>
- Prošek, T., Keil, P., & Popova, K. (2025). Corrosion protection and sustainability: Why are the two concepts inherently intertwined. *Corrosion and Materials Degradation*, 6(3), 38. <https://doi.org/10.3390/cmd6030038>
- Qu, H. J., Tao, F., Gu, N., Montoya, T., Taylor, J. M., Schaller, R. F., ... & Wharry, J. P. (2022). Crystallographic effects on transgranular chloride-induced stress corrosion crack propagation of arc welded austenitic stainless steel. *npj Materials Degradation*, 6(1), 43. <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00252-2>
- Ramírez-Cano, J. A., & Orozco-Cruz, R. (2024). Fármacos caducos como inhibidores de corrosión. *Revista de divulgación científica iBIO*, 6(2), 178-178. ISSN 2954-4890
- Răuță, D. I., Matei, E., & Avramescu, S. M. (2025). Recent Development of Corrosion Inhibitors: Types, Mechanisms, Electrochemical Behavior, Efficiency, and Environmental Impact. *Technologies*, 13(3), 103. <https://doi.org/10.3390/technologies13030103>
- Reddy, B. B. K., Nagoji, K. E. V., & Sahoo, S. (2018). Preparation and in vitro & in vivo evaluation of cephalexin matrix tablets. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 54(03), e17277. <https://doi.org/10.1590/s2175-97902018000317277>

- Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2025). Corrosion and corrosion control. John Wiley & Sons. ISBN: 9781119324744
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Revista Tecnología en Marcha*, 28(3), 127-136. ISSN 0379-3982
- Santos, R. F. D. (2014). Estudo da corrosividade de líquidos iônicos base 2-hidroxietilamina em aço carbono AISI 1004.
- Sawada, K., Okazaki, S., Inaba, T., Sakuma, M., & Azuma, K. (2024). Evaluation of corrosion potential stability of stainless steels in dilute electrolyte solution for application to a quasi-reference electrode used in electrochemical sensing system. *Chemosensors*, 13(1), 4. <https://doi.org/10.3390/chemosensors13010004>
- Schweitzer, P. A. (2009). *Fundamentals of corrosion: mechanisms, causes, and preventative methods*. CRC press. ISBN 978-1-4200-6770-5
- Selim, Y.A., Abd-El-Raouf, M., Zakaria, K. *et al.* An electrochemical, and Surface studies of synthesized Gemini ionic liquid as corrosion inhibitor for carbon steel in petroleum field. *Sci Rep* 14, 10766 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58321-2>
- Shin, S. J., Kim, J. Y., An, S., & Chung, T. D. (2022). Recent advances in electroanalytical methods for electro organic synthesis. *Current Opinion in Electrochemistry*, 35, 101054. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2022.101054>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Nieman, T. A. (1998). Principles of instrumental analysis: Douglas A. Skoog, F. James Holler, Timothy A. Nieman. 5th ed. Belmont (CA): Brooks/Cole.

- Smal, I. M., Yu, Q., Veneman, R., Fränzel-Luiten, B., & Brilman, D. W. F. (2014). TG-FTIR Measurement of CO₂-H₂O co-adsorption for CO₂ air capture sorbent screening. *Energy procedia*, 63, 6834-6841.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.717>
- Soltani, N., Tavakkoli, N., Khayat Kashani, M., Jalali, M. R., & Mosavizade, A. (2012). Green approach to corrosion inhibition of 304 stainless steel in hydrochloric acid solution by the extract of *Salvia officinalis* leaves. *Corrosion Science*, 62, 122-135.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.05.003>
- Socrates, G. (2004). Infrared and Raman characteristic group frequencies: tables and charts. John Wiley & Sons.
- Sun, Y. P., Yang, C. T., Yang, C. G., Xu, D. K., Li, Q., Yin, L., ... & Yang, K. (2019). Stern–Geary Constant for X80 Pipeline Steel in the Presence of Different Corrosive Microorganisms: Y.-P. Sun et al. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 32(12), 1483-1489. <https://doi.org/10.1007/s40195-019-00902-6>
- Tian, X., Su, G., Li, Y., Qu, B., Zhang, F., Xiao, H., ... & Dou, Z. (2025). Erosion-Corrosion Since 2000: Bibliometrics and Perspectives. *ChemEngineering*. 9(6), 119.
<https://doi.org/10.3390/chemengineering9060119>
- Ucci Galasso, M. S. (2025). *Películas protectoras ricas en iones silicato para mitigar la corrosión del acero de construcción* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería; Argentina).
- Vakili, M., Koutník, P., Kohout, J., & Gholami, Z. (2024). Analysis, Assessment, and Mitigation of Stress Corrosion Cracking in Austenitic Stainless Steels in the Oil and

<https://doi.org/10.3390/surfaces7030040>

- Vaszilcsin, N., Kellenberger, A., Dan, M. L., Duca, D. A., & Ordodi, V. L. (2023). Efficiency of expired drugs used as corrosion inhibitors: A review. *Materials*, 16(16), 5555. <https://doi.org/10.3390/ma16165555>
- Vaszilcsin, C. G., Putz, M. V., Kellenberger, A., & Dan, M. L. (2023). On the evaluation of metal-corrosion inhibitor interactions by adsorption isotherms. *Journal of Molecular Structure*, 1286, 135643. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135643>
- Vera, R., Valverde, B., Olave, E., Sánchez, R., Díaz-Gómez, A., Muñoz, L., & Rojas, P. (2023). Atmospheric corrosion and impact toughness of steels: case study in steels with and without galvanizing, exposed for 3 years in Rapa Nui Island. *Heliyon*, 9(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17811>
- Verma, C., Ebenso, E. E., Quraishi, M. A., & Hussain, C. M. (2021). Recent developments in sustainable corrosion inhibitors: design, performance and industrial scale applications. *Materials Advances*, 2(12), 3806-3850. <https://doi.org/10.1039/D0MA00681E>
- Verma, C., Quraishi, M. A., Ebenso, E. E., & Bahadur, I. (2018). A green and sustainable approach for mild steel acidic corrosion inhibition using leaves extract: experimental and DFT studies. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 4(3), 33. <https://doi.org/10.1007/s40735-018-0150-3>
- Wang, Y., Mu, X., Dong, J., Umoh, A. J., & Ke, W. (2021). Insight into atmospheric corrosion evolution of mild steel in a simulated coastal atmosphere. *Journal of*

<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.021>

- Xu, Y., Zhang, Q., Zhou, Q., Gao, S., Wang, B., Wang, X., & Huang, Y. (2021). Flow accelerated corrosion and erosion– corrosion behavior of marine carbon steel in natural seawater. *Npj Materials degradation*, 5(1), 56. <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00205-1>
- Yadav, L., Sihmar, A., Kumar, S., Dhaiya, H., & Vishwakarma, R. (2024). Review of nano-based smart coatings for corrosion mitigation: mechanisms, performance, and future prospects. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-27. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2>
- Yang, Z., Dong, H., Han, Y., Zhang, Y., Li, P., & Feng, Y. (2024). The Growth Behavior and Mechanisms of Pitting Corrosion on Super 13Cr Martensitic Stainless-Steel Surfaces at Different Diameter-to-Depth Ratios. *Coatings*, 14(4), 435. <https://doi.org/10.3390/coatings14040435>
- Zaroual, A., Daoui, S., El Faydy, M., Timoudan, N., Chraka, A., Zarrok, H., ... & Zarrouk, A. (2024). Investigation of a pyridazinone derivative as a corrosion inhibitor for carbon steel in acidic conditions using experimental and theoretical methods. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(9), 100732. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100732>
- Zhang, J., Yang, F., Dai, Y., Liu, Y., Yu, Y., & Wang, S. (2023). Corrosion inhibition mechanism of water-soluble imidazoline on A572 Gr. 65 steel in 3.5 wt% NaCl solution. *Langmuir*, 39(49), 18043-18051. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c02781>

- Zhang, R., Sur, D., Li, K., Witt, J., Black, R., Whittingham, A., ... & Hatrick-Simpers, J. (2024). Bayesian assessment of commonly used equivalent circuit models for corrosion analysis in electrochemical impedance spectroscopy. *npj Materials Degradation*, 8(1), 120. <https://doi.org/10.1038/s41529-024-00537-8>
- Zhao, S., Wang, Y., Zhao, Y., Sun, X., Zhang, H., Piao, H. G., ... & Huang, Y. (2020). The effect of magnetic field pretreatment on the corrosion behavior of carbon steel in static seawater. *RSC advances*, 10(4), 2060-2066. <https://doi.org/10.1039/C9RA09079G>
- Zhuang, W., Wang, X., Zhu, W., Zhang, Y., Sun, D., Zhang, R., & Wu, C. (2021). Imidazoline gemini surfactants as corrosion inhibitors for carbon steel X70 in NaCl solution. *ACS omega*, 6(8), 5653-5660. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c06103>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

JEFATURA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



Cuernavaca, Morelos, 04 de septiembre de 2026.

DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
COORDINADOR DEL POSGRADO
EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: Inhibidor de la corrosión a base de Cefalexina caduca para el acero al carbono simulando atmósfera marina-industrial. que presenta la alumna **Zayda Abigail Uribe Rosales**, para obtener el título de la **Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

DR. ISAÍ ROSALES CADENA

DRA. ANA KAREN GÁLVEZ LARIOS

DR. CÉSAR AUGUSTO GARCÍA PÉREZ

DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS

Se adiciona efirma UAEM



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Edificio 65,
Tel. 777 329 70 00 Ext. 6208 / ciicap.posgrado@uaem.mx

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS | Fecha:2026-09-21 14:45:33 | FIRMANTE

Nko6yY0RmIij21dr2jP59xG/a0KKAuiHKNTLksAcW0jly53vVPbbGQChzikVoa3DVjZ+2mLukN2JcP00TnR/2BzUCP678Pcta3/auw6ZJkBrAZSU6ZgkqSbnKPHgWbhQLS087X7+
Haz1RxUi0BQsGY4YATSYGPOTA3so2ugS+VMleVDZ8b9kxFwsaJKxZefGjhhp6xZkdic82PZFaL1FMsYdNclebSQ6yuRhevPtSSE0cNj0s8rYSKYgsNZdOpTsdL2PoljLNA5RXob6
XK47Pziw7uTztyiX3a4zD0xfSUTo2+rRy0/wN5p9Padcq/o0oV11eEo104W94wYa+IA==

CESAR AUGUSTO GARCÍA PÉREZ | Fecha:2026-09-21 14:52:01 | FIRMANTE

kN8zdlvO3cn7A26fD/+7NMg/e2QEE9ZNQbgaZNTk/seNtQht9isxzVhgc5wgpV9hMwX/b6lR+QoUppy2fod82sS14O2990bFMA9aD3RntAqpFjrY1oX08KmlbVVFpJ3ghXnAeQFEh
S+uChCNxOW5bq6AiW6RABAunGCuPZAI+1+qzf+ysayR9Fh9/ShJkQ8LO7SM4Ws47t5xTzBXURjD0i716kVvcF9klbwEUFsglnUZBxcpCEgOFJtyzFULAMwsO5VqFu7LqR0TcA
oCXU8FhfV6dk+Hl+bRKua9IVpOfx8E9rpd3klxmKpcOH7aUBg5ZKZ7pLqk2dRyHqdkQSZyQ==

ANA KAREN GALVEZ LARIOS | Fecha:2026-09-21 16:42:31 | FIRMANTE

rOuTkB8aXOWIz1eOz4nkdT+PCbxYW+7iMMGMTac9qBHRjO7WdaD2y3htRGSFP7BdWu2+z6EkUR7lxIN3YVdERiff9YkoJDceJyhNL/bd9YZQu9bYFtFhWz5R3J8jEtlzp3mBBvn
Gt5aN24zSVXyS5OBGmrRbGvBF4uZpwcANvrjxSNSWmhZ+29FizSpZBqxq/+BTg7w9EInvQ+50ht7Dct8mEylsX56WmweHlyZ+d9QrazQRTGh+Zuem/tpX+lo87FBWNXL8ya04
kf/wyB5ssVW6E7DJ7m5hw1w65uNp0QF79udkhNt6Yva3RvwqatFH+UrrjKMCJnhMfS4KIYQ==

ISAI ROSALES CADENA | Fecha:2026-09-22 07:10:42 | FIRMANTE

lyhHRkAoULT3YD4Og9hNhwjyM/VQ7u3PwRvIXK/1YON56psXNJoaSYzSf+9j87FzqnoAoz6PROUZwP0/CZOYTojgS5o1fZKdo0ZS5W3Re8NIGCrZW/Dewlovam407lfpu7HOew
CPPiwGXgrPd8IIQDVyv1QMIAQAdCMMG6mIxiMeDsfWLxwKSq7WEULzX7cvufc8QPfcdJgGmlx3casWXP1QMrm/h7WOauF3TFHkz/vNqWxZAbGDnECs8O/iPRdd6c3bzDKV8
28gmnVlsefw5cWDz0CaRGo42siUVXe+Ex6hbHHyh0lc77+gZWql/VadeMSFr+wxdhVPK6JY7bg==

JOSE GONZALO GONZALEZ RODRIGUEZ | Fecha:2026-09-22 09:48:10 | FIRMANTE

ZOx8MIOO3ybwj0nPZI/aFEcyeY+aXVFSqTzG8oJs6Vh0PdjPCmzwxJ94+V/FBGcF9+yEKKmygJF0a5vFMgCX5G7V3NdxUYQ4wHKEFJPoxT/etjScy34Mcl4DBOdeX9Mxyvck+
ydmzB2Mb7axqsJKAIPirFKBNOCDu8WQMqvhXUO9ZjEzp/HgSc+4ZNXthkq8+YP9hyIlgJ/B7LDwAxcGzKfehRmNJ4S9K/WX9U1xk+0Ab0JehFx3rYqxiG00n9l6J2oxzaE/t3DNir
DuTmRhGrxcSnP0GtoqSZDB0lOPTu3mPd0nw4DS1bBbC0f1m8eFVfmfhpPKiUb2qZQCghzA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



Mj5JxCQKz

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/OnmoTQoXYZslluFaDhglpqpshikzjkj>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029