



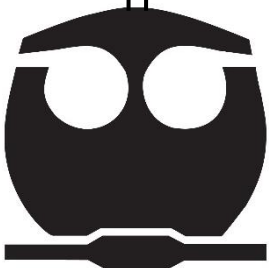
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**CITRININA COMO INHIBIDOR
DE CORROSIÓN EN MEDIO DULCE
PARA UN ACERO API 5L X52**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA
IVÁN EMILIANO DE SANTIAGO BARRIOS

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Presidente: Profesor FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ
Vocal: Profesor DAVID TURCIO ORTEGA
Secretario: Profesora ARACELI ESPINOZA VÁZQUEZ
1er. Suplente: Profesor JOSÉ FERNANDO FLORES ÁLVAREZ
2do Suplente: Profesor SERGIO GARCÍA GALÁN

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Corrosión y Protección, Departamento de Ingeniería Metalúrgica,
Conjunto D. Facultad de Química, UNAM.

Dra. ARACELI ESPINOZA VÁZQUEZ
ASESOR DE TESIS

IVÁN EMILIANO DE SANTIAGO BARRIOS
SUSTENTANTE

ÍNDICE

RESUMEN.....	5
HIPÓTESIS.....	5
OBJETIVOS.....	5
CAPÍTULO 1	6
1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
1.1 Corrosión.....	6
1.2 Tipos de corrosión.....	6
1.3 Corrosión en la industria petrolera	7
1.4 Clasificación de Aceros.....	8
1.5 Aceros grado API.....	9
1.6 Inhibidores de corrosión.....	10
1.7 Clasificación de inhibidores de corrosión	10
1.8 La citrinina y sus propiedades	11
1.9 Técnicas electroquímicas.....	12
1.9.1 Potencial a circuito abierto	12
1.9.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)	12
1.9.3 Extrapolación de Tafel	15
1.10 Isotermas de adsorción	16
1.10.1 Isoterma de Langmuir.....	16
CAPÍTULO 2	18
2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	18
2.1 Preparación de soluciones	18
2.2 Condiciones de flujo.....	18
2.3 Pruebas electroquímicas	19
CAPÍTULO 3	21
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
3.1 Análisis metalográfico.....	21
3.2 Potencial a circuito abierto	22
3.3 Curvas de polarización	24
3.3.1 Análisis de las curvas en condiciones estáticas y hidrodinámicas	24
3.3.2 Obtención de eficiencias para condiciones estáticas y hidrodinámicas.....	25

3.4	Efecto de la concentración de inhibidor mediante la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica.....	26
3.4.1	Efecto de la concentración de la citrinina en condiciones estáticas	27
3.4.2	Efecto de la concentración de la citrinina a 100 RPM mediante EIS	31
3.4.3	Efecto de la concentración de la citrinina a 500 RPM mediante EIS	34
3.5	Análisis termodinámico.....	36
CAPÍTULO 4		39
4. CONCLUSIONES.....		39
CAPÍTULO 5		40
5. REFERENCIAS		40

RESUMEN

Los problemas de la corrosión son frecuentes en la industria del petróleo donde la extracción de los crudos suele estar contaminada con hasta 26 mil ppm de cloruros provenientes de agua de mar (en caso de la extracción en plataforma marina). Los inhibidores de corrosión son ampliamente utilizados en el control y prevención de este fenómeno, la mayoría de los compuestos usados para este fin resultan demasiado tóxicos, costosos y dañinos para el medio ambiente y el ser humano. Esta situación ha creado la necesidad de encontrar inhibidores de corrosión que sean ambientalmente amigables y de bajo costo. Los extractos de plantas, principalmente de hongos, son biodegradables y presentan una fuente renovable de compuestos químicos que poseen un alto potencial como inhibidores.

Para evaluar condiciones ácidas en presencia de sustancias orgánicas en dichos ductos, se emplea cloruro de sodio saturado con dióxido de carbono. Por lo que, en esta investigación se evalúa a la citrinina como un inhibidor de corrosión en medio dulce (NaCl saturado con CO₂) a diferentes condiciones de flujo.

HIPÓTESIS

La citrinina presenta actividad como inhibidor de corrosión de tipo formador de película por adsorción en medio salino dulce y en condiciones tanto estáticas como dinámicas.

OBJETIVOS

- Determinar el efecto de la citrinina como inhibidor de corrosión en medio dulce mediante técnicas electroquímicas.
- Comparar la mejor concentración de la citrinina en función de las condiciones hidrodinámicas establecidas en medio salino dulce.
- Determinar el efecto de la citrinina a la mejor concentración en función del tiempo de inmersión.

CAPÍTULO 1

1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Corrosión

La corrosión se define como la destrucción o deterioro de un metal por la reacción química o electroquímica de dicho metal con el medio que lo rodea, tiene como consecuencia la liberación de iones en el ambiente ^[1]. De igual manera, según la norma ASTM G15-08^[2] la corrosión corresponde a “La reacción química o electroquímica entre un material y su medio ambiente, que produce un deterioro del material y sus propiedades”.

1.2 Tipos de corrosión

De manera general se clasifica la corrosión en dos grupos, la localizada y la uniforme. A su vez la corrosión localizada también se divide en macroscópica y microscópica ^[3] a continuación se describen los mecanismos de corrosión más comunes de los cuales algunos se pueden observar de manera gráfica en la figura 1.1:

- **Corrosión uniforme (inciso a):** ocurre sobre toda la superficie del material de forma homogénea, deteriorándolo completamente
- **Corrosión galvánica (inciso b):** ocurre cuando existe una unión, física o eléctrica entre metales de diferente naturaleza, los cuales en presencia de un electrolito forman una celda electroquímica, donde el material de menor potencial electroquímico se corroe.
- **Corrosión inducida por la erosión (inciso c):** Es el efecto producido cuando el movimiento de un agente corrosivo sobre una superficie metálica la cual acelera sus efectos destructivos a causa del desgaste mecánico.
- **Corrosión por fisuras o crevice (inciso d):** se produce en zonas estrechas donde la concentración de oxígeno es mucho menor que el resto del sistema y cuyo efecto induce a que estas zonas de menor concentración de oxígeno actúen como ánodo, propiciando el proceso de corrosión en las fisuras.
- **Corrosión por picadura (inciso e):** también conocida como pitting, se presenta en materiales pasivados, debido a las características geométricas del sistema, existe una acumulación de agentes oxidantes y un incremento del pH del medio, lo que propicia el deterioro de la capa pasivada, permitiendo que la corrosión se desarrolle en estas zonas puntuales.

- **Corrosión intergranular (inciso f):** La corrosión intergranular es un deterioro por corrosión localizada y/o adyacente a los límites de grano de una aleación. Bajo condiciones ordinarias, si un metal se corroe uniformemente, los límites de grano serán sólo ligeramente más reactivos que la matriz.
- **Corrosión bajo tensión (inciso g):** ocurre cuando un material, sometido a esfuerzo de tensión ya sea de forma interna o externa, se forman pequeñas fisuras, que dan inicio al proceso de corrosión, de igual manera el ataque corrosivo puede provocar que avancen las grietas.
- **Corrosión bajo fatiga (inciso h):** Ocurre cuando los componentes metálicos de una estructura fallan debido a esfuerzos cíclicos aplicados en un ambiente corrosivo, tal como el agua salada.

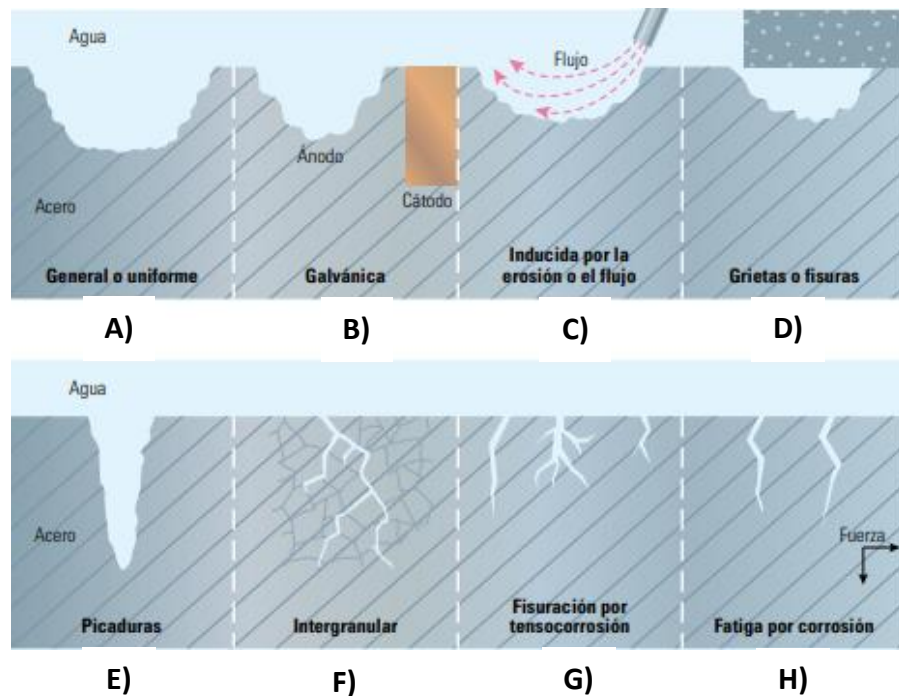


Figura 1.1 Mecanismos de corrosión más comunes ^[4]

1.3 Corrosión en la industria petrolera

Los efectos de la corrosión sobre equipos industriales producen pérdidas económicas que llegan a cifras muy importantes (en países industrializados hasta el 3% del PIB) ^[5]. De todas las fallas que ocurren en la industria del gas y del petróleo, la más importante es la corrosión. Como se

puede observar en la tabla 1.1, los daños por problemas de corrosión representan el 33% de fallas en la industria.

Tabla 1.1 Fallas más comunes en la industria petrolera ^[6].

TIPOS DE FALLAS	%
Corrosión	33
Fatiga	18
Daño mecánico	14
Fractura frágil	9
Defecto de fabricación	9
Defecto de soldadura	7
Otros	10

En tuberías que transportan gas natural o crudo, existen 2 medios corrosivos que representan grandes pérdidas en la industria petrolera. Cuando el agente corrosivo es el CO₂, se dice que el medio es dulce ^[7]. Dicho compuesto representa el 28% de las fallas en las tuberías como se observa en la tabla 1.2. por otro lado, cuando el agente corrosivo es el H₂S se dice que el medio es amargo.

Tabla 1.2 Tipos de fallas en tuberías que transportan hidrocarburos o gas natural ^[6]

TIPOS DE FALLAS EN TUBERÍAS	%
Por CO ₂	28
Por H ₂ S	18
En Soldaduras	18
Picaduras	12
Erosión	9
Corrosión galvánica	6
Espacios Confinados	3
Impacto	3
Corrosión bajo tensión	3

1.4 Clasificación de Aceros

Fundamentalmente los aceros son aleaciones formadas de hierro y una pequeña adición de carbono que puede oscilar entre 0.04% y 2.11% en peso, así como otros elementos aleantes

como el manganeso, silicio, cromo, fósforo etc. Con base en el contenido de carbono las aleaciones hierro-carbono se clasifican en dos grupos:

- Aceros: hasta un 2.11% en peso de C.
- Hierros: más de 2.11% y hasta 6.67% de C

El acero proporciona muchos beneficios a nivel industrial que lo hacen ser de los materiales más utilizados debido a su bajo costo y a las propiedades que proporciona tales como ductilidad, dureza, resistencia a la tracción, maleabilidad entre otras. Dichas propiedades están en función de la composición química y al tipo de tratamiento al que son sometidos los aceros.

Según la SAE ^[8] los aceros también pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Aceros al carbono
- Aceros de media aleación
- Aceros resulturados
- Aceros inoxidable
- Aceros para herramientas

Haciendo énfasis en los aceros al carbono, estos son aquellos que poseen un porcentaje de carbono menor a 0.9%, además que poseen buenas propiedades como la resistencia mecánica y son de bajo costo. Los aceros al carbono se pueden identificar mediante la nomenclatura 10XX donde “XX” corresponde al porcentaje de carbono presente. De acuerdo con el porcentaje de este elemento, también se pueden clasificar como de bajo carbono, medio carbono y alto carbono.

1.5 Aceros grado API

La especificación API 5L del American Petroleum Institute se utiliza principalmente para el transporte de gas natural y petróleo. Estas tuberías API 5L son sin costura y soldadas. Su objetivo principal es el transporte de agua, petróleo y gas. La capacidad del fabricante determina el tamaño de la tubería. Un tubo API 5L se fabrica siguiendo las especificaciones establecidas por la Organización Internacional de Normalización (ISO) 3183^[9]. PSL1 y PSL 2 son los dos niveles de especificación de producto que han sido reconocidos por el comité técnico, se puede observar en la tabla 1.3 la composición química del acero grado X52 bajo especificaciones PSL1 y PSL2.

Tabla 1.3 Composiciones nominales de aceros grado API ^[10]

GRADO	PSL 1				PSL 2			
	C (Max.)	Mn (Max.)	P (Max.)	S (Max.)	C (Max.)	Mn (Max.)	P (Max.)	S (Max.)
A	0.22	0.90	0.03	0.03	0.22	1.20	0.025	0.015
B	0.26	1.20	0.03	0.03	0.22	1.30	0.025	0.015
X42	0.26	1.30	0.03	0.03	0.22	1.40	0.025	0.015
X46	0.26	1.40	0.03	0.03	0.22	1.40	0.025	0.015
X52	0.26	1.40	0.03	0.03	0.22	1.40	0.025	0.015
X56	0.26	1.40	0.03	0.03	0.22	1.40	0.025	0.015
X60	0.26	1.40	0.03	0.03	0.22	1.45	0.025	0.015
X65	0.26	1.45	0.03	0.03	0.22	1.65	0.025	0.015

Debido a los problemas de corrosión que se presentan en los aceros grado tubería antes mencionados, una alternativa para tratar de abatir este problema es el uso de inhibidores de corrosión.

1.6 Inhibidores de corrosión

A partir de la norma ISO 8044:2015^[11], se define a los inhibidores como: sustancias químicas que cuando están presentes en el sistema de corrosión a una concentración adecuada disminuyen la velocidad de corrosión, sin cambiar significativamente la concentración de cualquier agente corrosivo.

A su vez, se pueden clasificar los inhibidores de corrosión de acuerdo con su composición química o al tipo de reacción que interviene. Los inhibidores de corrosión comerciales se encuentran disponibles bajo ciertos nombres o marcas que usualmente no proporcionan ninguna información acerca de su composición química. Las formulaciones comerciales generalmente consisten en una sustancia activa (el inhibidor), algún tipo de solvente y otros aditivos tales como surfactantes, des emulsificantes, formadores de película, etc. ^[12].

1.7 Clasificación de inhibidores de corrosión

Se pueden clasificar los inhibidores de corrosión según el tipo de reacción que interviene, los cuales a su vez pueden ser anódicos, catódicos o mixtos. Por otro lado, si se clasifican por su composición química, estos pueden ser orgánicos o inorgánicos ^[13].

- **Orgánicos:** En su forma concentrada, estos compuestos suelen ser líquidos o sólidos viscosos, dichos inhibidores se adsorben física o químicamente sobre la interfaz metálica. La parte activa es un compuesto alifático o aromático cargado de forma positiva con un

grupo amino. Dichos inhibidores protegen al metal formando una película sobre la superficie metálica.

- Inorgánicos: Se pueden dividir en dos grupos: anódicos o pasivantes y los catódicos o no pasivantes. Usualmente son sales cristalinas como cromato, fosfato o molibdato de sodio. Sólo los aniones de estos compuestos están involucrados en el proceso de reducción de la velocidad de corrosión.
- Anódicos: También llamados inhibidores pasivantes, causan un gran cambio en el potencial de corrosión en dirección anódica forzando a la superficie metálica a entrar en el estado de pasivación.
- Catódicos: Pueden funcionar disminuyendo la velocidad de la reacción catódica o precipitando selectivamente sobre áreas catódicas limitando la difusión de especies susceptibles a reducirse en estas áreas.
- Mixtos: Son compuestos que afectan ambas reacciones electroquímicas, tanto la anódica como la catódica, en general afectan la superficie cuando se adicionan en concentración suficiente, usualmente se designan como formadores de película protegiendo al metal.

La citrinina es un compuesto que puede ser atractivo para evaluarlo como inhibidor de corrosión.

1.8 La citrinina y sus propiedades

La citrinina es una micotoxina que fue aislada por primera vez en 1931 como una sustancia cristalina color amarillo limón. La citrinina se recrystaliza en alcohol como finas agujas y se descompone a 175°C, es un ácido fuerte, soluble en alcohol y dioxano. Se estudiaron sus propiedades como potencial antibiótico, pero se descubrió que tenía efectos tóxicos, al estudiar al compuesto en ratas se encontró que produce fallo renal luego de una dosis simple ^[14]. Se puede apreciar en la figura 1.2 la molécula de este compuesto:

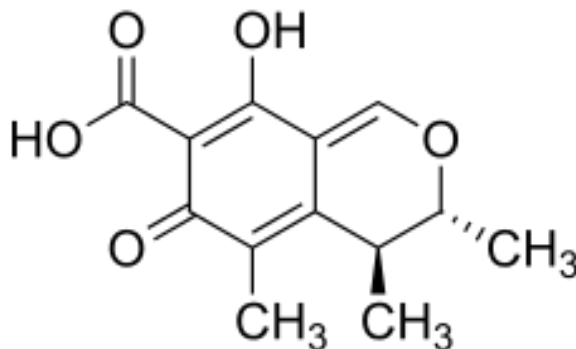


Figura 1.2 Estructura molecular de la citrinina

1.9 Técnicas electroquímicas

La importancia que tiene el conocimiento de los procesos y mecanismos a través de los cuales se desarrolla la corrosión, ha impulsado al estudio y la búsqueda de métodos con lo que puedan evaluarse el comportamiento de los materiales. Por ello existen diversas técnicas electroquímicas que nos permiten conocer los mecanismos involucrados durante el proceso de corrosión y además estudiar otros fenómenos como la eficiencia de un inhibidor.

1.9.1 Potencial a circuito abierto

Se define como potencial de circuito abierto aquel potencial que alcanza con el tiempo un material frente a la acción de un electrolito. Dicho electrolito interacciona con los elementos del material y lo transforma. La transformación que tiene lugar puede ser de tipo protectora (puede formar una capa pasiva). La medida del potencial a circuito abierto es uno de los principales parámetros de corrosión y permite conocer el potencial en estado estacionario de la muestra. A través de este valor se conoce la capacidad protectora de un recubrimiento sobre el sustrato.

1.9.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)

La impedancia electroquímica es un método empleado para estudiar la corrosión el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna que es aplicada a un electrodo de trabajo, proporcionando una respuesta en corriente, durante la experimentación generalmente se aplica una señal pequeña a un electrodo y se mide la respuesta en corriente a diversas frecuencias. No obstante en ciertas circunstancias, es posible aplicar una pequeña señal en corriente y medir la respuesta en potencial del sistema, de esta manera el equipo procesa las mediciones de potencial – tiempo y corriente – tiempo, dando una serie de valores de impedancia y frecuencias denominados como espectro de impedancias.

En corriente directa la resistencia, el potencial y la intensidad están dadas por la Ley de Ohm:

$$E = IR \quad (1.1)$$

Donde:

E= Potencial (V), I= Intensidad de corriente (A), R= Resistencia (Ω)

En corriente alterna, la ecuación correspondiente es:

$$E = IZ \quad (1.2)$$

Donde: $Z = \text{Impedancia } (\Omega)$

Los datos proporcionados por esta técnica están basados en tres diagramas. El primero corresponde al diagrama de Nyquist el cual muestra que al graficar la parte imaginaria de la impedancia (Z'') contra la parte real (Z') se pueden determinar los posibles mecanismos que ocurren en un fenómeno electroquímico.

En la figura 1.3 se muestra el diagrama de Nyquist para diversos valores de n . La sustitución de capacitancias C por elementos de fase constante, en cuyo caso se prefiere usar una constante pseudo capacitiva Y , ocasiona una disminución en la parte imaginaria de la impedancia y por ello un aplanamiento de los diagramas de Nyquist, como puede observarse en la Figura 1.3.

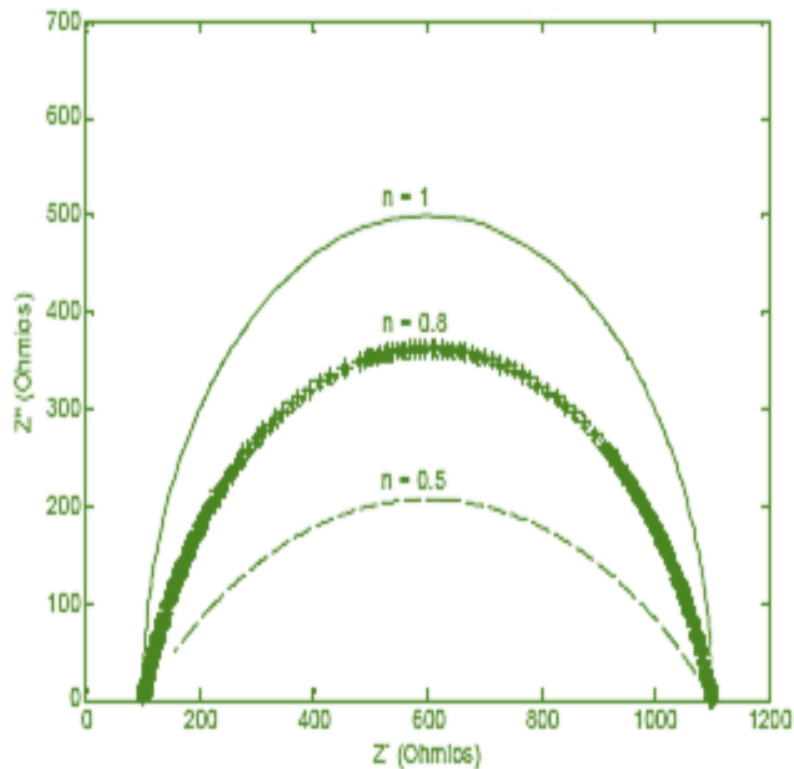


Figura 1.3 Diagrama de Nyquist de un circuito simple, para diversos valores de n ^[41].

Para complementar el diagrama anterior, también se utilizan los diagramas de Bode, los cuales reflejan el valor de señal de la impedancia con respecto a la frecuencia. Los componentes de dicha señal son el módulo (figura 1.4) y el ángulo de fase (figura 1.5), en este caso la frecuencia se representa en escala logarítmica para observar mejor el comportamiento a bajas frecuencias.

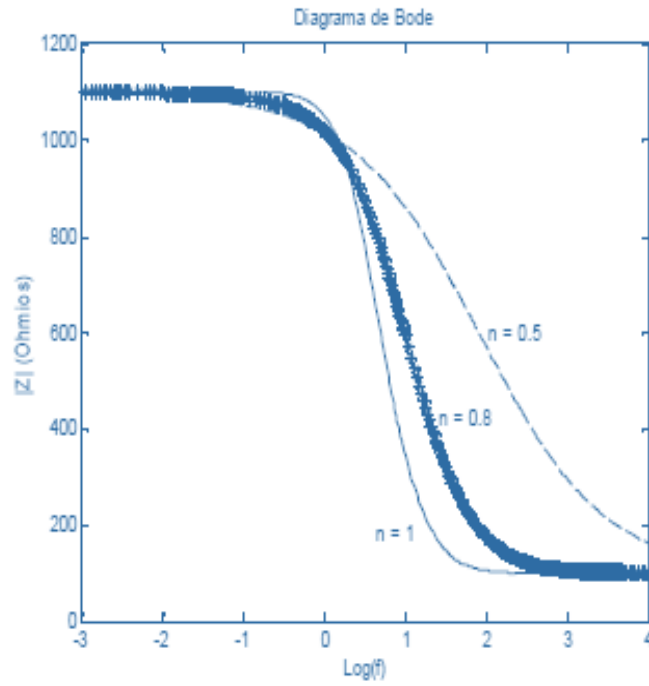


Figura 1.4 Diagrama de Bode (módulo de la impedancia contra frecuencia) en un circuito simple ^[41].

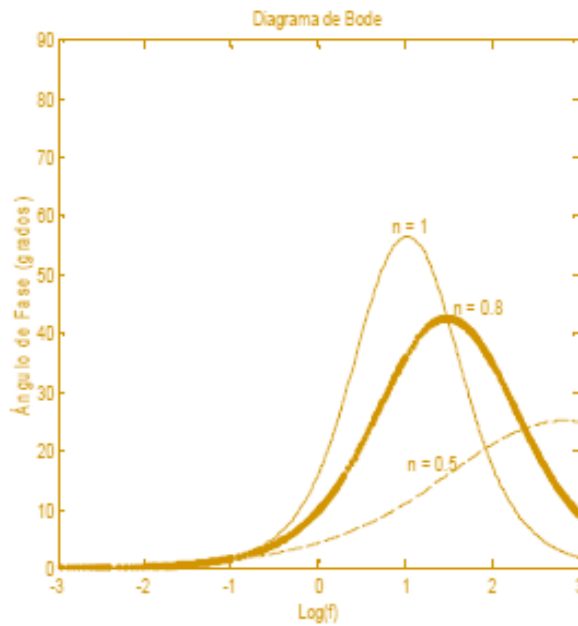


Figura 1.5 Diagrama de Bode (Ángulo de fase contra frecuencia) en un circuito simple ^[41].

1.9.3 Extrapolación de Tafel

Esta técnica consiste en polarizar un sistema, lo que quiere decir, sacarlo de un estado de reposo o equilibrio de forma controlada. La manera de realizar este proceso es aplicar un sobrepotencial a partir de un potencial de reposo (E_{corr}), la técnica se aplica en un intervalo de -250 mV a 250 mV. Ya que los rangos de sobrepotencial (η) pueden ser en sentido catódico o sentido anódico y son generalmente altos para la aplicación de la técnica (extrapolación de Tafel), donde el sistema se modifica, se dice que es una prueba destructiva, cuando menos en términos de corrosión (oxidación) para el sentido anódico y es por lo mismo que el barrido al sentido anódico es posterior al catódico, en la figura 1.6 se muestra el diagrama.

Con los datos de potencial y su respuesta en corriente se grafica potencial E (mV) vs $\log i$ [$=$] (mA/cm^2). Es necesario el valor en $\log[i]$ ya que así se evidencia la relación lineal entre este y el sobrepotencial, especialmente cuando el sobrepotencial (η) tiene un valor grande. A partir del gráfico obtenido (diagrama de Evans) es importante tener presentes datos como la pendiente de la curva anódica (b_a) y la pendiente de la curva catódica (b_c) para cada especie o semirreacción, así como, la de corriente de intercambio (i_0). Es posible aplicar una serie de ecuaciones para poder deducir i_{corr} claro está que aplicando el método de “Extrapolación de Tafel” (método gráfico) se simplifican las cosas.

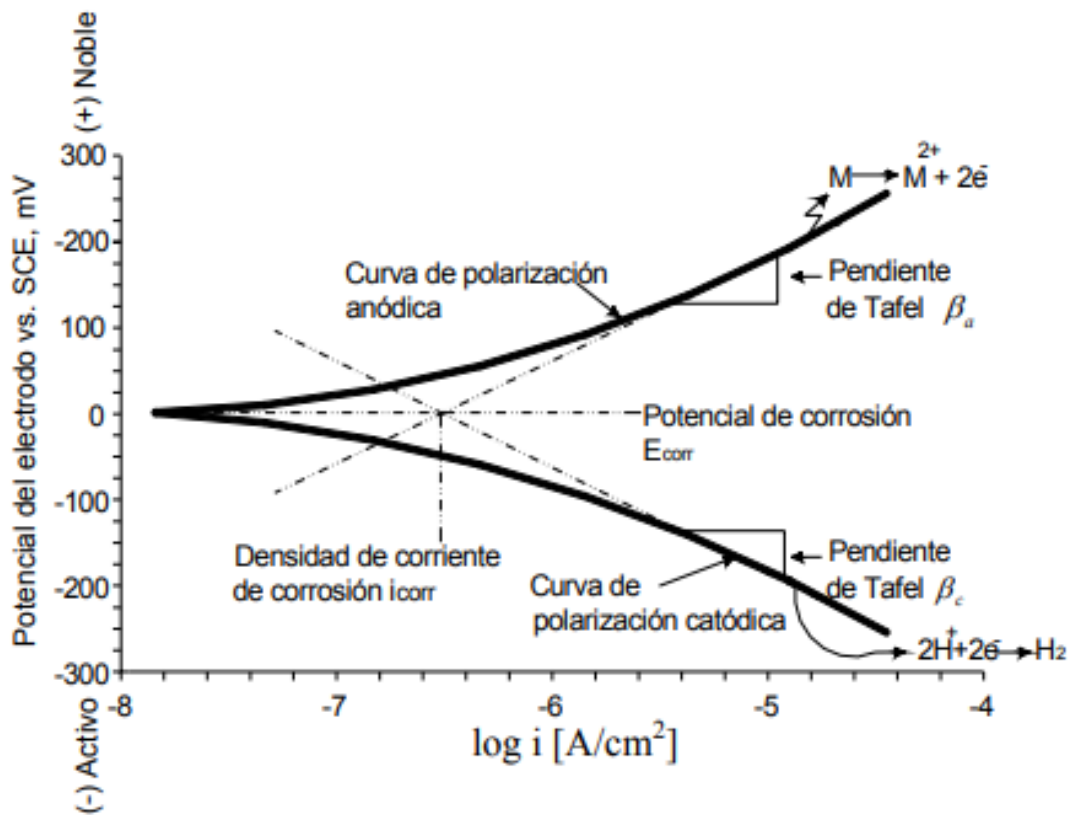


Figura 1.6 Diagrama de Tafel [42].

1.10 Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción son relaciones matemáticas que indican cómo las moléculas adsorbidas se distribuyen entre la fase líquida y la sólida cuando un proceso alcanza un estado de equilibrio^[29]. Según sus características la adsorción puede clasificarse en dos tipos:

- Adsorción física (fisisorción): Ocurre cuando una molécula es adsorbida sobre una superficie metálica por fuerzas de Van der Waals.
- Adsorción química (quimisorción): Ocurre cuando una molécula adsorbida forma nuevos enlaces químicos sobre la superficie metálica.

Muchos modelos describen la adsorción, sin embargo, los modelos más utilizados para comprender el fenómeno son la Isoterma de Langmuir y la Freundlich.

1.10.1 Isoterma de Langmuir

La isoterma de adsorción de Langmuir se utiliza para describir el equilibrio entre la superficie de un adsorbente y la solución como un equilibrio químico entre las especies. La superficie del adsorbente está conformada por sitios activos donde las moléculas de un adsorbato pueden ser químicamente enlazadas^[30]. El modelo de Langmuir propone que cada sitio debe ser capaz de enlazar al menos una molécula de adsorbato formando una monocapa, así como establecer que no hay interacción entre las moléculas adsorbidas.

La isoterma de Langmuir está regida por el grado de cobertura superficial, para que este modelo tenga mayor confiabilidad, la correlación lineal debe tener un valor próximo a uno. En la siguiente ecuación se presenta el grado de cobertura superficial (θ) en función de la concentración de un inhibidor:

$$\theta = \frac{K_{ads}C_{inh}}{1 + K_{ads}C_{inh}} \quad (1.3)$$

Donde: θ = Grado de cobertura de la superficie, K_{ads} = Constante de adsorción de equilibrio, C_{inh} = Concentración del inhibidor

Al linealizar la ecuación anterior se obtiene:

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C_{in} \quad (1.4)$$

Al graficar C_{inh}/θ contra C_{inh} se puede obtener la K_{ads} . Con la siguiente ecuación se determina el mecanismo de adsorción controlante a partir del ΔG_{ads}° :

$$\Delta G_{ads}^{\circ} = -RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (1.5)$$

Donde: ΔG_{ads}° : Energía libre de Gibbs de adsorción ($KJmol^{-1}$), R : Constante universal de los gases ($JK^{-1}mol^{-1}$), T : Temperatura (K)

Gracias al resultado obtenido podemos determinar el mecanismo de adsorción en el proceso; si el valor del ΔG_{ads}° es mayor a -20 ocurre fisisorción, si el ΔG_{ads}° es menor a -40 ocurre quimisorción y si el ΔG_{ads}° se encuentra en un rango entre -40 a -20 KJ/mol el proceso es combinado.

CAPÍTULO 2

2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Preparación de soluciones

Inicialmente se llevó a cabo la preparación de soluciones de cloruro de sodio al 3% saturadas con CO₂ para simular el medio dulce. Se caracterizó al metal a través de un análisis metalográfico con un microscopio óptico. Las pruebas se llevaron a cabo bajo condiciones estáticas (figura 2.1) y dinámicas (figura 2.2), en condiciones dinámicas se hizo rotar el electrodo a 100 y 500 RPM. Las concentraciones de inhibidor empleadas fueron 0, 5, 10, 20 y 50 ppm. Todos los ensayos se realizaron por triplicado.

2.2 Condiciones de flujo

Debido a que se llevaron a cabo diversas pruebas en condiciones dinámicas (100 y 500 RPM) se realizó el cálculo del régimen de flujo a través de la información que el fabricante proporciona sobre el electrodo del cilindro rotatorio (modelo *12 mm OD* marca *PINE research*).

Por tanto, de acuerdo a dichos datos se determinó que a 100 RPM el número de Reynolds corresponde a 844 dando un flujo laminar. Por otro lado, a 500 RPM Reynolds calculado es de 4219 dando un régimen turbulento, la ecuación 2.1 muestra como determinar el número de Reynolds. Haciendo un comparativo con la norma NRF-005-PEMEX 2009, bajo las condiciones de flujo calculadas se tiene un equivalente a 1775 Barriles/día a 100 RPM y 8785 Barriles/día a 500 RPM, se puede observar en la tabla 3.1 la equivalencia de barriles día para un electrodo rotatorio.

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} \quad (2.1)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido

D : diámetro interno de la tubería

μ : viscosidad dinámica del fluido

v : velocidad del fluido

Tabla 2.1 Equivalencias en RPM de un flujo para un ducto

Flujo en ducto			r/min equivalentes para electrodo rotatorio
Barriles/día	L/min	cm/s	
176	19	1	9
1757	194	10	94
5271	582	30	293
7028	776	40	394
8785	970	50	507

2.3 Pruebas electroquímicas

La secuencia de pruebas fue la siguiente: medición de potencial a circuito abierto (OCP), impedancia electroquímica (EIS) y finalmente curvas de polarización cíclicas (CPC).

- A) La medición del potencial a circuito abierto se realizó contra un electrodo de plata/cloruro de plata en un equipo Gill AC durante 30 minutos.
- B) En la prueba de impedancia electroquímica la amplitud de la señal fue de 10 mV y el intervalo de frecuencias de 10kHz a 10mHz, empleando un potenciostato Gill AC. Se usó un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata y un contraelectrodo de grafito.
- C) Las curvas de polarización se realizaron con sobrepotenciales que fueron desde los -500mV hasta los 500mV con el mismo arreglo ya descrito.



Figura 2.1 Sistema de trabajo para realizar pruebas estáticas

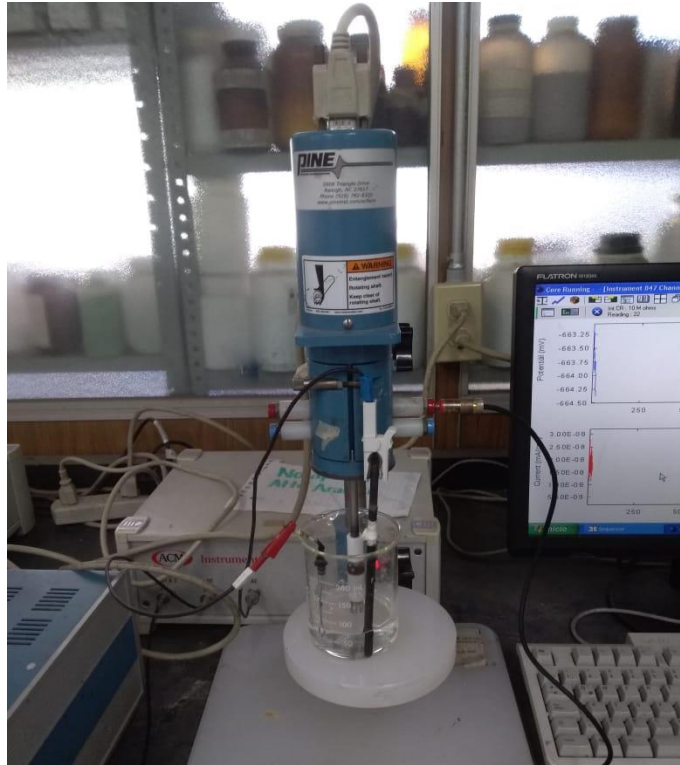


Figura 2.2 Sistema de trabajo para realizar pruebas rotatorias

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos para evaluar la eficiencia de la citrinina como inhibidor de corrosión a través de las diversas pruebas realizadas (OCP, EIS y CP) así como un análisis termodinámico mediante la isoterma de Langmuir. Primeramente se realizó dicho análisis mediante condiciones estáticas y posteriormente se pasó a las dinámicas.

3.1 Análisis metalográfico

El primer análisis realizado a la pieza de estudio fue una metalografía para determinar el acero que se tiene a partir de su microestructura. Como se observa en la figura 3.1 y 3.2 se trata de un acero de bajo carbono, ya que, hay presencia de ferrita y perlita, lo cual hace referencia a un acero hipoeutectoide.

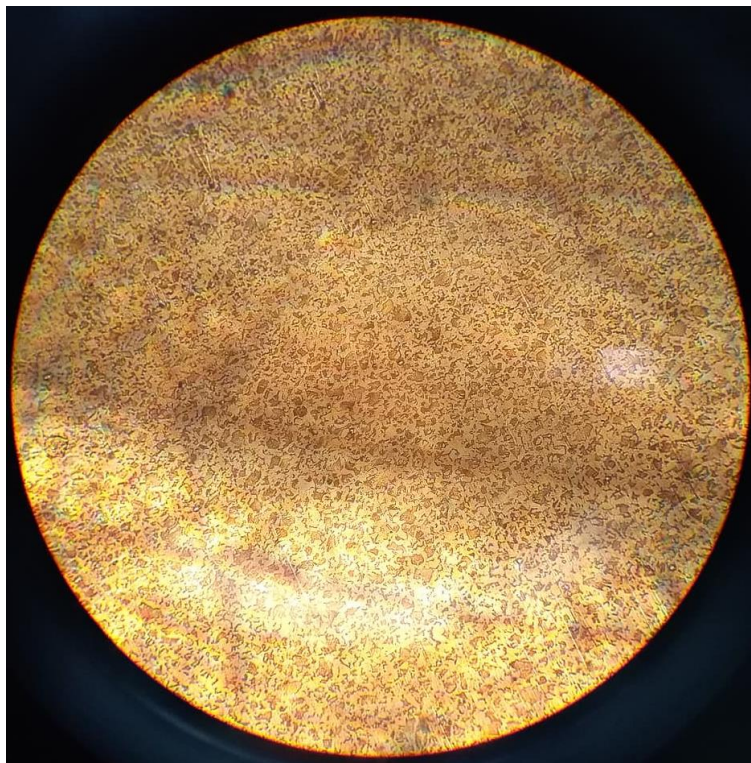


Figura 3.1 Metalografía realizada a 20 aumentos atacada con Nital 2 por 5 segundos.



Figura 3.2 Metalografía realizada a 400 aumentos atacada con Nital 2 por 5 segundos.

3.2 Potencial a circuito abierto

Se comenzó con la prueba de potencial a circuito abierto (OCP) para ambas condiciones. Como se observa en la figura 3.3, en condiciones estáticas se valida que el potencial se estabiliza después de 1800 segundos debido a que no hay perturbaciones en el sistema que provoquen un cambio en los valores del potencial. Por otro lado, en condiciones dinámicas ocurre el mismo comportamiento en el mismo lapso, esto se observa en las figuras 3.4 y 3.5 respectivamente.

Se observa que a 100 RPM con una concentración de inhibidor de 20 ppm, ocurre una perturbación en el sistema durante los primeros 100 segundos. Otra observación relevante es que a esta velocidad de rotación, el potencial no se logró estabilizar, sin embargo, se realizaron las demás pruebas con esto en consideración.

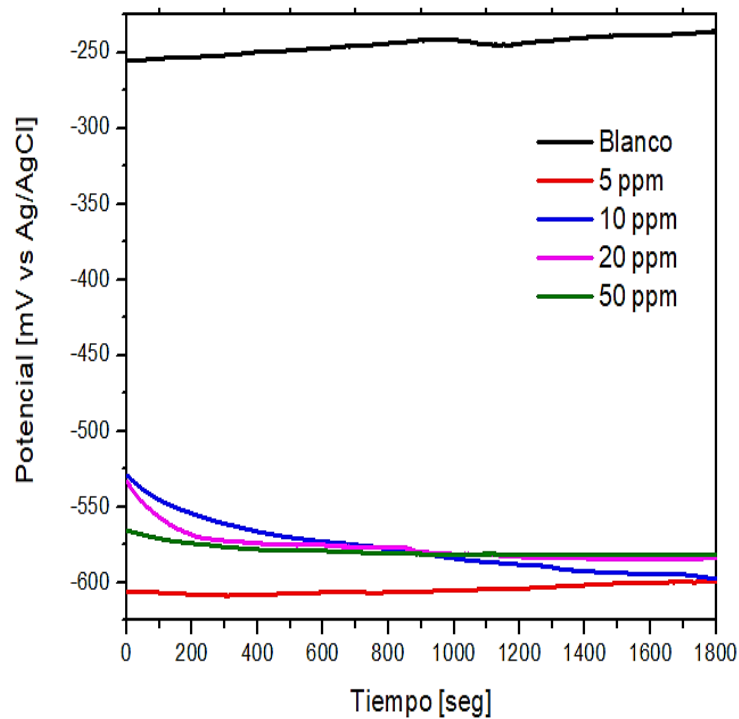


Figura 3.3 Potencial contra tiempo (OCP) en condiciones estáticas

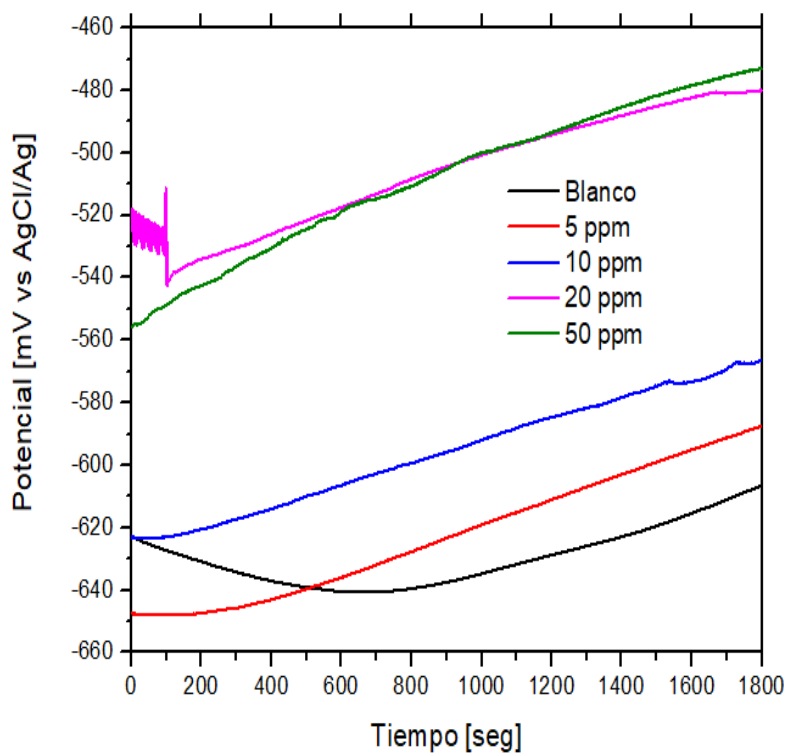


Figura 3.4 Potencial contra tiempo en condiciones hidrodinámicas (100 RPM)

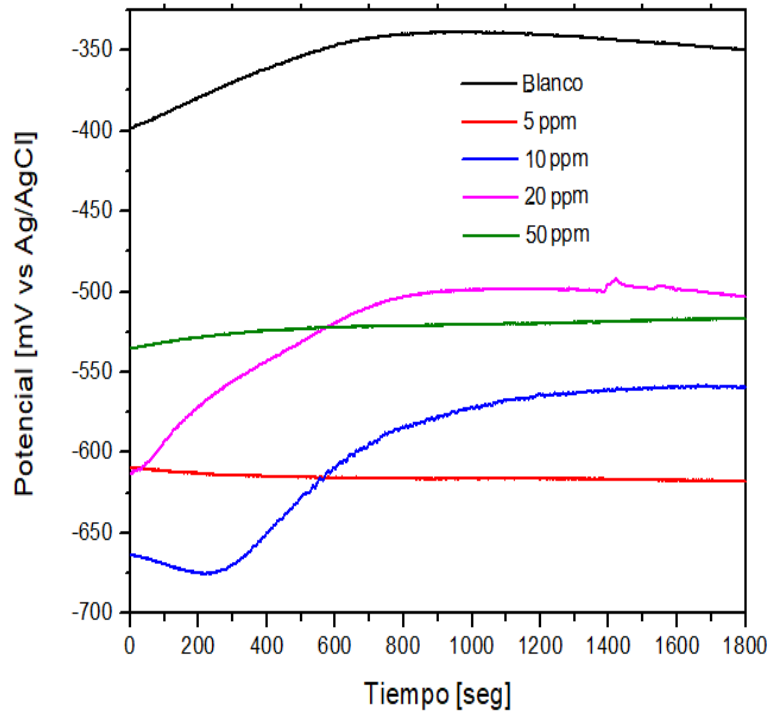


Figura 3.5 Potencial contra tiempo en condiciones hidrodinámicas (500 RPM)

3.3 Curvas de polarización

3.3.1 Análisis de las curvas en condiciones estáticas e hidrodinámicas

Posteriormente, se analizó el comportamiento del inhibidor a diferentes concentraciones mediante curvas de polarización. Como se muestra en la figura 3.6, las concentraciones donde el inhibidor actúa mejor son para 5, 20 y 50 ppm debido a que el potencial de corrosión se está desplazando a valores más positivos lo cual indica que el inhibidor protege correctamente. Por otro lado a 10 ppm la curva se desplaza a valores mas negativos lo que significaría una falta de inhibición, sin embargo, esto no es así ya que al calcular su eficiencia, se obtiene un valor positivo.

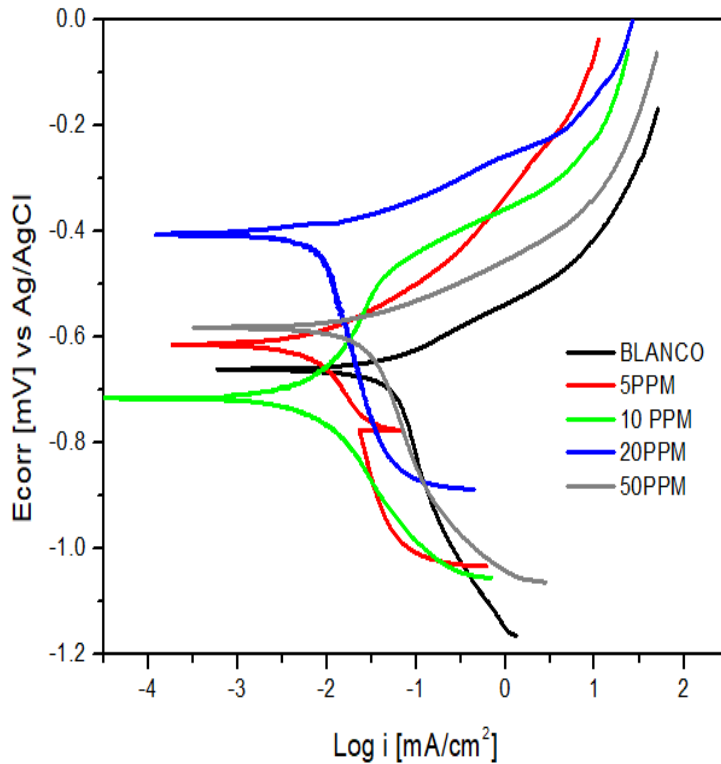


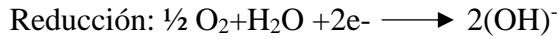
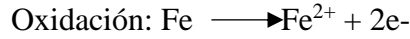
Figura 3.6 Curvas de polarización de la citrinina en el acero API 5L X52 inmerso en NaCl + CO₂ en condiciones estáticas

3.3.2 Obtención de eficiencias para condiciones estáticas y hidrodinámicas

Mediante un análisis a partir de curvas de polarización, se obtuvieron las eficiencias del inhibidor mostrados en la tabla 3.2 y se empleó la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{i_{corr} [con\ inhibidor]}{i_{corr} [sin\ inhibidor]} \right) * 100 \quad (3.1)$$

Bajo condiciones estáticas las concentraciones donde se presentan mayores eficiencias calculadas son 5,10 y 20 ppm. Dichos valores son bastante aceptables, sin embargo, bajo estas condiciones la citrinina no lograría ser aceptado según las especificaciones de la norma de PEMEX^[15], también se puede observar en la tabla 3.2 que los valores de las pendientes de Tafel (Ba, Bc) indican la zona más lineal de la parte catódica y anódica después de medir 120mV a partir del potencial de corrosión. Al agregar la citrinina ocurre un aumento en las pendientes lo que cual indica que el inhibidor se comporta de tipo anódico. En este caso el control de este proceso es de tipo activacional ya que las reacciones electrónicas están controladas por la transferencia de carga en la interfase electrodo/electrolito^[36]. Las semirreacciones de oxidación y reducción están descritas a continuación.



Por otro lado, bajo condiciones dinámicas las eficiencias obtenidas fueron negativas lo que nos indica que el inhibidor no logra adsorberse correctamente en la superficie del metal y por lo tanto no logra proteger de la corrosión. La única concentración donde la citrinina actúa de manera correcta fue a 20 ppm, sin embargo, el valor es demasiado bajo comparado con las eficiencias en condiciones estáticas.

Tabla 3.2 Eficiencias calculadas en las CP en condiciones estáticas

Concentración [ppm]	E _{corr} [mV]	B _a [mV/dec]	-B _c [mV/dec]	i _{corr} [mA/cm ²]	Eficiencia (%)
0	-657.1	92.6	504.8	49.5	-
5	-614.6	98.2	244.8	6.8	86.1
10	-712.9	303.8	253.1	7.7	84.3
20	-405.3	59.8	537.6	7.8	84.1
50	-581.5	80.9	465.3	27.9	43.6

3.4 Efecto de la concentración de inhibidor mediante la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica

Para analizar un diagrama de Nyquist es necesario recurrir a los denominados circuitos eléctricos, estos se forman a partir de elementos eléctricos tales como resistencias, inductores o capacitancias, los cuales se ajustan a los datos obtenidos. A continuación, se muestra un arreglo para un metal en: un medio corrosivo y b) con algún tipo de recubrimiento o película (Figura 3.7).

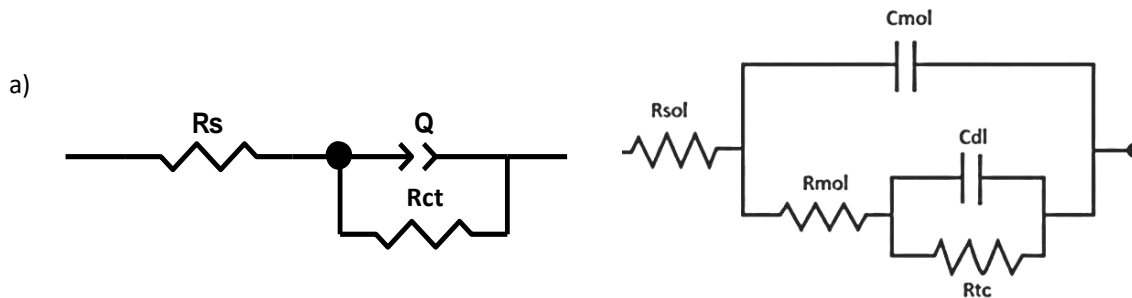


Figura 3.7 Circuito para un metal con algún tipo de recubrimiento o película.

Donde: R_{sol} : Resistencia de la solución, R_{tc} : Resistencia a la transferencia de carga, R_{mol} : Resistencia de la película, C_{mol} : Capacitancia de la película de moléculas adsorbidas y C_{dl} : Capacitancia de la doble capa electroquímica

A continuación, a partir de la ecuación 3.2 se muestra cómo se calculó el valor de la capacitancia de la doble capa electroquímica (C_{dl}). El mismo cálculo se utilizó para condiciones estáticas e hidrodinámicas.

$$C_{dl} = (Q * W_{max})^{n-1} \quad (3.2)$$

Donde:

C_{dl} : Capacitancia de la doble capa electroquímica, W_{max} : Frecuencia máxima, n : es el exponente del elemento de fase constante

Sin embargo, dependiendo de n , el elemento de fase constante puede representar una resistencia cuando $n = 0$, una capacitancia si $n = 1$, una impedancia de warburg cuando $n = 0.5$ y una inductancia si $n = 1$.

El cálculo de las eficiencias del inhibidor a partir de los resultados obtenidos, se hizo a partir de la resistencia total de cada prueba mediante la ecuación 3.3.

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{1}{R_{blanco}}\right) - \left(\frac{1}{R_{tot}}\right)}{\left(\frac{1}{R_{blanco}}\right)} * 100 \quad (3.3)$$

Donde:

ε : eficiencia de inhibición, R_{blanco} : Resistencia total del blanco, R_{tot} : Resistencia total con inhibidor.

3.4.1 Efecto de la concentración de la citrinina en condiciones estáticas

El diagrama de Nyquist de la citrinina como inhibidor de corrosión en el medio corrosivo de estudio y en condiciones estaticas se muestra en la figura 3.8. Se puede notar que sólo hay una constante de tiempo [37] que corresponde a la resistencia a la transferencia de carga, así mismo se observa que la concentración donde ocurre una mejor respuesta de inhibición corresponde a 50 ppm, ya que, el diámetro del semicírculo es mayor.

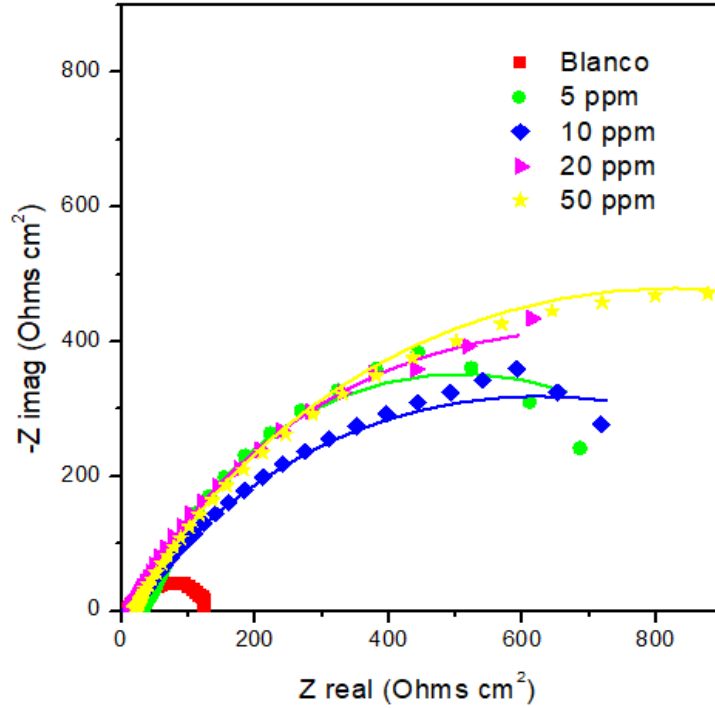


Figura 3.8 Diagrama de Nyquist de la citrinina en el acero API 5L X52 inmerso en NaCl + CO₂ en condiciones estáticas

Los diagramas de Bode módulo y ángulo de fase se muestran a continuación para obtener otra interpretación del mecanismo que está ocurriendo. En la figura 3.9 se observa que al incrementar la concentración aumenta el log |Z|, siendo la co 50 ppm, lo que se atribuye a que hay una película protectora en la superficie del metal.

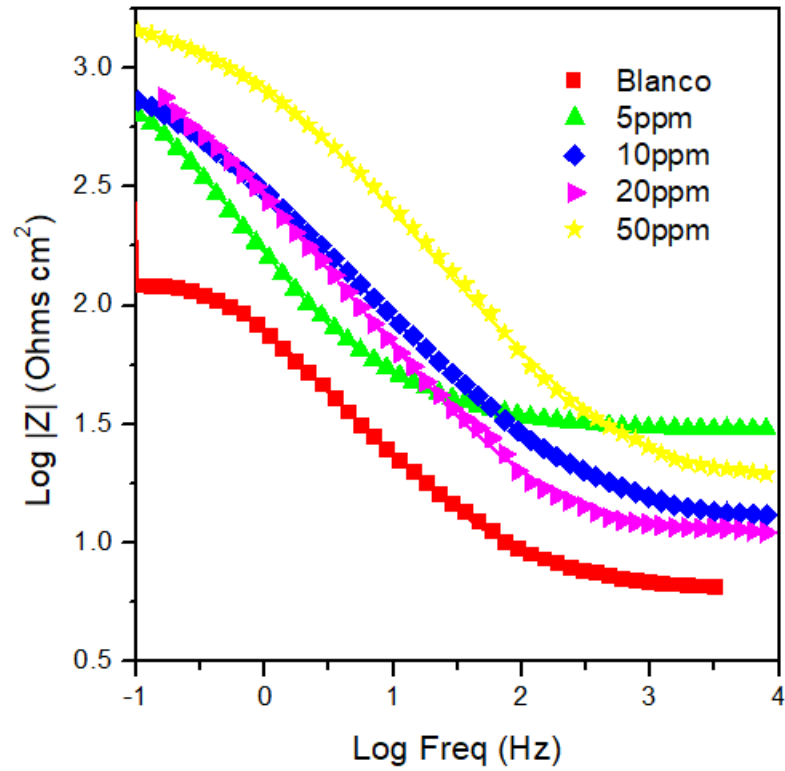


Figura 3.9 Diagrama de Bode módulo de la citrinina en el acero API 5L X52 inmerso en NaCl + CO₂ en condiciones estáticas

En la figura 3.10 se observa el diagrama de Bode del ángulo de fase vs log Freq en el cual también indica que sólo hay una constante tiempo a frecuencias intermedias que corresponde a la resistencia a la transferencia de carga.

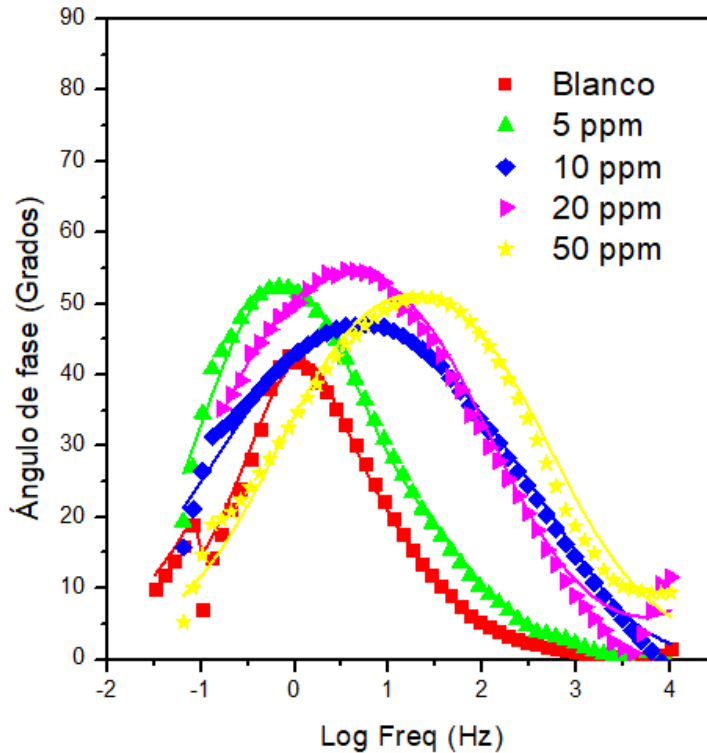


Figura 3.10 Diagrama de Bode ángulo de fase de la citrinina en el acero API 5L X52 inmerso en NaCl + CO₂ en condiciones estáticas

Como se observa en la tabla 3.4, las concentraciones donde se presentan las mayores eficiencias fueron 20 y 50 ppm. Al analizar dichos valores se determinó que sí cumplen con las especificaciones de la norma de PEMEX^[38] para que el inhibidor sea aceptado.

De igual manera, en la tabla 3.4 se muestran los diversos parámetros electroquímicos calculados a partir de los circuitos eléctricos equivalente empleados, se observa que la resistencia a la transferencia de carga (R_{tc}) aumenta en función de la concentración y a su vez la capacitancia de la doble capa disminuye (C_{dl}), lo que indica que el inhibidor se está adsorbiendo a la superficie metálica ^[32] ^[33]. Por otro lado, el parámetro n proporciona información sobre la rugosidad en la interfaz metálica, valores bajos de este número se relacionan a superficies más rugosas. Se observa que el valor de n incrementa en 5 ppm, lo que atribuye a una reducción en la rugosidad debido a la adsorción de moléculas de citrinina que bloquean sitios activos en la interfaz metálica sin embargo, después de dicha concentración se denota un decremento ^[28].

Tabla 3.4 Parametros electroquímicos de la citrinina como inhibidor de corrosión en condiciones estáticas.

Concentración [ppm]	R_s (Ω cm^2)	n	C_{dl} ($\mu F/cm^2$)	R_{tc} (Ω cm^2)	R_{mol} (Ω cm^2)	R_{tot} (Ω cm^2)	W_{max}	ε (%)
0	6.341	0.68	1694.4	132.9	-	132.9	1.37	-
5	29.24	0.87	1002.1	899.5	43.8	943.3	0.13	85.2
10	13.40	0.80	1408.6	1196.0	-	1196.0	0.13	88.8
20	10.89	0.69	560.0	1376.0	-	1376.0	4.41	90.3
50	18.17	0.68	259.8	1615.0	-	1615.0	0.677	91.7

3.4.2 Efecto de la concentración de la citrinina a 100 RPM mediante EIS

Bajo condiciones hidrodinámicas se realizaron los mismos análisis. El diagrama de Nyquist de la figura 3.11, muestra dos constantes de tiempo relacionada a la resistencia a la transferencia de carga y otra a la película del inhibidor^[39]. En este caso se observa que a 20 ppm el diámetro del semicírculo es mayor, lo cual se ve reflejado en el valor de su eficiencia de 73.18% mostrada en la tabla 3.5. Cabe resaltar, que bajo este régimen de rotación la citrinina no cubre con los parámetros para ser aceptada por PEMEX como inhibidor.

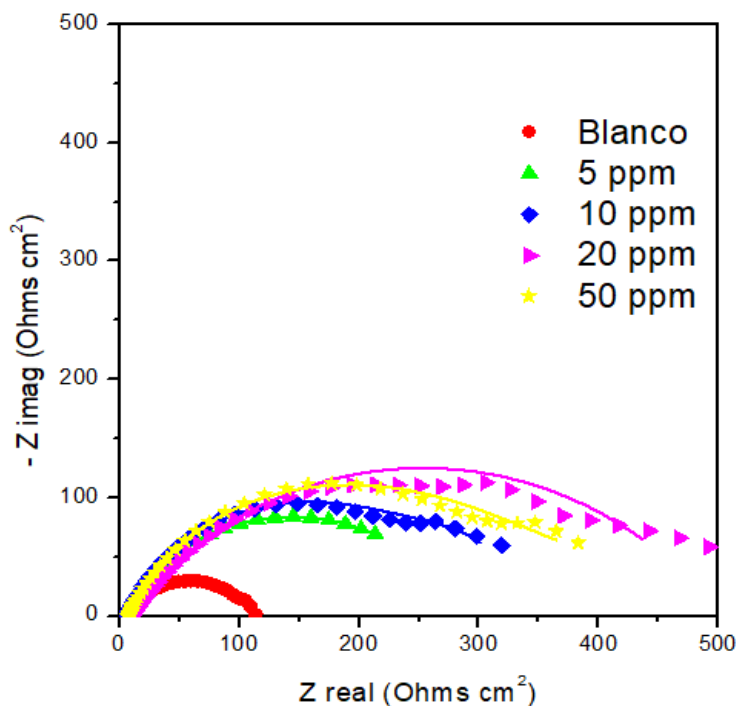


Figura 3.11 Diagrama de Nyquist de la citrinina en el acero API 5L X52 inmerso en NaCl + CO₂ en condiciones dinámicas (100 RPM)

Sin embargo, en el diagrama de Bode-módulo (figura 3.12) se observa un aumento continuo en el $\log |Z|$ a medida que se incrementa la concentración del inhibidor formando una película protectora sobre la superficie del metal. En el caso del diagrama de Bode ángulo de fase (figura 3.13) se observaron curvas anchas, lo que se puede atribuir a que hay dos constantes de tiempo en frecuencias intermedias y una pequeña en frecuencias bajas, que están acopladas y que corresponde a la resistencia a la transferencia de carga y otra a las moléculas del inhibidor.

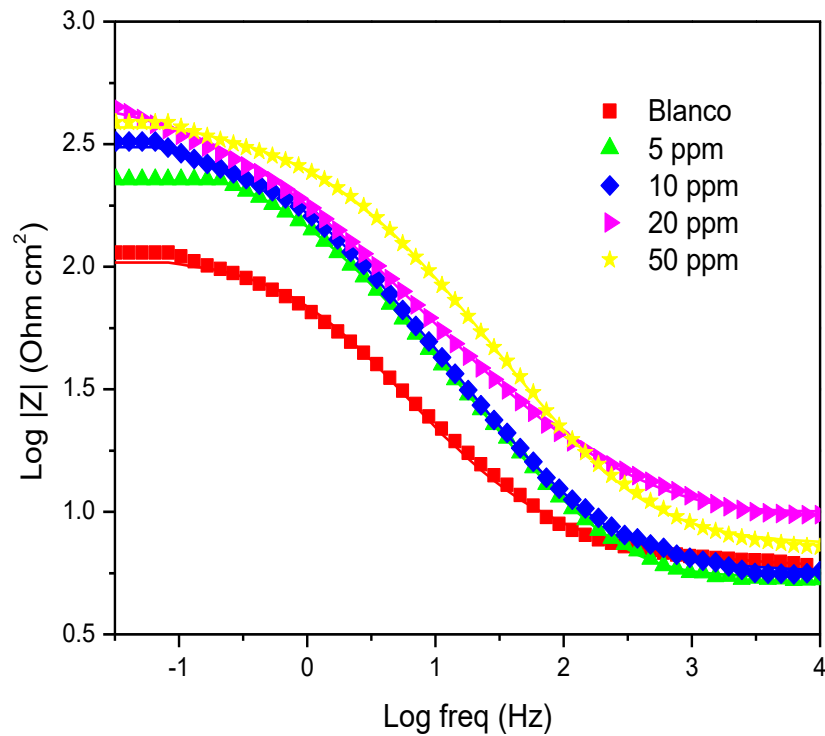


Figura 3.12 Diagrama de Bode módulo de la citrinina en el acero API 5L X52 inmerso en NaCl + CO₂ en condiciones hidrodinámicas (100 RPM)

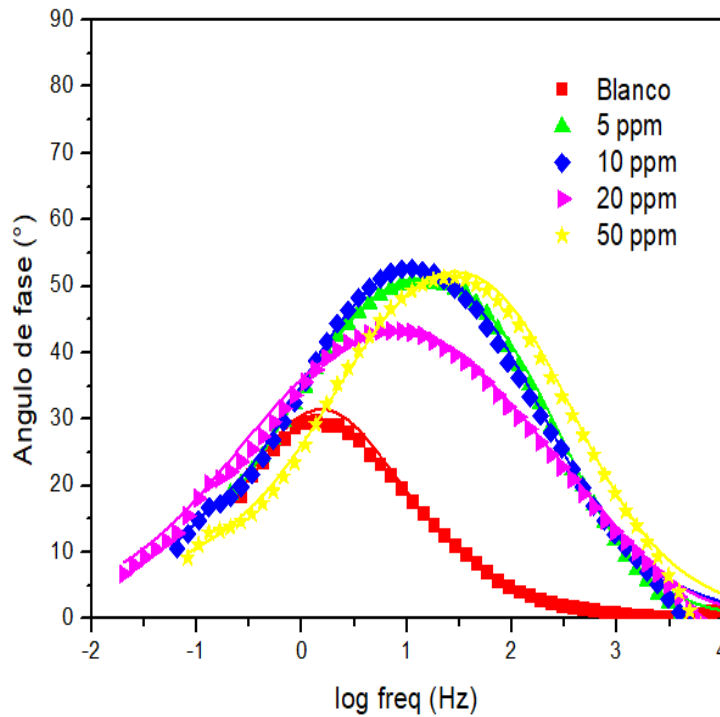


Figura 3.13 Diagrama de Bode ángulo de fase de la citrinina en el acero API 5L X52 inmerso en NaCl + CO₂ en condiciones dinámicas (100 RPM)

Los parámetros electroquímicos obtenidos a 100 RPM se enlistan en la tabla 3.5. Se muestra una disminución en los valores de la capacitancia de la doble capa electroquímica (C_{dl}), atribuyéndose al aumento en el espesor de la película protectora^[33]. Por otro lado, se observa que el valor de n se mantiene en 0.72 y posteriormente se incrementa un poco a 50 ppm, se puede atribuir a una reducción en la rugosidad debido a la adsorción de moléculas de citrinina que bloquean sitios activos en la interfaz metálica^[29].

Tabla 3.5 Eficiencias calculadas en la prueba de impedancia bajo condiciones dinámicas (100 RPM)

Concentración [ppm]	R_s (Ω cm ²)	n	C_{dl} (μ F/cm ²)	R_{tc} (Ω cm ²)	R_{mol} (Ω cm ²)	R_{tot} (Ω cm ²)	W_{max}	ϵ (%)
0	6.017	0.68	1711.8	105.6	-	105.60	1.73	-
5	5.13	0.72	1119.6	258.20	-	258.20	1.08	59.10
10	5.60	0.72	217.7	316.90	-	316.90	0.09	66.68
20	9.47	0.72	166.8	393.80	82.14	475.94	0.54	73.18
50	7.24	0.74	39.0	319.00	83.50	402.50	2.18	66.90

3.4.3 Efecto de la concentración de la citrinina a 500 RPM mediante EIS

A partir del diagrama de Nyquist de la figura 3.14 se observan dos constantes de tiempo a 10 ppm que corresponden a la resistencia a la transferencia de carga y a la resistencia de las moléculas orgánicas adsorbidas ^[31]. Por otro lado, a 20 ppm se alcanzó el valor máximo de $Z_{real} \sim 300 \Omega \text{ cm}^2$, siendo esta la mejor concentración para proteger la superficie metálica para estas condiciones de flujo.

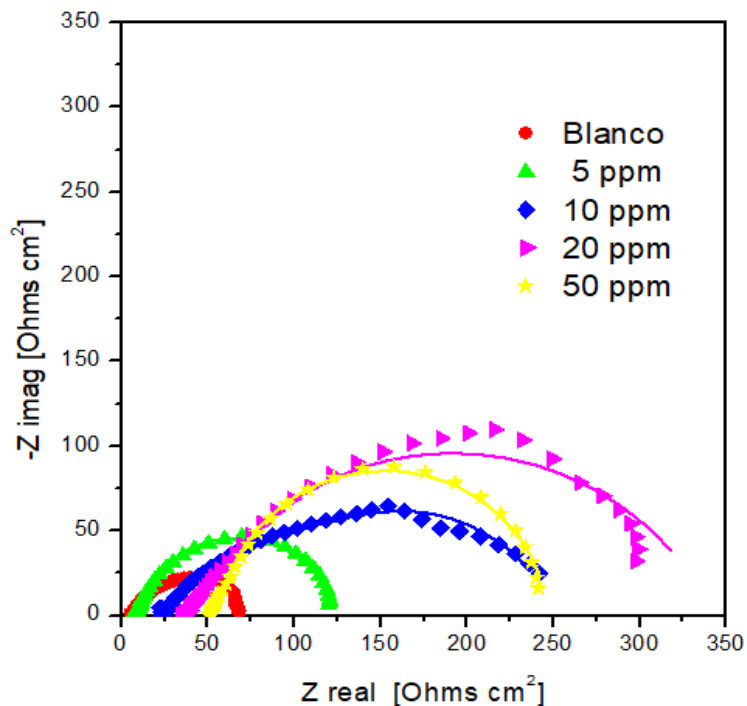


Figura 3.14 Diagrama de Nyquist de la citrinina en el acero API 5L X52 inmerso en NaCl + CO₂ en condiciones hidrodinámicas (500 RPM)

Finalmente, en la figura 3.15 se observa un ligero incremento en el valor del logaritmo de $|Z|$ hasta 20 ppm siendo esta la mejor concentración, ya que, la velocidad de rotación propicia un proceso de adsorción-desorción más rápido del inhibidor en la superficie del metal. Por otro lado, el diagrama de Bode-ángulo de fase (figura 3.16) muestra dos constantes de tiempo tal como se vió en el diagrama de Nyquist (resistencia a la transferencia de carga y a la resistencia de las moléculas orgánicas adsorbidas). Para esta velocidad de rotación se obtuvieron valores de eficiencia de inhibición muy similares al régimen de 100 RPM, la concentración con valores más altos fue 20 ppm, sin embargo, dicho dato sigue sin ser aceptable bajo la norma de PEMEX, por tanto a esta velocidad de rotación no se propicia a proteger el metal debido a la dinámica del flujo.

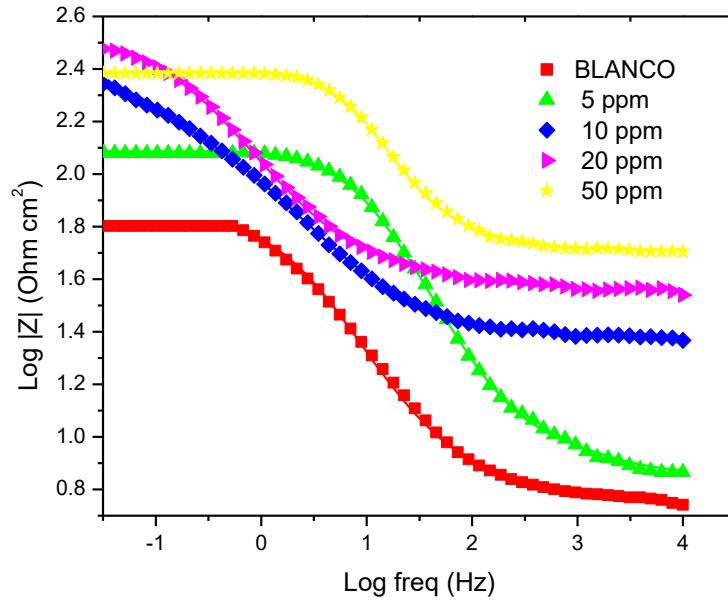


Figura 3.15 Diagrama Diagrama de Bode módulo de la citrinina en el acero API 5L X52 inmerso en NaCl + CO₂ en condiciones dinámicas (500 RPM)

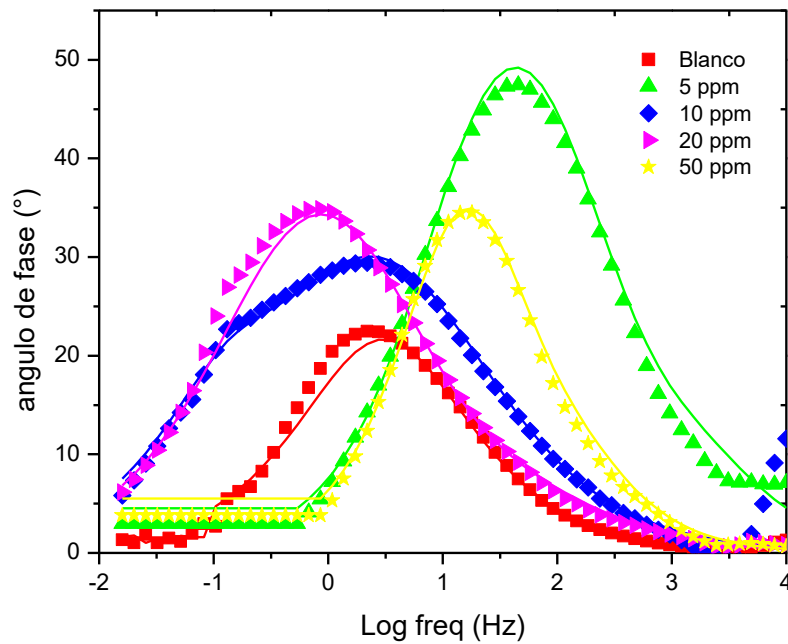


Figura 3.16 Diagrama de Bode ángulo de fase de la citrinina en el acero API 5L X52 inmerso en NaCl + CO₂ en condiciones hidrodinámicas (500 RPM)

En la tabla 3.6 se resumen los parámetros electroquímicos para el flujo turbulento de la citrinina a 500 RPM. Se observa un aumento en el valor de la resistencia a la transferencia de carga y una reducción en la capacitancia de la doble capa electroquímica, lo cual infiere que está ocurriendo la formación de una película protectora en la superficie metálica ^[40]. Por otro lado

se observa que n no muestra una tendencia determinada, podría atribuirse a la rugosidad y la falta de homogeneidad en la superficie, ya que, a estas condiciones de flujo es fácil que la película protectora se desprenda y se generen irregularidades [28] [29].

Tabla 3.6. Eficiencias calculadas en la prueba de impedancia bajo condiciones hidrodinámicas (500 RPM)

Concentración [ppm]	R_s ($\Omega \text{ cm}^2$)	n	C_{dl} ($\mu\text{F}/\text{cm}^2$)	R_{tc} ($\Omega \text{ cm}^2$)	R_{tot} ($\Omega \text{ cm}^2$)	ε (%)
0	5.7	0.7	1501.0	67.2	72.9	-
5	7.7	0.8	837.7	120.8	128.5	44.3
10	23.4	0.6	768.6	241.6	265.0	72.1
20	37.0	0.7	482.9	319.0	356.0	78.9
50	52.0	0.8	114.7	202.4	254.4	66.8

3.5 Análisis termodinámico

Finalmente, se realizó un análisis termodinámico en condiciones estáticas e hidrodinámicas para saber el tipo de proceso que está involucrado utilizando el modelo de Langmuir. Dicha isoterma establece que hay una monocapa en la superficie metálica y permite determinar el proceso de adsorción que sigue la molécula orgánica. A partir de la ordenada al origen se obtiene una K_{ads} , por lo que se puede determinar el ΔG°_{ads} .

Los gráficos correspondientes de las figuras 3.17 a 3.19 utilizando el modelo de Langmuir (ecuación 1.3) mostraron un buen ajuste (línea roja), lo cual describe que en este caso la citrinina tiene sitios activos (heteroátomos de oxígeno) con los pares de electrones libres que hacen que se pueda adsorber en la superficie metálica.

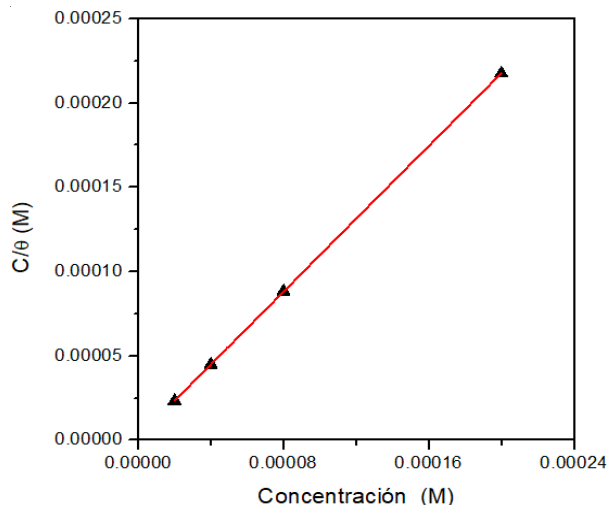


Figura 3.17 Isoterma de Langmuir de la citrinina en condiciones estáticas

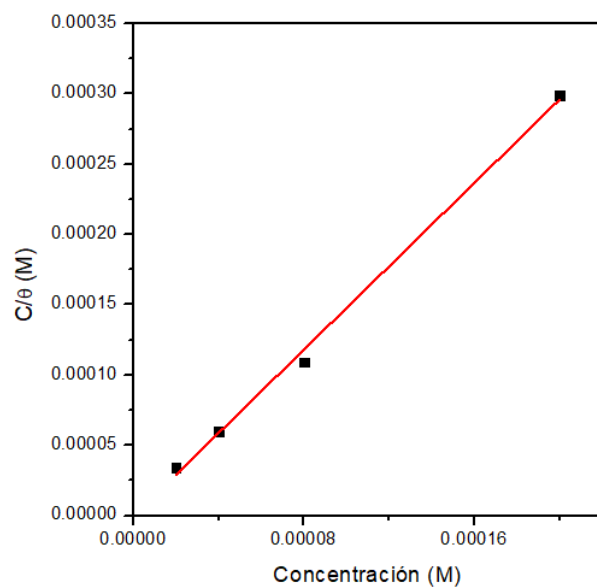


Figura 3.18 Isotherma de Langmuir de la citrinina en hidrodinámicas (100 RPM)

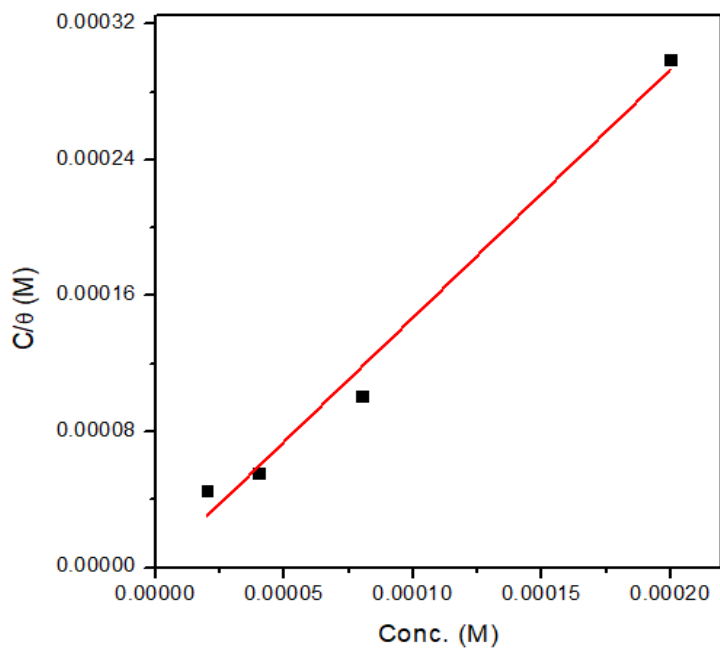


Figura 3.19 Isotherma de Langmuir de la citrinina en hidrodinámicas (500 RPM)

De acuerdo al valor del $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ (-38.92 KJ/mol) mostrado en la tabla 3.7, se corrobora que bajo condiciones estáticas (figura 3.17) el proceso es combinado (físico-químico) debido a que el ΔG_{ads} se encuentra entre -20 y -40 KJ/mol.

Para condiciones hidrodinámicas (figura 3.18), se observa que a 100 RPM, el proceso de adsorción que sigue la molécula orgánica es por quimisorción, ya que, su $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ es de -41.65 KJ/mol como se muestra en la tabla 3.7. Por otro lado, en un régimen de 500 RPM (figura 3.19) el proceso de adsorción también es por quimisorción, ya que, se presenta un $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ de -40.49 KJ/mol ^[41].

Tabla 3.7 Datos experimentales para obtener $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ bajo las diversas condiciones de estudio

Condiciones	Ln K _{ads}	$\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ (KJ/mol)	Factor de correlación (R ²)
0 RPM	17.13	-38.92	1
100 RPM	18.34	-41.65	0.9975
500 RPM	17.83	-40.49	0.9870

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que:

La citrinina como inhibidor presentó la mejor protección contra la corrosión en 50 ppm con una $EI=91.77\%$ y en condiciones estáticas, atribuyéndose a que la molécula tiene diferentes sitios activos por el cual se puede adsorber en la superficie metálica.

Por otro lado, el análisis termodinámico de la citrinina en condiciones estáticas presentó un proceso combinado de acuerdo a la energía de adsorción de Gibbs.

Finalmente, bajo condiciones hidrodinámicas ocurre un proceso de quimisorción con base en la isoterma de Langmuir.

CAPÍTULO 5

5. REFERENCIAS

- [1] Martinez, S., & Štern, I. (1998). Corrosion Metals and alloys-Basic terms and definitions.
- [2] ASTM G15-08, Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing (Withdrawn 2010), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, www.astm.org
- [3] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lqi/coatl_p_m/capitulo2.pdf (consultado el 20 de agosto de 2019)
- [4] Mackay, B., Jackson, J. E., Melot, D., Scheie, J., & Vittonato, J. (2016). La corrosión: La lucha más extensa. Oilfield Review [Internet], 36-51.
- [5] Geethanjali, R., & Subhashini, S. (2015). Investigation of corrosion inhibition efficiency of some synthesized water soluble terpolymers on N-80 steel in HCl, NaCl and simulated oil well water. Portugaliae Electrochimica Acta, 33(2), 85-104.
- [6] <https://lopei.files.wordpress.com/2011/07/corrosion-por-co2-y-h2s-1.pdf> (consultado el 13 de septiembre de 2019)
- [7] Peck, W. D., Bachu, S., Knudsen, D. J., Hauck, T., Crotty, C. M., Gorecki, C. D., ... & Melnik, A. (2013). CO2 storage resource potential of the Cambro-Ordovician Saline System in the western interior of North America. Energy Procedia, 37, 5230-5239.
- [8] <https://usuarios.fceia.unr.edu.ar/Clasificaci%F3n%20de%20aceros.pdf> (consultado el 25 de septiembre de 2019)
- [9] API 5L: Specification for Line Pipe 45th edition, American Petroleum Institute, Northwest Washington, D.C., 2012.
- [10] <https://www.tubos-acero-aleacion.com/linea-de-tuberias-api-5l.html> (consultado el 25 de septiembre 2019)
- [11] ISO 8044:2015 Corrosion of metals and alloys – Basic terms and definitions, ISO, 2015, www.iso.org/obp/ui/.
- [12] Olvera Martínez ME, Mendoza Flores J, Genescá J. Capítulo 6. “Efecto del flujo turbulento sobre el proceso de corrosión por CO₂ y la determinación de la eficiencia de inhibidores de corrosión”. Valdez Salas B, & Shcorr Wiener M (eds.) Corrosión y preservación de la influencia industrial. Barcelona, España: OmniaScience; 2013 pág. 103-129.
- [13] P.R. Roberge, Handbook of Corrosion Engineering Ed. McGraw-Hill, 2000, p.19-833.

- [14] Martínez R. (1998) Influencia de la actividad acuosa sobre la producción de citrulina y deoxinivalenol en trigo (tesis de doctorado). Universidad de Buenos Aires.
- [15] NRF-005-PEMEX-2009 Protección interior de ductos con inhibidores, PEMEX, 2009.
- [16] Duffó, G. S., Farina, S. B., & Rodríguez, F. S. (2019). Corrosion behaviour of non-ferrous metals embedded in mortar. *Construction and Building Materials*, 210, 548-554.
- [17] Hamadi, L., Mansouri, S., Oulmi, K., & Kareche, A. (2018). The use of amino acids as corrosion inhibitors for metals: a review. *Egyptian journal of petroleum*, 27(4), 1157-1165.
- [18] Tommesani, L., Brunoro, G., Frignani, A., Monticelli, C., & Dal Colle, M. (1997). On the protective action of 1, 2, 3-benzotriazole derivative films against copper corrosion. *Corrosion Science*, 39(7), 1221-1237.
- [19] Ferreira, E. S., Giacomelli, C., Giacomelli, F. C., & Spinelli, A. (2004). Evaluation of the inhibitor effect of L-ascorbic acid on the corrosion of mild steel. *Materials Chemistry and Physics*, 83(1), 129-134.
- [20] Lahodny-Šarc, O., & Kaštelan, L. (1981). The influence of pH on the inhibition of corrosion of iron and mild steel by sodium silicate. *Corrosion Science*, 21(4), 265-271.
- [21] Delgado, M. (2011) Evaluación de la corrosión causada por microorganismos de los géneros *Aspergillus* sp. y *Penicilium* sp. En acero 1010 usado en tuberías de agua potable (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma De México.
- [22] Finsgar, M. y Jackson, J. (2014). Application of corrosión inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: A review. *Corrosion Science*, 86, 17-41
- [23] http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf (consultado 18 de agosto de 2021)
- [24] Andrade, G. (2007) Activación y caracterización de materiales nanoestructurados (CNx y CST): Remoción de cadmio. (consultado 18 de agosto de 2021)
- [25] Aldana-González, J., Espinoza-Vázquez, A., Romero-Romo, M, Uruchurtu-Chavarín, J. y Palomar-Pardavé, M. Electrochemical evaluation of cephalothin as corrosión inhibidor for API 5L X52 steel inmersed in an acid médium. *Arabian Journal of Chemistry* in press.
- [26] Díaz-Cárdenas, M.Y, Vallardes-Cisneros, M.G, Lagunas-Rivera, S. y Salinas-Bravo, V.M. Peumus boldus extract as corrosión inhibidor for carbon Steel in 0.5 M sulfuric acid *Green Chemistry Letters and Reviews*, 257 -268.

- [27] Sandoval, F.D., López, J.L. y García, Jesús. (2015). Ecuación de Langmuir en líquidos simples y tensoactivos. *Educación química*, 26(4), 307- 313.
- [28] Stago, S.A.X y Vijayalakshmi, U. (2018). Studies on corrosion inhibitory effect and adsorption behavior of waste material son mild Steel in acidic medium. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 6(1), 20 – 29
- [29] Rivera-Grau, L.M., Casales, M., Regla, I., Ortega-Toledo, D.M., Ascencio-Gutiérrez, J.A., Pocayo-Calderón, J. y Martínez-Gómez, L. (2013). Effect of Organic Corrosion Inhibitors on the Corrosion Performance of 1018 Carbon Steel in 3% NaCl Solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 8(2), 2491 – 250
- [30] Fekry, A.M. y Mohamed, R.R. (2010). Acetyl thiourea chitosan as an eco-friendly inhibitor for mild steel in sulphuric acid medium. *Electrochimica Acta*, 55(6), 1933–1339.
- [31] Nazari, M.H., Shihab, M.S., Cao, L., Havens, E.A. y Shi, X. (2017). A peony-leaves-derived liquid corrosion inhibitor: protecting carbon steel from NaCl. *Green Chemistry Letters ans Reviews*, 10(4), 359 – 379.
- [32] <http://es.worldironsteel.com/news/specifications-for-api-5l-x52-5357951.html> (consultado 02 de octubre de 2021)
- [33] Singh, A., Singh, V.K., Qurashi, M.A. (2010). Effect of fruit extracts of some environmentally benign green corrosion inhibitors on corrosion of mild steel in hydrochloric acid solution. *Journal of Materials and Environmental Science*, 1(3), 162 – 174.
- [34] Nwankwo, H.U., Olasunkanmi, L.O., & Ebenso, E.E. (2017). Experimental, quantum chemical and molecular dynamic simulations studies on the corrosion inhibition of mild steel by some carbazole derivatives. *Scientific Reports*, 7:2036.
- [35] <http://www.vazbros.com/materiales/acero-aisi-sae-1018-cold-rolled/> (consultado 01 de octubre de 2021)
- [36] <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Tafel2.pdf> (consultado 08 de noviembre de 2021)
- [37] Hmamou, D.B., Salghi, R., Zarrouk, A., Messali, M., Zarrok, H., Errami, M., Hammouti, B., Bazzi, Lh. y Chakir A. (2012). Inhibition of steel corrosion in hydrochloric acid solutions by Chamomile extract. *Der Pharma Chemical*, 1496 – 1505.
- [38] Caliskan N., Esvet Akbas. (2011) The inhibition effect of some pyrimidine derivatives on austenitic stainless steel in acidic media. *Mat. Chem. And Phys.* 126, 983-990.
- [39] John S., and Joseph A., (2012) Electro analytical, surface morphological and theoretical studies on the corrosion inhibition behavior of different 1,2,4-triazole precursors on mild steel in 1 M hydrochloric acid. *Mat. Chem. and Phys.*, 133, 1083-1096.

- [40] Chen W., Qun H., Luo, et al. (2011) Inhibition effects of 2,5-dimercapto-1,3,4-thiadiazole on the corrosion of mild steel in sulphuric acid solution. Corros. Sci. 53 3356-3374.
- [41] Olvera Martínez ME, Mendoza Flores J, Genescá J. Espectroscopia de impedancia electroquímica en corrosión, <http://labcorr.net/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF> (consultado 10 de enero 2022)
- [42] <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/917/Capitulo4.pdf> (consultado el 10 de enero de 2022)