



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TESINA

**LÍQUIDOS IÓNICOS COMO INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN AMIGABLES CON EL
MEDIO AMBIENTE DEL ACERO AL CARBONO**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA:

EDGAR ISMAEL REYES CERVERA



Ciudad Universitaria, CD. MX.

AÑO 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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: RODRÍGUEZ GÓMEZ FRANCISCO JAVIER

VOCAL: Profesor: LÓPEZ LEON SERGIO

SECRETARIO: Profesor: ESPINOZA VÁZQUEZ ARACELI

1er. SUPLENTE: Profesor: FLORES ALVAREZ JOSE FERNANDO

2° SUPLENTE: Profesor: MORALES MARTINEZ YOLOXOCHITL MARIA ELENA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, FACULTAD DE QUÍMICA, CONJUNTO D Y E.

ASESOR DEL TEMA: ARACELI ESPINOZA VÁZQUEZ

SUSTENTANTE (S): EDGAR ISMAEL REYES CERVERA

AGRADECIMIENTOS

Primero agradezco a mis profesores que gracias a su esfuerzo y dedicación, logre llegar hasta donde estoy y gracias a su formación podre ser un profesionista.

A la Dra. Araceli Espinosa Vázquez, profesora y asesora de esta tesina, agradezco su disposición y ayuda en la realización de este trabajo.

Mi más sincero agradecimiento a los sinodales que se dieron el tiempo y el espacio para poder revisar, y así ayudarme a perfeccionar el presente trabajo.

Por último quiero agradecer a la Facultad de Química, así como a la Universidad Nacional Autónoma de México por la formación profesional que me ha brindado, con honestidad y ética. Por ti responderé poniendo tu nombre en alto.

DEDICATORIAS

Quiero dedicar este trabajo a mis Padres, ya que sin ellos no hubiera logrado nada, gracias a ellos he logrado superarme y lograr una formación completa e integral.

A mí madre que con gran amor y cariño, siempre estuvo en la mejor disposición de ayudarme, escucharme y cuidar de mí.

A mí padre, ya que sin sus consejos y su guía no hubiera podido ser la persona que soy, por su integridad , comprensión y apoyo incondicional en cada paso que daba.

A mí hermana, de quien siempre obtuve ayuda, comprensión y cariño, por todas esas veces que me ayudaba, me escuchaba estando siempre allí.

A mi familia que siempre estuvo apoyando, siempre pendientes y anhelando la culminación de mis estudios, por su gran cariño y disposición.

A mis amigos, nuevos y viejos que están siempre para apoyar, dispuestos a escucharme a aconsejarme y ayudando a complementar la persona que soy.

Un poco más de persistencia, un poco más de esfuerzo, y lo que parecía irremediablemente un fracaso puede convertirse en un éxito glorioso.

Elbert Hubbard

RESUMEN

El acero es una aleación con un amplio y extendido uso que contiene un porcentaje variable de carbono designado, comúnmente bajo el sistema de clasificación AISI/SAE, este metal es utilizado por su amplia variedad de precios, propiedades y cualidades. Pero este al igual que muchos otros metales sufre de corrosión el cual es uno de los principales problemas en las industrias, que ocasiona altos impactos económicos, de seguridad y conservación. Un ejemplo de ello es el ambiente ácido presente en la industria petroquímica.

Debido al uso extendido de los metales y aleaciones, es de vital importancia encontrar maneras efectivas, amigables con el medio ambiente y económicamente rentables para protegerlos de la corrosión, así como de los ambientes corrosivos a los que están expuestos durante su uso cotidiano, e incluso durante la limpieza, en la cual algunas veces se ocupan solventes ácidos que ayudan a su deterioro y corrosión.

Para determinar la afectación ocasionada en los metales o aleaciones es necesario determinar la velocidad de corrosión, la cual es una medida de afectación, para esta determinación se utilizan técnicas que generalmente se realizan en laboratorio por métodos electroquímicos, los cuales indican la susceptibilidad del metal a la corrosión, así como evaluar la eficiencia del recubrimiento e inhibidores de la corrosión.

Para la protección de metales existen diferentes métodos entre los cuales encontramos: la selección de materiales, la alteración del ambiente corrosivo, métodos de recubrimientos o pinturas, así como ánodos de sacrificio, por mencionar algunos.

Dentro de estos métodos encontramos los denominados inhibidores de corrosión, el cual es una sustancia con una baja concentración que se

agrega con el propósito de proteger las aleaciones o los metales de la corrosión durante más tiempo. Este efecto se atribuye al mecanismo de inhibición de las moléculas inhibidoras, como su adsorción en la superficie del metal, que conduce a la formación de una capa protectora.

Dentro de los inhibidores de la corrosión se dará especial atención a los líquidos iónicos que es una familia relativamente nueva de inhibidores de la corrosión que se presentan como amigables con el medio ambiente, económicamente rentables y con excelentes propiedades fisicoquímicas, ofreciendo una alta y completa protección a los metales y aleaciones, en donde se abarca sus propiedades y clasificación, métodos de síntesis, así como su método de inhibición.

Posteriormente se realizará una investigación exhaustiva con la finalidad de encontrar una serie de líquidos iónicos y poder crear una tabla con los encontrados en la literatura que presenten una alta protección del acero, todos amigables con el medio ambiente que sirva como referencia.

Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIAS.....	ii
RESUMEN.....	iv
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 La corrosión, causas y características	8
1.2 Protección contra la corrosión.....	10
1.3 Problemas de corrosión en la industria del petróleo	11
1.4 Clasificación de Aceros	13
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 Técnicas de evaluación de metales para problemas de corrosión	16
2.2 Resistencia a la polarización lineal (LPR).....	16
2.3 Curvas Potenciodinámicas (Ajuste por TAFEL).....	17
2.4 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)	18
2.4.1 Cálculo de la capacitancia de la doble capa electroquímica (C_{dl}).....	19
2.5 Representación de datos.....	22
2.5.1 Diagrama de Nyquist.	23
2.5.2 Diagramas de Bode	24
2.6 Métodos de protección.....	25
2.7 Inhibidor de corrosión	26
2.7.1 Cálculo de la eficiencia de inhibidores de corrosión	26
2.7.2 Clasificación de los inhibidores de corrosión	27
3. Líquidos iónicos en la protección de aceros	29
3.1 Propiedades físicas y químicas de los líquidos iónicos.....	30
3.2 Métodos De Síntesis De Los Líquidos Iónicos	32
3.2.1 Metátesis	32
3.2.4 Síntesis Sin Halógenos.....	34
3.2.5 Líquidos Iónicos Próticos	36
3.4 Casos Especiales.....	37

3.5 Clasificación Y Características De Inhibición De Algunos Líquidos Iónicos....	38
3.5.1 Líquidos Iónicos A Base De Imidazol	38
3.5.2 Líquidos Iónicos A Base De Triazolío Y Tiazolío	39
3.5.3 Líquidos Iónicos A Base De Indolío Y Pirrolidinio	40
3.5.4 Líquidos Iónicos A Base De Piridinío, Picolinío Y Piperidinío.....	41
3.5.5 Líquidos Iónicos A Base De Tiazinío Y Piridazinío.....	41
3.5.6 Líquidos Iónicos A Base De Amonío.....	42
3.5.7 Líquidos Iónicos A Base De Aminoácidos Y Fosfonío	42
3.6 Mecanismo General De Inhibición De Líquidos Iónicos.....	43
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	46
5. JUSTIFICACIÓN	47
6. OBJETIVOS	48
7. METODOLOGÍA DE TRABAJO	49
8. RESULTADOS	50
9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	58
10. CONCLUSIONES	62
11. BIBLIOGRAFÍA.....	63
11.1 BIBLIOGRAFÍA DE FIGURAS	68

1. INTRODUCCIÓN

1.1 La corrosión, causas y características

De acuerdo con Hunter & Baker (ASTM) la corrosión se define como: "La reacción química o electroquímica entre un material, normalmente un metal, y su entorno que produce un deterioro del material y de sus propiedades".

La corrosión se refiere al ataque destructivo e involuntario de un metal, que es un proceso electroquímico y que suele comenzar en la superficie. [...] La corrosión suele determinarse mediante la determinación directa por el cambio de peso en un entorno dado o cambios en las propiedades físicas, eléctricas o electroquímicas con el tiempo. (Cicek, 2014, p. 4)

El tipo de corrosión presentada, así como la velocidad de corrosión del metal son dependientes de múltiples factores, principalmente propiedades metálicas, temperatura, factores mecánicos, diferencia de potencial eléctrico, pH y condiciones ambientales, como presencia de ácido, base, sal o humedad.

"Según el informe de la NACE (Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión) en 2002, se ha estimado que el costo anual de la corrosión mundial supera los 2,5 billones de dólares, es decir, más del 3,5% del PIB mundial" (Ardakani, Kowsari, Ehsani, & Ramakrishna, 2021), cuyos efectos podrían evitarse "[...] un máximo del 45%, un mínimo del 10% y una media del 15% del coste de la corrosión podría evitarse" (Cicek, 2014, p. 22), utilizando materiales y métodos de protección adecuados, lo cual

indica la gran importancia del estudio de los fenómenos de corrosión y los métodos de protección en la escena industrial.

La corrosión se puede clasificar de diferentes formas dependiendo del método de estudio que se requiera, entre ellos encontramos, la clasificación por el tipo de corrosión, el mecanismo o la morfología de ataque, en este caso solo nos enfocaremos en dos grandes grupos principales clasificando el tipo o zona de afectación:

- Corrosión uniforme: se produce cuando la corrosión se distribuye de forma homogénea por la superficie, lo que provoca una reducción uniforme del espesor, se forma generalmente en un entorno marino u otros entornos corrosivos, la superficie del acero al carbono comienza a degradarse, permitiendo la formación de una capa de óxido (Figura 1).



Figura 1. Corrosión general [1]

- Corrosión no uniforme o localizada: es un tipo de corrosión electroquímica. Hay muchos tipos de corrosión no uniforme que se producen, dependiendo del tipo de metal y de las características del entorno corrosivo, encontramos corrosión por picaduras, crevice (cavitación), por hidrógeno, entre otras, (Figura 2).

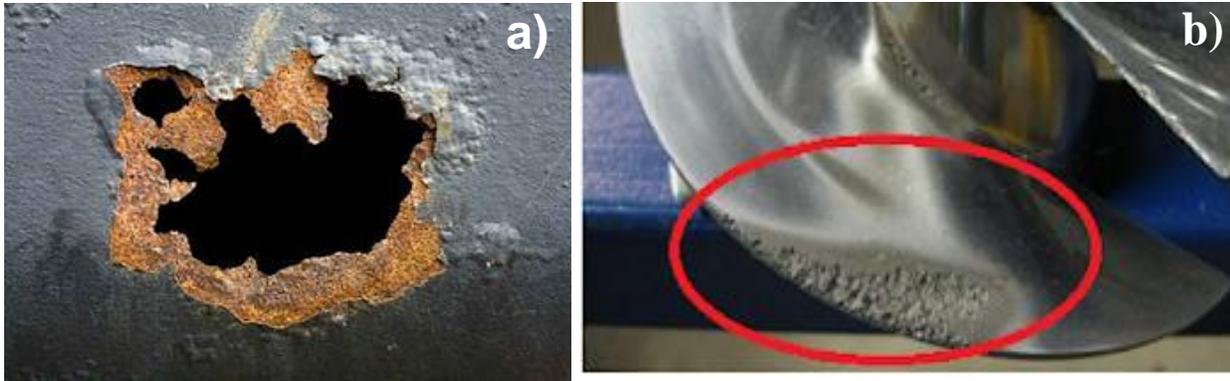


Figura 2. Ejemplos de corrosión localizada, a) corrosión por picaduras, b) corrosión por crevice (cavitación) [2]

La corrosión es una amenaza inminente y que resulta crítica para diferentes aplicaciones de ingeniería, altos impactos económicos, de seguridad y conservación, es por eso por lo que el uso de inhibidores es uno de los métodos más importantes y comúnmente utilizados para proteger los metales de la corrosión, especialmente en medios ácidos (Singh, Kumar, Udayabhanu & John (2016)).

1.2 Protección contra la corrosión

Para la protección de metales ante la corrosión existen diferentes métodos entre los cuales, como se muestra en la Figura 3, se encuentra la selección de materiales, buscando aquellos que forman capas pasivas evitando así la corrosión, en caso de tener el diseño de la estructura o elemento de ingeniería se puede hacer un cambio de material con diferente composición, microestructura o propiedades, si es posible alterar el ambiente o las condiciones, como son pH, temperatura, etc. En el cual está inmerso o expuesto, en algunos casos es mejor aplicar recubrimientos o pinturas que protejan al material, así como aplicar métodos de protección que, por ejemplo, alteran el potencial anódico o catódico.

Entre estos métodos de protección se encuentran los inhibidores de la corrosión que alteran el ambiente del metal, siendo uno de los mejores métodos debido a sus ventajas, como la rentabilidad y la facilidad de aplicación en la industria que, dependiendo de su origen, clasificación y tipo, es la forma en que protegen el material. (Verma et al, 2008)

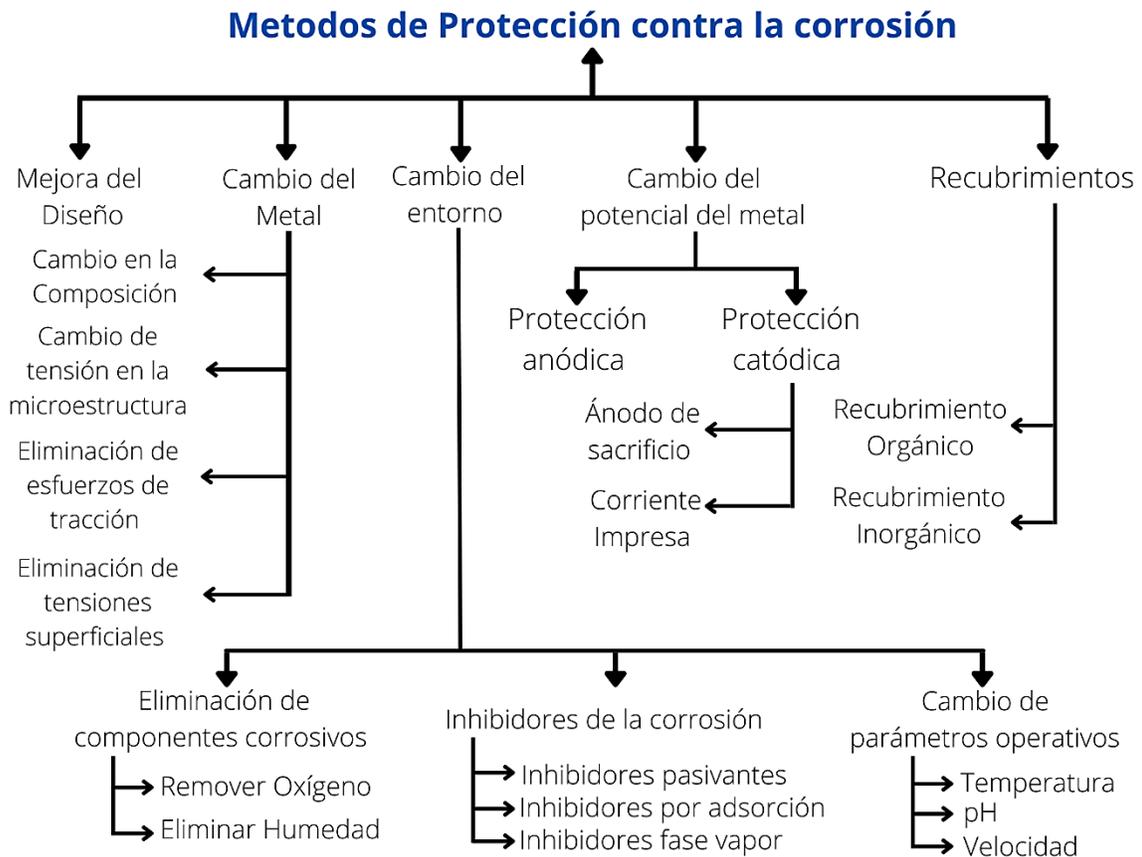


Figura 3. Métodos de protección ante la Corrosión [3]

1.3 Problemas de corrosión en la industria del petróleo

Los problemas más importantes asociados específicamente a los oleoductos de crudo son el riesgo de incendio y la seguridad, la salud laboral, la seguridad medioambiental y la corrosión. La corrosión dentro de la industria del petróleo es de gran preocupación, ya que, puede llevar a grandes riesgos para los trabajadores, las instalaciones y el

funcionamiento de la industria completa, además de que genera una gran afectación económica.

El petróleo transportado por los oleoductos contiene agua, que incluye productos químicos corrosivos como oxígeno disuelto, cloruros, bisulfato, ácidos orgánicos, bacterias y compuestos orgánicos que contienen azufre. El oxígeno disuelto, incluso en la cantidad de 20 partes por billón (ppb), puede causar corrosión por picadura en las tuberías, que también es causada por el CO_2 y el H_2S disueltos que actúan como ácidos débiles. (Cicek V. 2014)

La corrosión más común encontrada en la industria, como se observa en la figura 4 es la corrosión ácida producida por ácido sulfhídrico (H_2S), la corrosión por gases de dióxido de carbono (CO_2) figura 5, y por oxígeno (O_2) figura 6. Durante el almacenamiento y transporte de crudo o gas, la mezcla de hidrocarburos y otras sustancias entre ellas dióxido de carbono que se encuentra disuelto entra en contacto directo con la humedad y genera una solución extremadamente corrosiva y ácida por la formación de ácido carbónico. Esto, combinado con el ambiente de salmuera y el flujo turbulento juntos, crea un medio extremadamente corrosivo. (Chauhan, Quraishi, & Qurashi. (2021))



Figura 4. Efecto en muestras de cañerías afectadas por ácido sulfhídrico [4]



Figura 5. Sección de un tubo con notoria corrosión por CO₂ [5]



Figura 6. Efectos de la corrosión producidos en una tubería por acidificación (pH) y O₂ [6]

Para contrarrestar los efectos dañinos y destructivos de la corrosión sobre metales se utilizan diferentes métodos, entre los más utilizados se incluyen recubrimientos metálicos y pinturas, protección catódica, selección de aleaciones, polímeros y plásticos, así como la adición de inhibidores en medios agresivos.

1.4 Clasificación de Aceros

El acero al carbono es uno de los materiales más empleados en la industria debido a las excelentes propiedades mecánicas con un precio accesible. Aunque este material es muy utilizado presenta un gran inconveniente durante su exposición al ambiente sin ninguna clase de protección, y es que este material es altamente susceptible a sufrir diversos tipos de corrosión, lo que ocasiona la pérdida de características y propiedades.

Debido a que la gama de materiales y metales es amplia, se buscan medios para poder clasificar e identificar a los materiales y especialmente a los aceros, para lo cual existen diversos métodos y designaciones estandarizadas. Es por esto por lo que la mayoría de los aceros comercializados y utilizados industrialmente presentan una designación, la cual está normalizada, que se expresa por medio de cifras, letras y en ocasiones símbolos.

El sistema AISI / SAE como es conocido recibe su nombre del acrónimo de dos institutos: American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y el Acero) y del Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros automotrices), el cual utiliza un sistema básico de cuatro dígitos para designar la composición química de los aceros de carbono y aleación. Independientemente del sistema que se utilice, existe una correspondencia del sistema SAE con otros sistemas de numeración de aleaciones, como el ASTM con su UNS (sistema de numeración unificado).

En este sistema los dos primeros dígitos indican el elemento de aleación de acuerdo con la especificación SAE, mientras que los dos segundos indican la cantidad (concentración) de carbono en percentiles, el sistema para la designación de acero se muestra esquemáticamente en la Figura 7.



Figura 7. Representación esquemática de la designación de aceros AISI/SAE. [7]

Cuando el primer dígito, de esta designación indica (**1**), se trata de un acero al carbono; es decir, los aceros al carbono comprenden grupos 1xxx en el sistema AISI -SAE y se subdividen en cuatro categorías debido a la

variación en ciertas propiedades fundamentales entre ellos, estas categorías son apreciables en la Tabla 1. Donde se muestran los elementos aleantes o características de los aceros en cuestión.

Tabla 1. Clasificación SAE para Acero al carbono.

Aceros al carbono	10XX	Carbono Mn 1.00% máx.
	11XX	Mecanizado libre resulturado
	12XX	Mecanizado libre resulturado / refosforizado
	15XX	Carbono, Mn 1.00-1.65%

El sistema AISI-SAE clasifica todos los demás aceros aleados utilizando el mismo índice de cuatro dígitos de la siguiente manera, el elemento de aleación en la especificación SAE se indica con los dos primeros dígitos y la cantidad (concentración) de carbono se indica con los dos últimos dígitos, en percentiles como se observa en la tabla 2:

Tabla 2. Designación SAE para Aceros.

Designación SAE	Tipo
1xxx	Aceros de carbono
2xxx	Aceros de níquel
3xxx	Aceros de níquel-cromo
4xxx	Aceros de molibdeno
5xxx	Aceros de cromo
6xxx	Aceros de cromo-vanadio
7xxx	Aceros de tungsteno
8xxx	Aceros de níquel-cromo-vanadio
9xxx	Aceros de silicio-manganeso

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Técnicas de evaluación de metales para problemas de corrosión

Para realizar la evaluación de la corrosión en los metales o aleaciones es necesario determinar la velocidad de corrosión, la cual es una medida de afectación, para esta determinación se utilizan técnicas que generalmente son realizadas en laboratorio por métodos electroquímicos, en estos métodos se busca recrear lo más posible el ambiente a los que estarán expuestos los metales para tener aproximaciones certeras, algunos de estos métodos se enlistan a continuación:

2.2 Resistencia a la polarización lineal (LPR)

La resistencia a la polarización lineal se basa en que, bajo determinadas condiciones, en el entorno del potencial de corrosión se verifica una relación lineal entre el potencial aplicado al metal y la corriente que circula en el sistema polarizado para determinar la velocidad de corrosión.

Este método consiste en la aplicación de sobre potencial, respecto al potencial de equilibrio, de ± 20 mV para no alterar significativamente el sistema, el objetivo de esta técnica es determinar la resistencia a la polarización (R_p), la cual es la pendiente de la curva del voltaje aplicado vs corriente de celda, esta técnica solo da información cualitativa de la celda. (Stern M. & Geary A. L, 1957). Una representación esquemática de este proceso se puede apreciar en la Figura 8.

Por otro lado, las mediciones de LPR son una manera rápida y precisa de medir la velocidad de corrosión general pero no pueden determinar la corrosión localizada. Suele utilizarse como monitoreo de la corrosión en tiempo real, y a largo plazo, para clasificar aleaciones, inhibidores, etc., en orden de resistencia a la corrosión general.

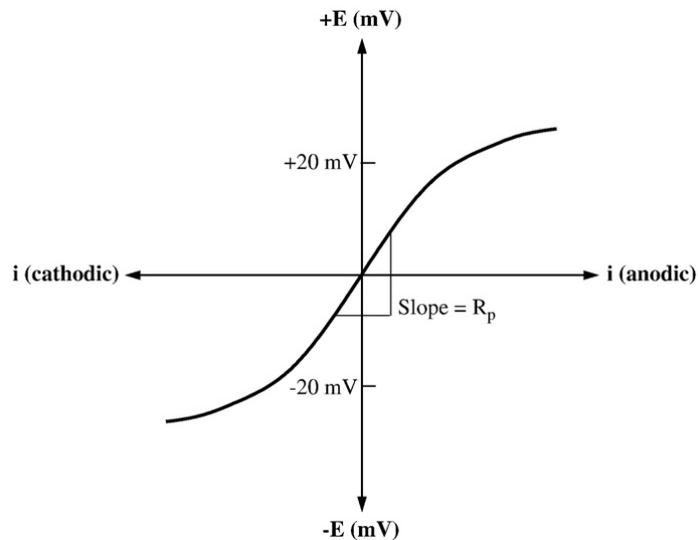


Figura 8. Ilustración esquemática de la curva de polarización lineal y de la resistencia de polarización (R_p). [8]

2.3 Curvas Potenciodinámicas (Ajuste por TAFEL)

El ajuste de curvas potenciodinámicas por el método de Tafel es muy útil para determinar la velocidad de corrosión y determinar qué reacciones (anódicas o catódicas) controlan el fenómeno.

Es similar a la prueba LPR, pero aquí la aplicación de voltaje se extiende entre ± 200 mV con respecto al potencial de reposo, la gráfica se presenta de manera semi logarítmica de la forma $\text{Log } i$ (mA) vs potencial (V), el modelo que es usado para los procesos de corrosión asume que las tasas de los procesos anódico y catódico son controladas por la cinética de las reacciones de transferencia electrónica en la superficie del metal, que es el caso general de las reacciones de corrosión, se puede apreciar la curva y datos fundamentales en la figura 9.

En el caso de materiales o superficies pasivados permite determinar parámetros como el potencial de pasivación, el potencial de repasivación y el rango de potencial de la zona pasiva, zona transpasiva y activa. Estos términos permitirán conocer la eficacia con la que una película pasiva protege un metal y caracterizar el comportamiento de esta.

El cálculo del porcentaje de eficiencia permite conocer si los compuestos orgánicos otorgan protección al metal base y para ello se necesitan conocer las corrientes de corrosión del blanco (metal sin protección) y de los compuestos evaluados (metal con protección), de acuerdo con la Ecuación 1:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{i_{\text{corr}(B)} - i_{\text{corr}(C)}}{i_{\text{corr}(B)}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$i_{\text{corr}(B)}$, es la corriente de corrosión del blanco.

$i_{\text{corr}(C)}$, es la corriente de corrosión del compuesto evaluado.

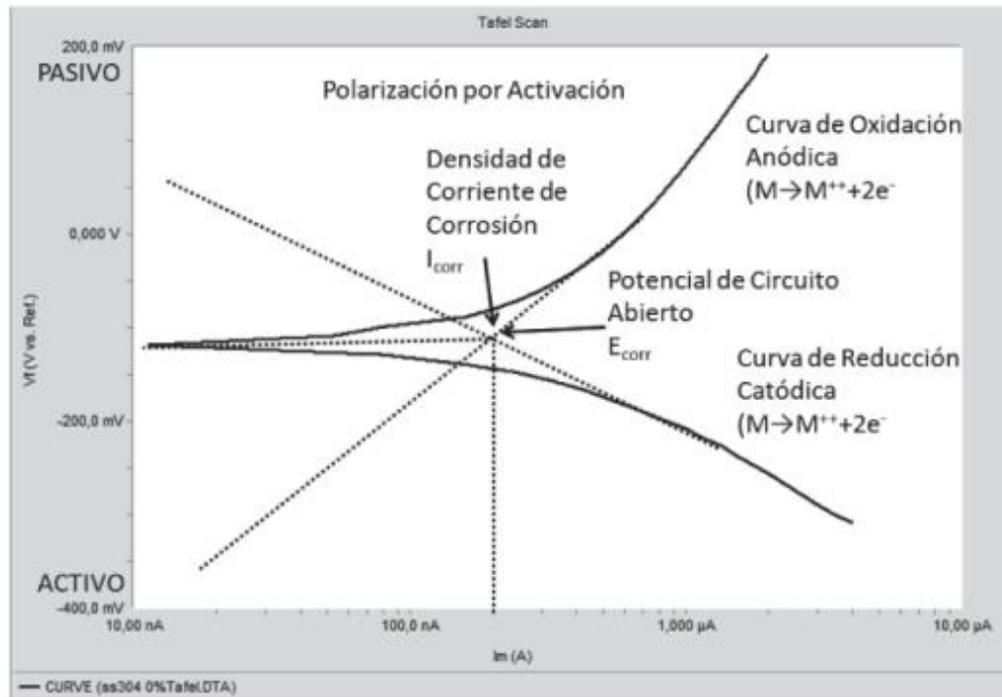


Figura 9. Curva potenciodinámica característica de Tafel.[9]

2.4 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

La espectroscopia de impedancia electroquímica es un método que aplica un estímulo de potencial con una pequeña perturbación (± 10 mV), que permite monitorear la degradación de un sistema con el tiempo. La principal diferencia con el resto de las técnicas electroquímicas es que la

perturbación del sistema a estudiar se realiza mediante corriente alterna en lugar de continua, la gráfica característica asociada a este sistema se aprecia en la figura 10.

La mayor ventaja es la posibilidad de medir procesos separados que ocurren en el mismo material en función de la constante de tiempo de cada uno de ellos, y obtener valores como el de la resistencia del recubrimiento. Esto hace que sea una técnica muy utilizada para la evaluación de recubrimientos protectores, ya que proporciona información adicional a la obtenida por técnicas basadas en corriente continua.

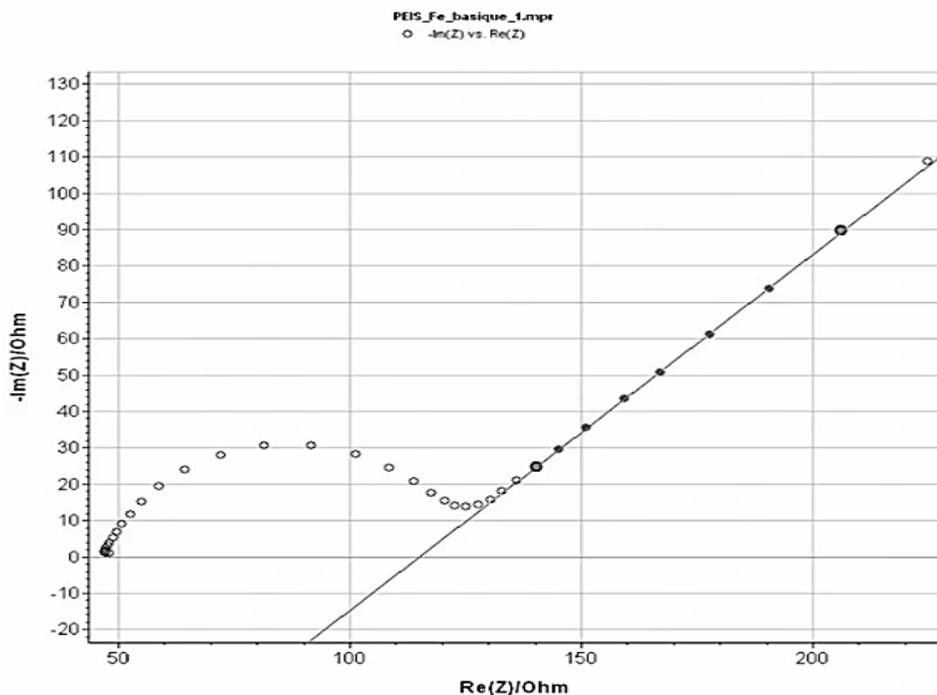


Figura 10. Curva ideal de una espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) dominada por un proceso capacitivo.[10]

2.4.1 Cálculo de la capacitancia de la doble capa electroquímica (C_{dl})

La capacitancia es el elemento de un circuito eléctrico capaz de almacenar energía eléctrica. La impedancia para un capacitor es un número complejo,

no tiene parte real, pero sí parte imaginaria, depende de la frecuencia (ω) y presenta un desfaseamiento.

La capacitancia en Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) permite ver el cargado de la doble capa electroquímica con la función de transferencia, otra aplicación muy importante es que sirve para simular el proceso de adsorción en determinada superficie. (Gómez (2014)).

La capacitancia de doble capa es un efecto de acumulación de carga producido por la doble capa eléctrica que se forma en la interfase del electrodo-disolución, y que ocasiona una corriente no faradaica, está relacionada en la ecuación 2:

$$|i_c| = A * C_{dl} * v \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde sí se conoce el área electroactiva de un electrodo (A), se puede calcular también su capacitancia mediante el estudio de la influencia de la velocidad de barrido (v) sobre la intensidad capacitiva (i_c). (Sánchez (2014)).

En 1879 Helmholtz propuso el primer modelo de la doble capa eléctrica en el cual concibió la separación de carga en la interfase metal-electrolito y propuso que la carga en la solución se encuentra adyacente a la superficie del electrodo, de manera que existen dos planos de carga con polaridad distinta separados por una distancia de orden molecular.

En el modelo de Helmholtz la interfase es comparable a un capacitor de placas paralelas. Un plano estaría constituido por la superficie de contacto metal/solución, mientras que el otro estaría constituido por iones de carga opuesta en solución. La separación entre los planos estaría dada por el radio iónico X_H . El plano localizado en esta posición se denomina Plano Interno de Helmholtz (IHP por sus siglas en inglés) como se muestra en la

figura 11. La capacitancia en la doble capa eléctrica en el modelo de Helmholtz está dada por (Durán, 2007):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial V} = C_{dl} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{X_H} \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

σ = Densidad de carga superficial

V = Diferencia de potencial

C_{dl} = Capacitancia de la doble capa electroquímica

ϵ_r = Permitividad relativa del medio (se asume que no varía con la distancia)

ϵ_0 = Permitividad de espacio libre

$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ = Constante dieléctrica o permitividad del medio

X_H = Espesor de la doble capa eléctrica

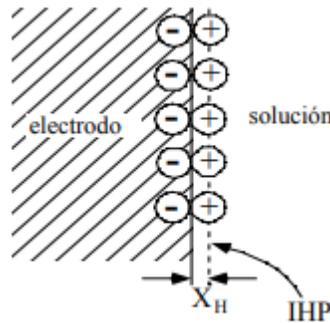


Figura 11. Representación de la doble capa de Helmholtz. [11]

La capacitancia de doble capa (C_{dl}) de igual manera puede calcularse mediante la siguiente expresión (Pérez, 2016):

$$C_{dl} = \frac{1}{[\omega R_p]} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

C_{dl} = Capacitancia de doble capa

ω = Frecuencia Angular

R_p = Resistencia a la transferencia de carga

De la ecuación anterior se deriva la ecuación 5 para obtener R_p resistencia a la transferencia de carga:

$$R_p = \frac{2Z(\omega)}{\tan(\theta)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

R_p = Resistencia a la transferencia de carga

$Z(\omega)$ = Función de transferencia teórica

$\tan(\theta)$ = Ángulo de fase

Con la ecuación 4 y un diagrama de Nyquist es posible estimar el valor de la Resistencia de la solución, como el límite a alta frecuencia de Z' a bajas frecuencias (el punto más alto del semicírculo del diagrama). La suma de la Resistencia a la polarización (R_p) y la Resistencia de la solución es igual al límite de Z' a bajas frecuencias (Mendoza F.J., et al 2020).

La capacitancia de doble capa electroquímica del sistema (C_{dl}) puede ser calculada a partir de la frecuencia en la cima del semicírculo del diagrama de Nyquist y del valor de R_p con la ecuación 4.

$$\omega = \frac{1}{R_p C_{dl}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Algunas referencias sugieren que el cálculo de la Capacitancia de doble capa puede hacerse con ayuda de un diagrama de Bode de $|Z|$ contra f (frecuencia), ya que a altas frecuencias $|Z|$ está dado por la ecuación 6, siempre y cuando la resistencia de la solución (R_{sol}) sea pequeña (Mendoza F.J., et al 2020).

$$\log \log |Z| = -\log \omega - \log \log C_{dl} \quad \text{Ecuación 7}$$

ecuación 7 indica que, a frecuencias altas, la relación entre $|Z|$ y f (a partir de ω) es una línea recta con pendiente -1. A fin de obtener el valor de C_{dl} dicha línea recta puede ser extrapolada al valor de frecuencia correspondiente y entonces se obtiene la ecuación 8:

$$|Z| = -\text{Log} C_{dl} \quad \text{Ecuación 8}$$

2.5 Representación de datos

Los datos y resultados obtenidos en las técnicas electroquímicas anteriores se obtienen como conjuntos de valores con forma numérica pero generalmente se reportan, por equipos comerciales, en dos formas gráficas:

- a) módulo de la impedancia ($|Z|$) y ángulo de fase (φ).
- b) componente real de la impedancia total (Z') y componente imaginario de la impedancia total (Z'').

Estas dos opciones son las formas, entre otras, de describir los datos obtenidos de los ensayos denominados gráficos o diagramas de Nyquist y de Bode.

2.5.1 Diagrama de Nyquist.

El diagrama de Nyquist para un proceso de corrosión también es conocido como diagrama de impedancia en plano complejo y son curvas semicirculares o funciones de varios semicírculos. En este caso se grafica el componente imaginario de la impedancia (Z'') contra el componente real de la impedancia (Z') para cada frecuencia a la que se aplicó la señal sinusoidal de voltaje, dando como resultado una semicircunferencia sobre el eje de la resistencia. (Mendoza F.J, et al 2020).

Los semicírculos de impedancia de Nyquist aumentan con el aumento del contenido (concentración) del inhibidor, como resultado, la resistencia de polarización (R_p) aumenta, y tanto la capacitancia de doble capa (C_{dl}) como la velocidad de corrosión (CR) disminuyen con la adición del inhibidor Tiosemicarbonato (TSC). (Pérez, P. 126, 2016), como se observa en la Figura 12.

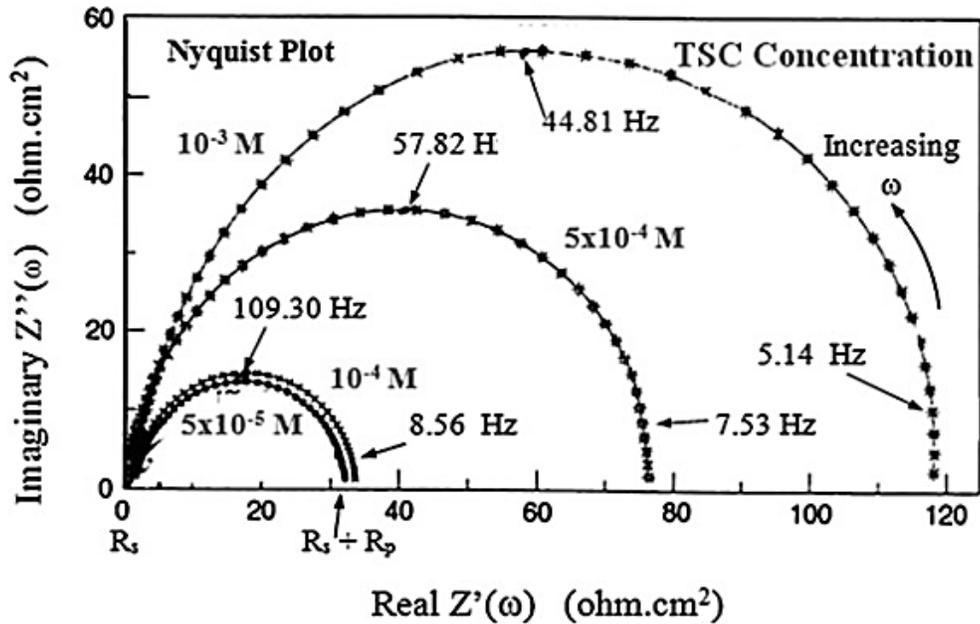


Figura 12. Gráficos experimentales de Nyquist para el acero al carbono AISI 1030 en 35 % H_3PO_4 + 6% butanol + inhibidor TSC (Tiosemicarbonato) a temperatura ambiente. [12]

2.5.2 Diagramas de Bode

Los diagramas de Bode son utilizados para representar gráficamente la respuesta en frecuencia de la magnitud y la fase de una función de transferencia. Este tipo de gráficos representa la variación de la impedancia real contra la frecuencia graficada en coordenadas log-log. La presencia de resistencias en el circuito provoca mesetas horizontales; mientras que los capacitores presentan pendientes negativas y los inductores de pendientes positivas (Mansfeld, F., et al 1993), este tipo de diagramas se aprecia en la figura 13.

Los gráficos de Bode son representaciones de diferentes parámetros de la impedancia contra frecuencia y existen diferentes variantes. Los más comunes son:

- Logaritmo base 10 del módulo de la impedancia ($|Z|$) contra el logaritmo base 10 de la frecuencia (f).
- Ángulo de fase (φ) contra el logaritmo base 10 de la frecuencia (f).

A diferencia de los gráficos de Nyquist, las representaciones de Bode contienen toda la información de un ensayo de EIS de manera explícita, ya que las frecuencias se identifican claramente. (Mendoza F. J. et al 2020)

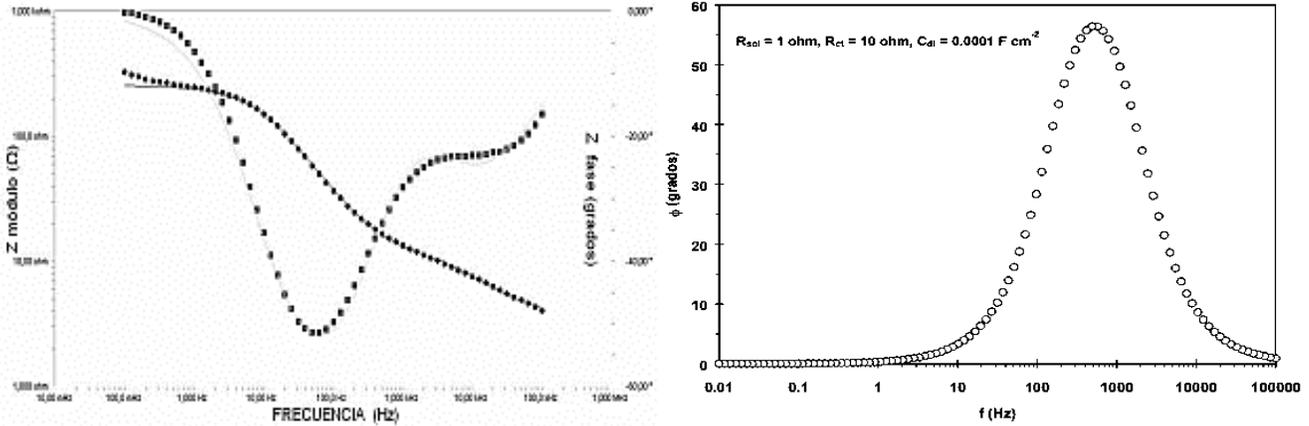


Figura 13. a) Diagrama de Bode del módulo de Z contra la frecuencia, b) Diagrama de Bode del ángulo de fase contra la frecuencia, [12],[13]

2.6 Métodos de protección

La corrosión es un fenómeno que afecta a todos los sectores industriales, causando problemáticas graves, de entre los sectores más afectados se encuentra el petrolero, debido a que en esta industria se transporta y maneja el crudo el cual contiene agua, productos químicos corrosivos como oxígeno disuelto, cloruros, ácidos orgánicos, bacterias y compuesto azufrados; es por ello por lo que los ductos y sus instalaciones, son altamente susceptibles a la aparición a más de un tipo de corrosión.

La función principal de un inhibidor es disminuir la velocidad de corrosión alterando la superficie del metal, evitando así el desgaste y daño prematuro de las tuberías y estructuras que protege aumentando la vida útil. Estos inhibidores poseen varias ventajas, una de ellas es que su aplicación es mínima, ya que, trabajan con concentraciones de ppm, y no es necesaria su remoción antes de efectuar una operación, dependiendo su método de protección generan películas delgadas sobre el metal que

tienen un tiempo prolongado de protección, y recientemente se busca que mitiguen el daño ambiental buscando opciones con baja toxicidad y alta eficiencia.

2.7 Inhibidor de corrosión

Un inhibidor de la corrosión es una sustancia con una concentración baja que se agrega con el propósito de proteger las aleaciones o los metales durante más tiempo. Este efecto se atribuye al mecanismo de inhibición de las moléculas inhibidoras, como su adsorción en la superficie del metal, que conduce a la formación de una capa protectora, etc. (Cao, S., Liu, D., Ding & et al. 2019; & Aslam, R., Mobin, M, & et al 2021).

Sin embargo, la mayoría de los inhibidores utilizados para el control de la corrosión del acero en medios ácidos son materiales muy tóxicos y peligrosos para el medio ambiente (Tawfik, 2016).

2.7.1 Cálculo de la eficiencia de inhibidores de corrosión

El cálculo de porcentaje de eficiencia permite conocer si los inhibidores utilizados, tienen o no un buen desempeño, en la disminución de las velocidades de corrosión, para eso se necesita conocer las corrientes de corrosión del parámetro de comparación o sea el electrolito sin el compuesto con características de inhibición (blanco) y el material evaluado. (S. Seal, Sapre, K. et al, 2000) Ver ecuación 8:

$$\% \text{ de protección} = \frac{Vel_{corr} \text{ Sin inhibidor} - Vel_{corr} \text{ Con inhibidor}}{Vel_{corr} \text{ Sin inhibidor}} \times 100 \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$Vel_{corr} \text{ Sin inhibidor}$ = Corresponde a la velocidad de corrosión del material a evaluar sin inhibidor.

$Vel_{corr} \text{ Con inhibidor}$ = Corresponde a la velocidad de corrosión del material a evaluar con presencia del inhibidor a evaluar.

2.7.2 Clasificación de los inhibidores de corrosión

Los inhibidores de la corrosión son sustancias que pueden presentarse como sólidos, líquidos y gaseosos, dado que existe una enorme variedad de ellos no existe una clasificación clara dentro de los inhibidores, y cada autor los clasifica de una manera diferente, ya sea por su origen, uso o lo que protegen.

El empleo de inhibidores puede hacerse prácticamente en cualquier proceso de corrosión, existiendo un amplio número de sustancias que pueden actuar como tal. Sin embargo, a efectos prácticos, deben presentar cierta rentabilidad y esto es algo que sólo un número limitado de ellos ha conseguido. Pese a ello, es una cantidad a tener en cuenta y conviene establecer una clasificación, que puede hacerse atendiendo a diversos factores.

El empleo de inhibidores puede ser utilizado en prácticamente cualquier proceso donde se desee evitar la corrosión, ya que existe una amplia cantidad de ellos que pueden evitarla en variedad de situaciones y ambientes. Sin embargo, existen inhibidores altamente eficaces, pero con precio muy elevado, que no aparentan presentar beneficios económicos al ser utilizados. Pese a ello, la cantidad a utilizar es mínima y los beneficios a largo plazo indican una necesidad de establecer una clasificación de inhibidores amigables con el medio ambiente y altamente rentables, que pueden hacerse atendiendo a diversos factores y necesidades.

La mayoría de los autores dividen los inhibidores en: anódicos (pasivadores), catódicos y mixtos según el mecanismo de influencia en las reacciones electroquímicas que se producen en una superficie metálica y que dan lugar a la corrosión. Los inhibidores anódicos disminuyen la velocidad de la semirreacción anódica; y los catódicos, actúan

disminuyendo la velocidad de reacción de la semirreacción catódica. Mientras que ambos actúan sobre semi reacciones específicas, los inhibidores mixtos actúan sobre ambas semirreacciones. (Godínez, Ortega-Borges, & Corona, 2003)

Por otra parte, los inhibidores de la corrosión pueden clasificarse según su naturaleza: Orgánicos e inorgánicos. Otra clasificación puede referirse al tipo de metal protegido como es: el hierro y el acero, el cobre, el aluminio, el zinc y sus aleaciones, etc.

La clasificación más clara y extendida es la que tiene en cuenta el mecanismo de acción de los inhibidores, que según esta ordenación pueden ser de varios tipos (Canovas F.A, 2013):

- ❖ **Inhibidores de interfase.** El inhibidor forma una capa mono-molecular por adsorción sobre la superficie del metal.
- ❖ **Inhibidores de membrana.** El recubrimiento de la superficie se desarrolla en espesor formando una capa poli-molecular. Estos inhibidores producen capas de conversión superficial.
- ❖ **Inhibidores de capa difusa.** Se deposita una capa protectora sobre el metal, a partir de una reacción desarrollada a cierta distancia del electrodo, en la capa líquida de difusión.
- ❖ **Inhibidores pasivantes.** Son de tipo anódico y actúan formando una capa protectora de óxido sobre la superficie del metal o completando la ya existente de forma natural. Son de los más eficaces, pero no queda asegurada la estabilidad de la pasivación, pudiéndose ocasionar picaduras.
- ❖ **Inhibidores neutralizadores.** Modifican el medio reduciendo su agresividad. Se utilizan en medios ácidos débiles, donde la reacción catódica principal es la reducción de protones.

- ❖ **Inhibidores captadores de oxígeno.** Se utilizan usualmente como complementos de una desaireación térmica o mecánica y en instalaciones de vapor. Su mecanismo de acción se reduce a una simple reacción química con el oxígeno, pasando éste a formar parte de un producto no corrosivo, o convirtiéndose en agua.

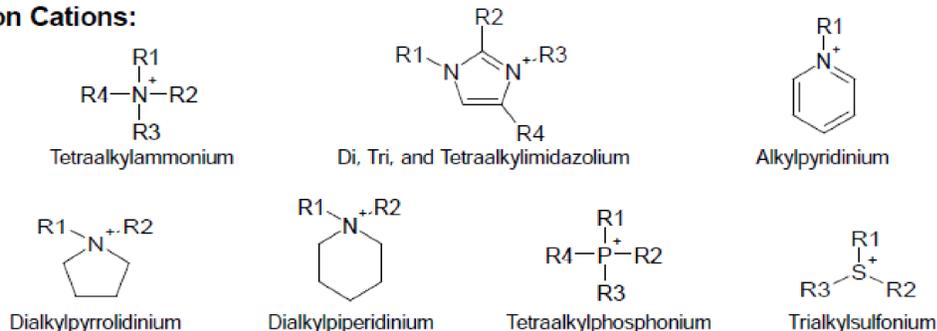
3. Líquidos iónicos en la protección de aceros

Los inhibidores de corrosión de tipo líquido iónico se utilizan para proteger muchas aleaciones y metales, como hierro, acero dulce, acero al carbono, acero inoxidable, cobre, aluminio, latón y compuestos de la corrosión en medios agresivos generalmente acuosos.

Existen muchas definiciones de líquido iónico de manera general un líquido iónico es una categoría de sales orgánicas compuestas totalmente de iones (catión y anión), que se encuentra en estado líquido por debajo de 100 ° C. Generalmente, el tamaño del anión líquido iónico es menor que el tamaño del catión (Eshkalak, Khatibzadeh, Kowsari, Chinnappan, & Ramakrishna, 2018).

Los cationes de los líquidos iónicos a menudo incluyen, como se muestra en la figura 15, imidazolio, amonio cuaternario, piridinio, piridazinio y, en raras ocasiones, fosfonio cuaternario, piperidinio, compuestos de pirrolidinio y sulfonio. Además, los aniones líquidos iónicos a menudo consisten en bromuro, cloruro, metioninato y rara vez se utilizaron hexafluorofosfato hidrogenosulfato, tetrafluoroborato y iones acetato. (Ardakani, Et al, 2021).

Common Cations:



Common Anions:

BF_4^- , $\text{B}(\text{CN})_4^-$, CH_3BF_3^- , $\text{CH}_2\text{CHBF}_3^-$, CF_3BF_3^- , $\text{C}_2\text{F}_5\text{BF}_3^-$, $n\text{-C}_3\text{F}_7\text{BF}_3^-$, $n\text{-C}_4\text{F}_9\text{BF}_3^-$, PF_6^- , CF_3CO_2^- , CF_3SO_3^- , $\text{N}(\text{SO}_2\text{CF}_3)_2^-$, $\text{N}(\text{COCF}_3)(\text{SO}_2\text{CF}_3)^-$, $\text{N}(\text{SO}_2\text{F})_2^-$, $\text{N}(\text{CN})_2^-$, $\text{C}(\text{CN})_3^-$, SCN^- , SeCN^- , CuCl_2^- , AlCl_4^- , $\text{F}(\text{HF})_{2,3}^-$ etc.

Figura 14. Cationes y aniones comunes para líquidos iónicos a temperatura ambiente [14].

3.1 Propiedades físicas y químicas de los líquidos iónicos

Desde el punto de vista de las propiedades los líquidos iónicos a diferencia de otras sustancias moleculares poseen mejores propiedades, y tienen la posibilidad de modular sus propiedades físicas y químicas variando la naturaleza de los cationes y aniones presentes en su estructura. Algunas de estas propiedades se exponen a continuación:

- **Presión de vapor.** A diferencia de las sales fundidas, presentan una débil interacción coulombica entre iones, que limita la formación de pares iónicos necesarios para que se produzca la volatilización de las sales, por lo que tienen una presión de vapor muy baja.
 - Su baja presión de vapor es la ventaja más importante, ya que los hace fácilmente manejables, por no evaporarse, lo que los convierte en atractivos sustitutos de los tradicionales disolventes orgánicos volátiles.
 - Permiten la utilización de la destilación para recuperar los productos o sustratos disueltos en los procesos donde son usados, ya sea en catálisis, extracciones líquido-líquido, etc.
- **Estabilidad térmica.** Poseen un alto intervalo donde son estables térmicamente y el límite superior de temperatura se encuentra entre

350 y 400°C dependiendo siempre de la naturaleza de los iones que conforman el líquido iónico.

- **Estabilidad química.** Son compuestos no inflamables y químicamente inertes.
- **Punto de fusión.** Normalmente es bajo y por debajo de la temperatura ambiente, incluso bajo cero en algunos casos. Depende del tamaño de los iones que forman el líquido iónico (al aumentar el tamaño del ion disminuye el punto de fusión.), de su simetría (un incremento en la simetría supone un aumento del punto de fusión, ya que permite un mayor empaquetamiento), de la carga y distribución de esta. Respecto a la carga se puede decir, de forma general, que la existencia de puentes de hidrógeno y la deslocalización incrementan el punto de fusión.
- **Densidad.** Su densidad es superior a la del agua, los valores medidos hasta el momento varían entre 1.12 g/cm³ y 2.24 g/cm³.
- **Viscosidad.** La viscosidad de los LI es elevada, superior a los disolventes moleculares, comprendida entre 10-500 cP.
- **Propiedades electroquímicas.** Los líquidos iónicos se destacan por su gran estabilidad a la oxidación/reducción, resistiendo un amplio rango de potenciales y su buena conductividad eléctrica.
- **Color.** En estado puro son incoloros y en ocasiones presentan ciertas tonalidades, generalmente por causa de impurezas.
- **pH.** El rango de pH es muy variable, se puede encontrar líquidos iónicos ácidos, neutros o básicos.
- **Solubilidad.** Son muy buenos disolventes y son considerados disolventes polares. Lo que multiplica su uso ya que tienen la capacidad de solvatación en un amplio número de especies orgánicas, inorgánicas y organometálicas.

- Los líquidos iónicos poseen una polaridad similar a los alcoholes de cadena corta u otros disolventes apróticos polares que varía dependiendo de la naturaleza del líquido iónico.
- La solubilidad de líquidos iónicos en gases (H_2 , CO y O_2) es generalmente buena lo que los hace disolventes atractivos para llevar a cabo hidrogenaciones catalíticas, carbonilaciones, hidroformilaciones y oxidaciones aeróbicas.
- **Hidroflicidad/hidrofobicidad.** La miscibilidad de los líquidos iónicos en agua es una propiedad particularmente interesante. Mientras que algunos son miscibles con agua en todas las proporciones, como es el caso de $[bmim]^+(BF_4^-)$, otros se saturan con agua, formando entonces un sistema bifásico. En este grupo se encuentran $[bmim]^+PF_6^-$ y $[bmim]^+NTf_2^-$.
 - La solubilidad de los líquidos iónicos con agua depende en gran medida de la naturaleza del anión, debido a la fuerte interacción por puentes de hidrógeno.

3.2 Métodos De Síntesis De Los Líquidos Iónicos

3.2.1 Metátesis

Según la etimología griega, la palabra metátesis significa cambio de lugar; proviene este concepto de la lingüística y se aplica a la inversión de sílabas, en una palabra. En la metátesis de olefinas (nombre dado a cadenas con dobles enlaces en su estructura) los átomos unidos por el doble enlace cambian de posición con otros átomos de otra molécula. Para que la reacción ocurra se requiere de un catalizador, el cual no se consume durante la reacción. (Castagnino, J. M., 2005).

Un elevado número de líquidos iónicos se obtienen mediante reacciones de metátesis a partir de haluros o de la sal similar al catión deseado. La

reacción de metátesis se puede dividir en dos categorías, mostrado en la Figura 15, dependiendo de la solubilidad en agua: metátesis mediante ácidos libres o metales del grupo 1 y sales de amonio, o metátesis de sales de plata (Ag).

3.2.2 Metátesis Mediante Ácidos Libres, Metales Del Grupo 1 O Sales De Amonio

El método más común para preparar líquidos iónicos inmiscibles en agua es la reacción de metátesis de la sal de haluro correspondiente con el ácido libre del anión, su sal metálica o sal de amonio. En estas alternativas, el ácido libre puede generar haluro de hidrógeno, que se puede eliminar fácilmente con agua. "La solubilidad en agua de los líquidos iónicos depende en gran medida de los cationes y aniones, en general, la solubilidad en agua disminuye al aumentar la longitud de la cadena alquílica del catión" (Clare, Sirwardana & MacFarlane p. 7, 2009).

3.2.3 Metátesis De Sales De Ag

La preparación de líquidos iónicos miscibles es más difícil porque requiere la separación de los subproductos del líquido iónico. Esto se puede lograr mediante una simple reacción de metátesis del cloruro o bromuro correspondiente con la sal de plata del anión deseado. Cuando las sales de plata no están disponibles, también es útil el hidróxido de plata de la sal deseada.

Sin embargo, esta ruta tiene un alto costo y muchos subproductos de haluro de plata. Otra opción es precipitar completamente los haluros de plata con solventes orgánicos, pero la velocidad es relativamente lenta, lo que resulta en la contaminación con plata del producto. La naturaleza del precipitado también puede ser problemática; en algunos casos, el haluro de plata puede formar partículas submicrónicas que son difíciles de filtrar. Por estas razones, el enfoque preferido y más común sigue siendo la

reacción en solución acuosa con el ácido libre del anión apropiado, o su sal de amonio o metal alcalino.

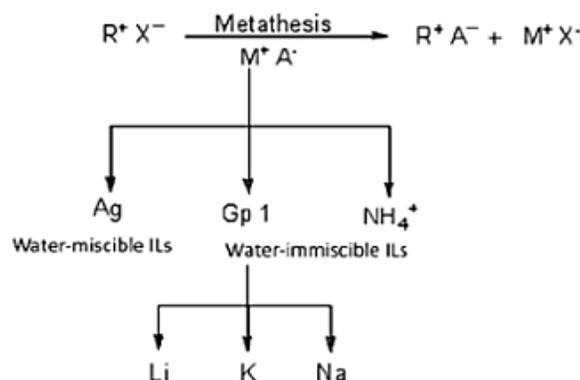


Figura 15. Esquema general de las rutas de Metátesis para líquidos iónicos. [15]

3.2.4 Síntesis Sin Halógenos

Una amplia variedad de líquidos iónicos suele prepararse por cuaternización de imidazoles alquilaminas o fosfinas, a menudo empleando haluros de alquilo como agentes alquilantes, seguido de metátesis aniónica. Aunque los métodos de metátesis aniónica producen un gran número de líquidos iónicos de buena calidad, la producción de materiales de alta pureza problemática debido a la contaminación por haluro residual. La presencia de haluros en los líquidos iónicos puede cambiar drásticamente las propiedades físicas y puede provocar el envenenamiento del catalizador y la desactivación del líquido iónico.

a) Síntesis de líquidos iónicos a través de carbenos n-heterocíclicos (NHC) Intermediarios

Los carbenos son moléculas que tienen un par de electrones solitarios en un átomo de carbono tal y como se aprecia en la Figura 16, donde tenemos el par libre en una arista de una molécula cíclica, lo que los hace muy reactivos. Por ello, los carbenos son intermedios útiles en la síntesis de

compuestos químicos. Estos carbenos pueden utilizarse para producir las correspondientes sales de imidazolio mediante una simple reacción con la forma protonada del anión requerido.

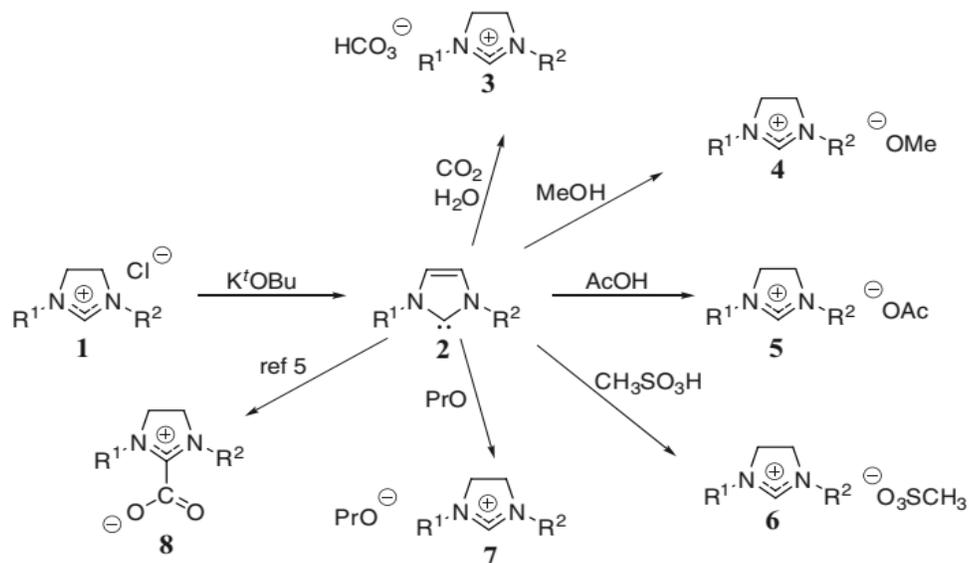


Figura 16. Ejemplos de síntesis de varios líquidos iónicos a base de carbenos [15].

b) Líquidos iónicos a base de fósforo

Los líquidos iónicos a base de fósforo sin halógenos pueden producirse por reacción directa de: fosfinas con sulfatos o ácidos; fosfinas terciarias o imidazoles como lo mostrado en la Figura 17, con agentes alquilantes como trialquilfosfatos, dialquilfosfonatos y monoalquilfosfinatos.

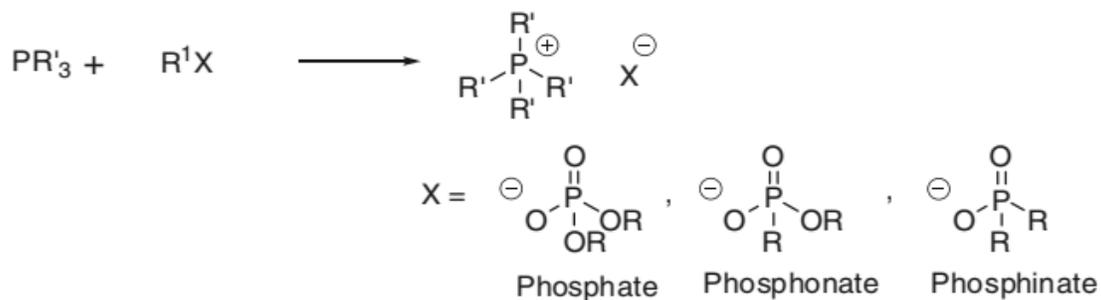


Figura 17. Extracto de síntesis de Líquidos Iónicos por síntesis sin halógenos de base fosforo. [15]

c) Líquidos iónicos basados en el azufre

La síntesis directa de líquidos iónicos basados en azufre se ha desarrollado como un método sintético útil para obtener los líquidos iónicos libres de halógenos, pueden dividirse en dos secciones: (a) líquidos iónicos a base de sulfonato y (b) líquidos iónicos a base de sulfato (Figura 18). Las sales basadas en sulfatos son más comunes que los sulfonatos.

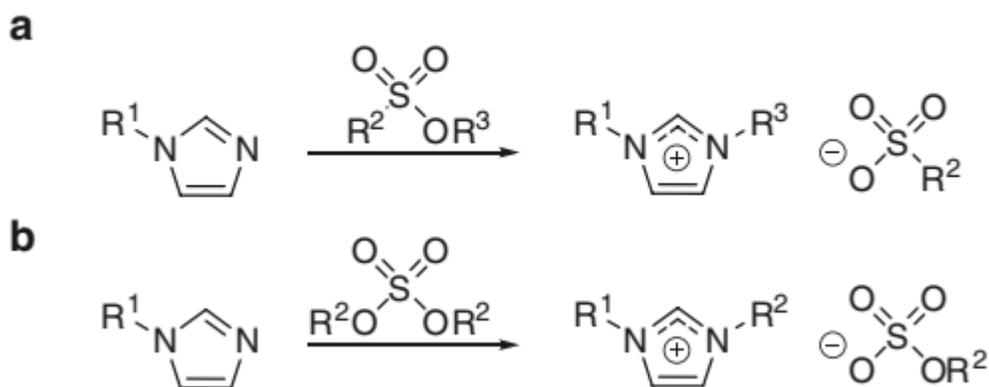


Figura 18. Líquidos iónicos producidos de sulfato y sulfonato [15].

3.2.5 Líquidos Iónicos Próticos

Los líquidos iónicos próticos (LIP) se forman por transferencia de protones entre una mezcla equimolar de un ácido y una base de Brønsted. La principal diferencia entre los Líquidos Iónicos Próticos y otros Líquidos Iónicos es la presencia de este protón intercambiable, esto puede producir enlaces de hidrógeno entre el ácido y la base y, en algunos casos, una red extendida de enlaces de Hidrógeno. Suponiendo que el ácido y la base de origen estén en un estado muy puro, el proceso de neutralización ácido/básico puede producir directamente un líquido iónico altamente puro.

3.4 Casos Especiales

3.4.1 Líquidos iónicos basados en metales

Los líquidos iónicos con aniones que contienen metales de transición fueron los primeros desarrollados a temperatura ambiente. Los líquidos iónicos basados en metales de transición se han sintetizado por reacción de haluros de fosfonio o imidazolio con los haluros metálicos correspondientes, o bien por metátesis con sales alcalinas de los aniones metálicos. La síntesis de sales de base metálica puede dividirse en tres grupos: sales de metales de transición, sales de metales del bloque p y sales de metales del bloque f.

Los líquidos iónicos basados en Co y Ni pueden sintetizarse directamente mezclando el cloruro metálico correspondiente con [C₂mim]Cl (Cloro-Dimetilimidazolio) bajo una atmósfera inerte. Los aniones de cloruro metálico interactúan con los hidrógenos del anillo de imidazolio para formar una red de enlaces de hidrógeno (Figura 20).

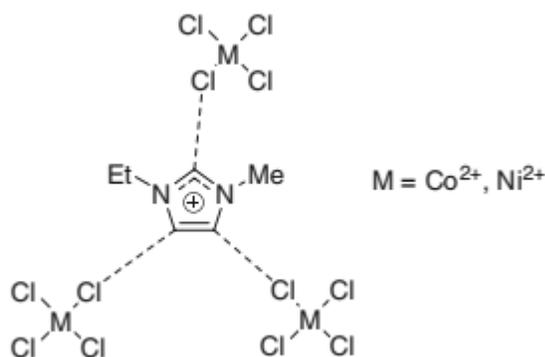


Figura 19. Líquido Iónico basado en -Co, -Ni [15].

3.4.2 Líquidos iónicos funcionalizados

“Durante los últimos 8 años, se han diseñado varios tipos de líquidos iónicos con una estructura funcionalizada los cuales son clasificados expresamente como líquidos iónicos específicos para una tarea como la

catálisis, la síntesis orgánica, la separación de materiales específicos, así como para la construcción de materiales de nanoestructura y materiales conductores de iones, etc.” (Clare, et al, P. 7, 2009). Las sales se definen como líquidos iónicos funcionalizados (Figura 21) cuando son líquidos iónicos en los que un grupo funcional está unido covalentemente a el catión, el anión, o una forma zwitteriónica (ion dipolar, eléctricamente neutro) de la sal. Normalmente es el catión el que lleva la fracción reactiva. Son pocos los casos en los que el anión constituye el constituyente activo, hasta hace poco, el método utilizado para incorporar la funcionalidad al líquido iónico era casi siempre el desplazamiento del haluro de un haluro orgánico que contenía el grupo funcional por un imidazol matriz, fosfina, etc.



Figura 21. Ejemplo de una molécula y sustituyentes para un líquido iónico funcionalizado [15]

3.5 Clasificación Y Características De Inhibición De Algunos Líquidos Iónicos

3.5.1 Líquidos Iónicos A Base De Imidazol

El grupo imidazol denota un compuesto orgánico heterocíclico cuya molécula contiene un anillo heteroaromático de cinco miembros de dos átomos de nitrógeno no adyacentes, que un átomo de carbono se coloca entre dos átomos de nitrógeno. El azol es un grupo de compuestos

orgánicos que contienen un átomo de nitrógeno y uno o más átomos que no son de carbono (es decir, oxígeno, azufre o nitrógeno). El compuesto de imidazol se llama 1,3-diazol en la nomenclatura IUPAC. Debido a su alta polaridad, son muy solubles en agua.

Los derivados líquidos iónicos basados en imidazol son uno de los compuestos azólicos más excelentes, que se han utilizado más ampliamente como inhibidores de la corrosión para diferentes metales y / o aleaciones en medios agresivos variantes debido a que tienen la región N = CN en el anillo de imidazol como sitio activo para el proceso de adsorción de compuestos inhibidores de imidazol.

Entre las muchas investigaciones existentes se reveló que los inhibidores a base de imidazol protegen de la corrosión a través de la adsorción, se aprecia que la mayoría de los compuestos se adsorben sobre la superficie de la muestra con fisiorción y / o quimisorción, aunque el tipo de adsorción dominante es químico, proceso en la interfaz solución / metal. De acuerdo con los resultados de la técnica de polarización, el inhibidor líquido iónico basado en imidazol se clasifica como un inhibidor de tipo mixto (Ardakani, et al 2021).

“El mecanismo de inhibición de la corrosión de los líquidos iónicos a base de azol se basa en el proceso de adsorción de las moléculas inhibitoras de líquidos iónicos sobre la superficie del metal / aleación y, a continuación, la formación de una capa protectora en la superficie.” (Ardakani, Et al, 2021).

3.5.2 Líquidos Iónicos A Base De Triazolio Y

Tiazolio

Los compuestos de triazolio se refieren a cualquiera de los compuestos catiónicos heterocíclicos que contienen un anillo de cinco miembros de tres

átomos de nitrógeno y dos átomos de carbono y una carga positiva sobre un átomo de nitrógeno. Por técnica de polarización potenciodinámica indica que estos compuestos se comportan como inhibidores de tipo mixto. Y que el efecto del tamaño del anión se muestra en el mecanismo de inhibición del proceso de adsorción, en el que los aniones se adsorben en la superficie positiva de la aleación.

El tiazolio es otra clase de compuestos azólicos catiónicos que contiene un átomo de nitrógeno y un átomo de azufre en la posición 3 del sistema de anillo de cinco miembros con tres átomos de carbono. Este tipo mostró que las moléculas inhibidoras actuaban de manera excelente y mostraban una propiedad inhibidora de tipo mixto. Su proceso de inhibición es por adsorción en la superficie del acero mediante quimisorción que obedece a la isoterma de adsorción de Langmuir (Ardakani, et al 2021).

3.5.3 Líquidos Iónicos A Base De Indolio Y Pirrolidinio

Los líquidos iónicos a base de indolio y pirrolidinio son otros compuestos utilizados como inhibidores de la corrosión en soluciones corrosivas. Los compuestos de indolio son estructuras catiónicas bicíclicas que se componen de un anillo pirrol de cinco miembros fusionado con un anillo benceno de seis miembros. Además, los compuestos de pirrolidinio contienen cuatro átomos de carbono y un átomo de nitrógeno positivo unidos en un anillo saturado de cinco miembros. Estos inhibidores inhiben el proceso de corrosión del metal o la aleación mediante su adsorción fisicoquímica en la superficie que sigue el modelo de isoterma de adsorción de Langmuir. Los líquidos iónicos de esta clase se comportaron principalmente como inhibidores de tipo mixto.

3.5.4 Líquidos Iónicos A Base De Piridinio, Picolinio Y Piperidinio

Los líquidos iónicos basados en piridinio, picolinio y piperidinio son otros tres tipos de compuestos utilizados como inhibidores de la corrosión. Los tres grupos catiónicos mencionados se han derivado de los compuestos de piridina. El piridinio es un compuesto catiónico heterocíclico que contiene un anillo de seis miembros con cinco átomos de carbono y un átomo de nitrógeno en el anillo. El anillo de piridinio es aromático y tiene seis electrones π en un sistema orbital π cíclico y conjugado que están deslocalizados sobre el anillo.

El método de inhibición se basa en el proceso de adsorción del inhibidor obedecido al modelo de isoterma de adsorción de Langmuir con una naturaleza de fisiorción predominante. Resultados de la polarización indicaron que el inhibidor se puede clasificar de tipo mixto predominantemente catódico que bloquean ambos sitios de la reducción catódica y la disolución del metal anódico.

En resumen, los inhibidores de líquidos iónicos basados en piridinio, piperidinio y picolinio se vuelven eficaces mediante el proceso de adsorción sobre la superficie del metal en el que el heteroátomo N y/o los electrones π de enlaces múltiples actúan como centros activos de adsorción (Ardakani, et al 2021).

3.5.5 Líquidos Iónicos A Base De Tiazinio Y Piridazinio

El compuesto líquido iónico a base de tiazinio es otro compuesto utilizado como inhibidor de la corrosión en la solución ácida corrosiva. El tiazinio es otro compuesto orgánico catiónico que consta de un anillo insaturado de

seis miembros que contiene un átomo de azufre, un nitrógeno y cuatro átomos de carbono.

Algunos de los líquidos iónicos basados en piridazinio inhiben la corrosión de superficies metálicas mediante un proceso de adsorción eficaz sobre las superficies en las que existen interacciones entre los sitios activos de la aleación y / o superficies metálicas y los electrones de par libre de los heteroátomos y electrones π de los enlaces múltiples y los ciclos aromáticos.

3.5.6 Líquidos Iónicos A Base De Amonio

Los líquidos iónicos a base de amonio son otro grupo de compuestos de IL cuya acción se ha investigado de forma relativamente extensa como inhibidores de la corrosión para muestras de metales y / o aleaciones sumergidas en diversos medios agresivos.

Los datos de polarización en moléculas a base de amonio indican que actúan como inhibidores de tipo mixto. Estas moléculas a base de amonio inhiben la corrosión del metal a través de la adsorción (fisiquimisorción) en la interfaz de solución que se ajustaron bien con la isoterma de adsorción de Temkin.

Estas moléculas inhibidoras de liquido iónico bloquean los sitios activos sobre la superficie del metal mediante un proceso de adsorción efectivo debido a las interacciones entre los electrones libres de los heteroátomos y los electrones n de los enlaces múltiples, y los sitios activos en la superficie del metal (Ardakani, et al 2021).

3.5.7 Líquidos Iónicos A Base De Aminoácidos Y Fosfonio

El aminoácido es cualquiera de un grupo de compuestos orgánicos que comprenden un grupo amina y un grupo funcional carboxilo ácido (-

COOH), así como una cadena lateral (grupo R orgánico) específico para el aminoácido individual. La diferencia entre la estructura química particular de la R ha llevado a la diferencia entre los aminoácidos. Se pueden clasificar de muchas formas, como el tipo de grupo de cadena lateral, los grupos funcionales estructurales centrales, el nivel de pH o la polaridad. Hay compuestos líquidos iónicos donde el grupo de aminoácidos se coloca en la estructura del anión. Estas estructuras se denominan líquidos iónicos a base de aminoácidos.

Los resultados de la polarización potenciodinámica mostraron que las moléculas de líquidos iónicos basadas en aminoácidos se comportan principalmente como de tipo mixto con anódica dominante. La fisisorción sobre la superficie del metal siguió el modelo de isoterma de Frundlich (Ardakani, et al 2021).

3.6 Mecanismo General De Inhibición De Líquidos Iónicos

El mecanismo de los líquidos iónicos es similar a la mayoría de los inhibidores de corrosión orgánica. En este caso el mecanismo de inhibición de los líquidos iónicos depende de la estructura de las moléculas. De acuerdo con Fernández, et al (2020), y para Rbaa, et al (2020), la mayoría de los mecanismos de inhibición se basan en la adsorción sobre la superficie del metal o aleación y sucesiva creación de una delgada película protectora que separa la superficie de la solución agresiva mediante fisisorción.

La fisisorción es un proceso de adsorción reversible por interacciones electrostáticas producidas por la fuerza de van der Waals débil entre cargas opuestas, formándose por la negativa de la superficie metálica y la

positiva de la molécula del líquido iónico), (Welker, 2012). En contraparte, la quimisorción es un proceso de adsorción mediante nuevos tipos de enlaces electrónicos fuertes que se crean mediante la transferencia de carga o el intercambio de las moléculas adsorbidas de los líquidos iónicos hacia la superficie del metal (Xing, & Pignatello 2005) u ocasionalmente a través de ambos simultáneamente.

La adsorción química a menudo se lleva a cabo en los casos en que las moléculas inhibidoras contienen al menos uno de los grupos funcionales polares y / o los heteroátomos (tales como P, N, O y S), y / o el electrón π y / o los enlaces múltiples conjugados (dobles o triples). Estas moléculas pueden donar o compartir sus pares de electrones en los heteroátomos. De esta manera, pueden ser adsorbidos químicamente en la interfaz del medio metal-corrosivo y este proceso juega un papel dominante en la eficiencia de los líquidos iónicos en el proceso de inhibición de la corrosión.

Varios factores, como la estructura electrónica de las moléculas inhibidoras, la naturaleza del electrolito, la cantidad de carga sobre la superficie del metal, el período de exposición, la naturaleza de los sustituyentes, la temperatura de los medios corrosivos, etc., pueden afectar el proceso de adsorción de los inhibidores de líquidos iónicos en las superficies corrosivas. La interacción entre las moléculas del líquido iónico y los átomos de superficie del metal o la aleación tiene una constante de equilibrio. La energía libre de Gibbs estándar (ΔG°) se calcula siguiendo la ecuación 9 de la constante de equilibrio (K).

$$\Delta G_{ads}^{\circ} = -RT \ln(55.5K_{ads}) \quad \text{Ecuación 9}$$

donde R, T y K representan la constante del gas ideal, la temperatura termodinámica y la constante de equilibrio del proceso de adsorción de moléculas de líquidos iónicos sobre la superficie, respectivamente.

Además, el número 55.5 muestra la concentración de agua en el medio de solución a temperatura ambiente y en la unidad molar (Ardakani, et al, 2012).

Ya que el proceso de adsorción es el mecanismo típico entre los diferentes líquidos iónicos que se utilizan para la inhibición de la corrosión metálica en presencia de medios agresivos, un ejemplo de tal proceso se puede apreciar en la Figura 16 entre un acero dulce o acero al carbono y un líquido iónico ante un medio corrosivo con HCl presente.

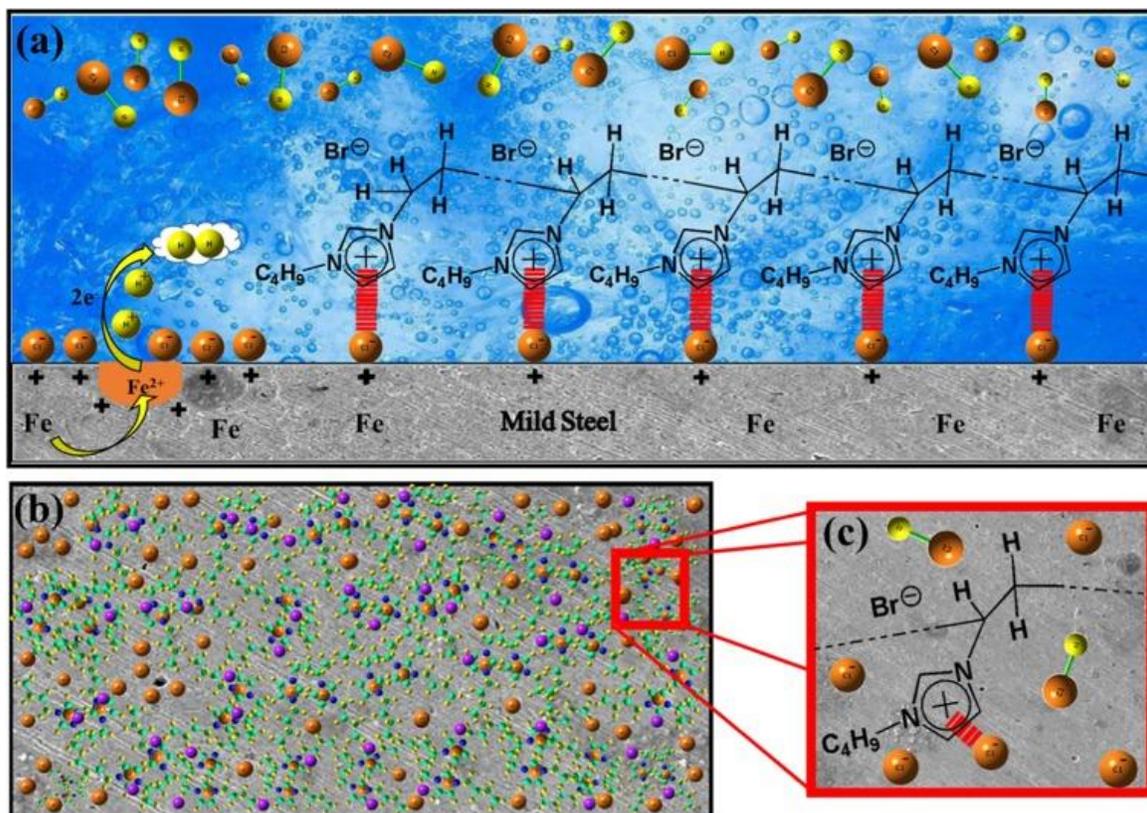


Figura 16. Ilustra las vistas lateral y superior del proceso de adsorción de un líquido iónico basado en imidazolio en la interfaz de la solución de HCl y la superficie de un acero al carbono (vista lateral (a) y superior (b), aumento (c) [16].

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La corrosión es uno de los principales problemas en todo tipo de industrias esto porque se presenta en los metales y aleaciones cuyo uso es de prácticamente total y de manera extendida, en especial el uso de aceros al carbono. Esta aleación es una clase de aceros con un porcentaje muy bajo de carbono en el hierro y que de acuerdo con el sistema de clasificación AISI/SAE son los comprendidos en el rango 10XX. Debido al uso extendido de los metales y del acero en cuestión, es de vital importancia encontrar maneras para proteger estas estructuras de los ambientes corrosivos a los cuales generalmente están expuestos incluso durante la limpieza de estos, en los que se ocupan solventes ácidos que ayudan a su deterioro aunado al causado por el medio ambiente. A través del documento se aborda un método de protección dentro de la familia de los inhibidores de la corrosión conocido como, líquidos iónicos que es una familia relativamente nueva que se presentan como amigables con el medio ambiente, sostenibles y con excelentes propiedades fisicoquímicas, ofreciendo una alta y completa protección a toda variedad de metales y aleaciones, dando prioridad en el presente trabajo al mencionado acero al carbono.

5. JUSTIFICACIÓN

Dado el problema persistente e inagotable de la corrosión presentado en el campo industrial, especialmente en los aceros al carbono, en el presente trabajo se busca analizar y evaluar el comportamiento de los diferentes tipos de líquidos iónicos, que hasta el momento de realización del presente trabajo se han utilizado y presentan resultados favorables que sean ante todo amigables con el medio ambiente, que son utilizados en la protección del acero al carbono, este "nivel" de protección será evaluado mediante el uso de técnicas electroquímicas confiables, utilizadas por los autores, para generar una tabla comparativa de las moléculas utilizadas como inhibidores, creando una reducida referencia de consulta, en donde se relaciona su naturaleza química con método de protección e inhibición.

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo General

Comparar los distintos tipos de líquidos iónicos para generar un catálogo de inhibidores de la corrosión, que son utilizados en la protección del acero al carbono que sean amigables con el medio ambiente.

6.2 Objetivo Particular

- Determinar si los líquidos iónicos son una alternativa viable en la protección del acero al carbono.
- Comparar las características de los líquidos iónicos y determinar los más eficaces en inhibición de la corrosión.
- Relacionar el método de inhibición de la molécula con la protección ofrecida en los distintos medios corrosivos.
- Analizar la estructura de las moléculas y su relación con el porcentaje de inhibición del metal protegido.
- Determinar los parámetros básicos que influyen en la elección del mejor líquido iónico a utilizar.

7. METODOLOGÍA DE TRABAJO

- a) Consulta de artículos relacionados a la evaluación electroquímica de líquidos iónicos como inhibidores de corrosión en acero.
- c) Estudio y comparativa de los medios y compuestos que existen como inhibidores de la corrosión, dando atención a los usados en acero al carbono.
- d) Comparar y analizar las diferentes técnicas electroquímicas utilizadas en la evaluación electroquímica tales como, Impedancia electroquímica (EIS), resistencia a la polarización lineal (LPR) y curvas de polarización (CP).
- e) Estudiar y comparar las propiedades de los líquidos iónicos como inhibidores de la corrosión y sus características ante los demás medios inhibidores.
- f) Hacer un cuadro comparativo de las moléculas orgánicas agrupándolos de acuerdo con su naturaleza química y relacionándolos con la corrosión y/o el mecanismo de inhibición.

8. RESULTADOS

A continuación, se enumera una lista de distintos autores que trabajaron con líquidos iónicos que componen el estado del arte hasta la fecha del presente documento en la inhibición de la corrosión del acero que sea amigable con el medio ambiente. En algunos casos el autor se repite debido a que el mismo autor utilizó una serie de diferentes líquidos iónicos para compararlos entre sí, o diferenciar sus características y propiedades, se conserva el nombre del compuesto como se encuentra reportado para facilitar la búsqueda de posterior información. En la tabla 3 se enumeran los compuestos, el medio donde fueron analizados, así como las técnicas electroquímicas utilizadas y el medio de inhibición presente:

1. Hanza, A. P., Naderi, R., et al. (2016), trabajaron con 1,4-di [1-methylene-3-methyl imidazolium bromide]-benzene en medio ácido H_2SO_4 1.0 M
2. Cao, S., Liu, D., et al. (2019) trabajaron con 1-(4-sulfonic acid) butyl-3-ethyl imidazolium hydrogen sulfate en medio ácido HCl 0.5 M
3. Cao, S., Liu, D., et al. (2019) trabajaron con and 1-(4-sulfonic acid) butyl-3-decyl imidazolium hydrogen sulfate en medio ácido HCl 0.5 M
4. Zehra, S., et al (2021) trabajaron con glycine propyl es-ter lauryl sulfate (GlyC3LS), en medio ácido HCl 1.0 M
5. Zehra, S., et al (2021) trabajaron con glutamic acid propyl ester lauryl sulfate (GluC3LS) en medio ácido HCl 1.0 M
6. Tawfik, S. M. (2016), trabajo con N1, N1, N1, N2, N2, N2-hexadecylethane-1,2-diaminium bromide (G2IL), en medio ácido HCl 1.0 M
7. Tawfik, S. M. (2016), trabajo con N1, N1, N1, N2, N2, N2-hexadecylpropane-1,3-diaminium bromide (G3IL), en medio ácido HCl 1.0 M

8. Tawfik, S. M. (2016), trabajo con N1, N1, N1, N2, N2, N2-hexadecylhexane-1,6-diaminium bromide (G6IL), en medio ácido HCl 1.0 M
9. El-Hajjaji, F., et al (2018), trabajaron con 1-(6-ethoxy-6-oxohexyl)pyridazin-1-ium bromide (S1) en medio ácido HCl 1.0 M
10. El-Hajjaji, F., et al (2018), trabajaron con 1-(2-bromoacetyl)pyridazinium bromide (S2) en medio ácido HCl 1.0 M
11. Arellanes-Lozada, P., et al (2018) trabajaron con Methyltrioctylammonium methyl sulfate en medio ácido HCl 1.0 M
12. Arellanes-Lozada, P., et al (2018) trabajaron con Trimethyltetradecylammonium methyl sulfate en medio ácido HCl 1.0 M
13. Luna, M. C., et al (2019) trabajaron con 1-ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate (EMIM)+(SCN)- en medio ácido de H₂SO₄ 0.5 M
14. Pancharatna, P. D., et al (2019) trabajaron con 3-(4-fluorobenzyl)-1-methyl-1H-imidazol-3-ium bromide [FBMIm]Br en medio ácido de H₂SO₄ 0.5 M
15. Likhanova, N. V., et al (2019) trabajaron con N-ethyl-N, N, N-trihexylammonium adipate (CPA6) en medio ácido H₂SO₄ 1.0 M
16. Likhanova, N. V., et al (2019) trabajaron con N-ethyl-N, N, N-trioctylammonium ethyl sulfate (ESA8) en medio ácido H₂SO₄ 1.0 M
17. Al-Rashed, O. A., et al (2019) trabajaron con 1-ethyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate (EMIMPF6) en medio ácido HCl 1.0 M
18. Al-Rashed, O. A., et al (2019) trabajaron con 1-methyl-3-pentylimidazolium Al-Rashed, O. A., et al (2019) trabajaron con hexafluorophosphate (PenMIMPF6) en medio ácido HCl 1.0 M
19. Al-Rashed, O. A., et al (2019) trabajaron con 1-methyl-3-octylimidazolium hexafluorophosphate (OctMIMPF6) en medio ácido HCl 1.0 M
20. Al-Rashed, O. A., et al (2019) trabajaron con 1-Octylpyridinium hexafluorophosphate (OctpyPF6) en medio ácido HCl 1.0 M
21. Al-Rashed, O. A., et al (2019) trabajaron con 1-Methyl-1-octylpyrrolidinium hexafluorophosphate (OctMpyrPF6) en medio ácido HCl 1.0 M

22. Al-Rashed, O. A., et al (2019) trabajaron con 1-Methyl-1-octyl-pyrrolidinium thiocyanate (OctMpyrSCN) en medio ácido HCl 1.0 M
23. Al-Rashed, O. A., et al (2019) trabajaron con 1-Methyl-1-octyl-pyrrolidinium dicyanamide (OctMpyrN(CN)₂) en medio ácido HCl 1.0 M
24. Aslam, et al, (2020) trabajaron con L-Phenyl Al-anine methyl ester saccharinate ([PheME][Sac]) en medio ácido HCl 1.0 M
25. Aslam, et al, (2020) trabajaron con L-Leucine methyl ester saccharinate ([LeuME][Sac]) en medio ácido HCl 1.0 M
26. Aslam, et al, (2020) trabajaron con L-Alanine methyl ester saccharinate ([AlaME][Sac]) en medio ácido HCl 1.0 M
27. Zeng, X., et al (2021) trabajaron con 1-propyl-3-methylimidazolium bromide ([PrMIm]Br) en medio ácido HCl 1.0 M
28. Zeng, X., et al (2021) trabajaron con 1-aminopropyl-3-methylimidazolium bromide ([APMIm]Br) en medio ácido HCl 1.0 M
29. Zeng, X., et al (2021) trabajaron con 1,4-bis(3-methylimidazolium-1-yl)butane dibromide ([BMImB]Br₂) en medio ácido HCl 1.0 M
30. Verma, C., et al. (2018) trabajaron con 2-hydroxyethyl-trimethylammonium chloride [Chl][Cl] en medio ácido HCl 1.0 M
31. Verma, C., et al. (2018) trabajaron con 2-hydroxyethyl-trimethylammonium iodide [Chl][I] en medio ácido HCl 1.0 M
32. Verma, C., et al. (2018) trabajaron con 2-hydroxyethyl-trimethylammonium acetate [Chl][Ac] en medio ácido HCl 1.0 M
33. Feng, L., et al (2018) trabajaron con 1-vinyl-3-methylimidazolium iodide ([VMIM]I) en medio ácido de H₂SO₄ 0.5 M
34. Feng, L., et al (2018) trabajaron con 1-vinyl-3-propylimidazolium iodide ([VPIM]I) en medio ácido de H₂SO₄ 0.5 M
35. Feng, L., et al (2018) trabajaron con 1-vinyl-3-butylimidazolium iodide ([VBIM]I) en medio ácido de H₂SO₄ 0.5 M
36. Guo, Y., et al (2018) trabajaron con 1-hydroxyethyl-2-methylimidazolium hexafluorophosphate ([HOC₂MIm]PF₆) en medio ácido de HCl 1 M

37. Guo, Y. et al (2018) trabajaron con 1-hydroxyethyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl)imide ([[(HOC₂)MIm]NTF₂), en medio ácido de HCl 1 M
38. Singh, A., et al (2021) trabajaron con 1-Decyl-3-methylimidazolium chloride (DMIC) en medio ácido HCl 15%
39. Bhaskaran, Y., et al (2021) trabajaron con 3-(2,5-difluorobenzyl)-1-methyl-1H-imidazol-3-ium bromide [DFBMIm]Br en medio ácido H₂SO₄ 0.5 M
40. Hajjaji, F. E., et al, (2021) trabajaron con (E)-4-(2-(4-fluorobenzylidene)hydrazinecarbonyl)-1-propylpyridin-1-ium iodide (Ipyr-C₃H₇) en medio ácido HCl 1 M
41. Hajjaji, F. E., et al, (2021) trabajaron con (E)-4-(2-(4-fluorobenzylidene)hydrazinecarbonyl)-1-pentylpyridin-1-ium iodide (Ipyr-C₅H₁₁) en medio ácido HCl 1 M.

Tabla 3. Líquidos iónicos estudiados, medio corrosivo al que estuvo expuesto el metal, la técnica electroquímica para determinar la eficiencia y la concentración que proporciona la máxima protección al acero.

Líquido iónico	Medio corrosivo	Técnica electroquímica	Concentración	Eficiencia (%)	Proceso de inhibición
1,4-di [1-methylene-3-methyl imidazolium bromide]-benzene	H2SO4 1 M	EIS, Curvas de Polarización	600 ppm	86	Mixto - Adsorción en la superficie
1-(4-sulfonic acid) butyl-3-ethyl imidazolium hydrogen sulfate	HCl 0.5 M	EIS, Curvas de Polarización,	15 mM	80	Mixto - Adsorción en la superficie
1-(4-sulfonic acid) butyl-3-decyl imidazolium hydrogen sulfate	HCl 0.5 M	EIS, Curvas de Polarización	15 mM	97.9	Mixto - Adsorción en la superficie
glycine propyl es-ter lauryl sulfate (GlyC3LS)	HCl 1 M	Pérdida de peso, EIS	100 ppm	98.64	Mixto - Adsorción química
glutamic acid propyl ester lauryl sulfate (GluC3LS)	HCl 1 M	Pérdida de peso, EIS	100 ppm	99.81	Mixto - Adsorción química
N1, N1, N1, N2, N2, N2-hexadodecylethane-1,2-diaminium bromide (G2IL)	HCl 1 M	Pérdida de peso, EIS, Curvas de Polarización	0.005 M	90.55	Mixto - Adsorción en la superficie
N1, N1, N1, N2, N2, N2-hexadodecylpropane-1,3-diaminium bromide (G3IL)	HCl 1 M	Pérdida de peso, EIS, Curvas de Polarización	0.005 M	92.41	Mixto - Adsorción en la superficie
N1, N1, N1, N2, N2, N2-hexadodecylhexane-1,6-diaminium bromide (G6IL)	HCl 1 M	Pérdida de peso, EIS, Curvas de Polarización	0.005 M	94.06	Mixto - Adsorción en la superficie
1-(6-ethoxy-6-oxohexyl) pyridazin-1-ium bromide (S1)	HCl 1 M	EIS	0.001 M	84	Mixto - Adsorción en la superficie
1-(2-bromoacetyl) pyridazinium bromide (S2)	HCl 1 M	EIS	0.001 M	82	Mixto - Adsorción en la superficie
Methyltrioctylammonium methyl sulfate (TMA)	HCl 1 M	EIS, Curvas de Polarización, Rp	100 ppm	92	Mixto - Fisorción en acero

Trimethyltetradecylammonium methyl sulfate (TTA)	HCl 1 M	EIS, Curvas de Polarización, Rp	10 ppm	94	Mixto - Fisorción en acero
1-ethyl-3- methylimidazolium thiocyanate (EMIM)+(SCN)-	H2SO4 0.5 M	Pérdida de peso, EIS, Curvas de Polarización, OCP (potencial de circuito abierto)	75 ppm	90.1	Mixto – Quimisorción en la superficie
3-(4-fluorobenzyl)-1-methyl-1H-imidazol-3-ium bromide [FBMIm]Br	H2SO4 0.5 M	EIS, Curvas de Polarización	0.01 M	98.9	Mixto – Adsorción en la superficie
N-ethyl-N,N,N-trihexylammonium adipate (CPA6)	H2SO4 1 M	Pérdida de peso, Rp, Curvas de Polarización	100 ppm	73	Mixto – Adsorción en la superficie
N-ethyl-N,N,N-trioctylammonium ethyl sulfate (ESA8)	H2SO4 1 M	Pérdida de peso, Rp, Curvas de Polarización	100 ppm	83	Mixto – Adsorción en la superficie
1-ethyl-3-methyl-imidazolium hexafluorophosphate (EMIMPF6)	HCl 1 M	EIS, Curvas de Polarización	0.005 M	82.95	Mixto – Adsorción en la superficie
1-methyl-3-pentyl-imidazolium hexafluorophosphate (PenMIMPF6)	HCl 1 M	EIS, Curvas de Polarización	0.005 M	87.6	Mixto – Adsorción en la superficie
1-methyl-3-octyl-imidazolium hexafluorophosphate (OctMIMPF6)	HCl 1 M	EIS, Curvas de Polarización	0.005 M	94.62	Mixto – Adsorción en la superficie
1-Octylpyridinium hexafluorophosphate (OctpyPF6)	HCl 1 M	EIS, Curvas de Polarización	0.005 M	92.23	Mixto – Adsorción en la superficie
1-Methyl-1-octyl-pyrrolidinium hexafluorophosphate (OctMpyrPF6)	HCl 1 M	EIS, Curvas de Polarización	0.005 M	93.94	Mixto – Adsorción en la superficie
1-Methyl-1-octyl-pyrrolidinium thiocyanate (OctMpyrSCN)	HCl 1 M	EIS, Curvas de Polarización	0.005 M	95.74	Mixto – Adsorción en la superficie
1-Methyl-1-octyl-pyrrolidinium dicyanamide (OctMpyrN(CN)2)	HCl 1 M	EIS, Curvas de Polarización	0.005 M	96.21	Mixto – Adsorción en la superficie

L-Phenyl Al-anine methyl ester saccharinate ([PheME][Sac])	HCl 1 M	Pérdida de peso, EIS, Rp, Curvas de Polarización	200 ppm	86.19	Mixto – Adsorción en la superficie
L-Leucine methyl ester saccharinate ([LeuME][Sac])	HCl 1 M	Pérdida de peso, EIS, Rp, Curvas de Polarización	200 ppm	79.79	Mixto – Adsorción en la superficie
L-Alanine methyl ester saccharinate ([AlaME][Sac])	HCl 1 M	Pérdida de peso, EIS, Rp, Curvas de Polarización	200 ppm	73.01	Mixto – Adsorción en la superficie
1-propyl-3-methylimidazolium bromide ([PrMIm]Br),	H2SO4 0.5 M	Pérdida de peso, EIS, Curvas de Polarización	10 mM	86.4	Mixto – Adsorción en la superficie
1-aminopropyl-3-methylimidazolium bromide ([APMIm]Br)	H2SO4 0.5 M	Pérdida de peso, EIS, Curvas de Polarización	10 mM	60.4	Mixto – Adsorción en la superficie
1,4-bis(3-methylimidazolium-1-yl) butane dibromide ([BMImB]Br2)	H2SO4 0.5 M	Pérdida de peso, EIS, Curvas de Polarización	10 mM	91	Mixto – Adsorción en la superficie
2-hydroxyethyl-trimethyl-ammonium chloride [Ch][Cl]	HCl 1 M	Pérdida de peso, EIS	0.001719 M	95.2	Mixto – Adsorción en la superficie
2-hydroxyethyl-trimethyl-ammonium iodide [Ch][I]	HCl 1 M	Pérdida de peso, EIS	0.001719 M	95.74	Mixto – Adsorción en la superficie
2-hydroxyethyl-trimethyl-ammonium acetate [Ch][Ac]	HCl 1 M	Pérdida de peso, EIS	0.001719 M	96.06	Mixto – Adsorción en la superficie
1-vinyl-3-methylimidazolium iodide ([VMIM]I)	H2SO4 0.5 M	Pérdida de peso, Curvas de polarización, EIS	5 mM	94.1	Mixto – Quimisorción en la superficie
1-vinyl-3-propylimidazolium iodide ([VPIM]I)	H2SO4 0.5 M	Pérdida de peso, Curvas de polarización, EIS	5 mM	95.8	Mixto – Quimisorción en la superficie
1-vinyl-3-butylimidazolium iodide ([VBIM]I)	H2SO4 0.5 M	Pérdida de peso, Curvas de polarización, EIS	5 mM	96.5	Mixto – Quimisorción en la superficie

1-hydroxyethyl-3- 2011methylimidazolium	HCl 1M	EIS, Curvas de Polarización, OCP (potencial de circuito abierto)	16 mM	79.94	Mixto -Adsorción en la superficie del Fe
1-hydroxyethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide ((HOC2)MIm]NTF2)	HCl 1 M	EIS, Curvas de Polarización, OCP (potencial de circuito abierto)	16 mM	43.04	Mixto -Adsorción en la superficie del Fe
1-Decyl-3-methylimidazolium chloride (DMIC)	HCl 15%	Pérdida de peso, EIS, Curvas de Polarización	400 mM	68.61	Anódico -Adsorción en la superficie
3-(2,5-difluorobenzyl)-1-methyl-1H-imidazol-3-ium bromide [DFBMIm]Br	H2SO4 0.5 M	EIS, Rp, Curvas de Polarización	0.00001 M	98.67	Mixto -Adsorción en la superficie del Fe
(E)-4-(2-(4-fluorobenzylidene)hydrazinecarbonyl)-1-propylpyridin-1-ium iodide (Ipyr-C3H7)	HCl 1M	EIS, Curvas de Polarización, OCP (potencial de circuito abierto)	0.001 M	88.6	Anódico - Quimisorción en la superficie del Fe
(E)-4-(2-(4-fluorobenzylidene)hydrazinecarbonyl)-1-pentylpyridin-1-ium iodide (Ipyr-C5H11)	HCl 1M	EIS, Curvas de Polarización, OCP (potencial de circuito abierto)	0.001 M	87.6	Anódico - Quimisorción en la superficie del Fe

9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo es una investigación documental que recopila el estado del arte de los líquidos iónicos utilizados como inhibidores de la corrosión ecológicos en la protección específica del acero al carbono, aleación ampliamente utilizada en todo tipo de industria. Esta investigación se buscó realizar una tabla comparativa y de consulta acerca de estos inhibidores en la cual se indica el porcentaje o eficiencia, así como el tipo y mecanismo de inhibición.

De acuerdo con las investigaciones de los diversos autores que trabajaron con líquidos iónicos podemos observar que son una generación de inhibidores que están siendo estudiados ampliamente para conocer cuáles son las características, estructura y composición de aquellos que presentan la mejor protección a los metales.

En la actualidad existe una gran variedad de líquidos iónicos que se sintetizan por múltiples vías, lo que produce una multitud de moléculas y enantiómeros que se diferencian entre sí por sus características y eficiencias de protección que presentan, cada molécula presenta características únicas dando pie a un amplio abanico de posibilidades de uso, de protección a los sustratos metálicos, de temperatura de trabajo y del severidad del medio corrosivo.

Con los datos obtenidos en la investigación de los diferentes líquidos iónicos que está condensado en la tabla 3, se puede observar que estos compuestos tienen una mejor eficiencia mientras la concentración aumenta, esto a que se tiene una mayor cantidad de moléculas inhibidoras en el medio, y que proporcionarán la protección haciendo más eficaz el proceso, esto es mencionado por Arellanes-Lozada, et al (2018), Hanza,

et al (2016), Luna, et al (2019), entre otros, pero dicha concentración llega a un "límite".

Este límite está dado por las propiedades de los líquidos iónicos de adsorberse a la superficie, esta característica forma una capa protectora sobre el metal a proteger, que si se supera esta concentración optima, no se tendrá una mejora notable en la inhibición, a menos que se permita al liquido iónico crear una capa protectora de mayor grosor, lo que puede demorar horas y no mejorar con respecto a la cantidad óptima en el porcentaje de inhibición, y considerando los factores económicos utilizar una alta cantidad de reactivo no es rentable en usos industriales o constantes.

Como la eficiencia del inhibidor depende de la concentración, esta puede ser modificada para que a menores concentraciones aún proporcione la correcta inhibición que el proceso necesite y con un costo económico menor sin daños graves a largo plazo.

Algunos autores mostrados anteriormente trabajan con una serie de líquidos iónicos con ligeros cambios, sobre un sustrato metálico y en el mismo medio corrosivo, lo que cambia es estructura, la longitud de la cadena y algunos aniones, hacen estos cambios para estudiar la influencia de estas propiedades en la inhibición del sustrato metálico, con base en estas investigaciones se puede afirmar que una cadena más larga produce una protección mayor que una de menor longitud a igual concentración. (Verma, C., et al. 2018)

Estas modificaciones en la estructura de la molécula conllevan a cambios en su porcentaje de protección, como se puede ver en el caso de Al-Rashed, et al (2019) que tomando a un líquido iónico, al cual se le cambia la ubicación y tipo de sustituyentes a lo largo de la cadena, encontró que existe una mejor protección con una cadena más ramificada que una

cadena más simple en una misma concentración. En el caso de los líquidos iónicos con la misma longitud de anión y cadena alquílica, el catión imidazolio dio la mejor eficiencia de inhibición, seguido por el pirrolidinio y luego por el piridinio.

“El aumento de la longitud de la cadena alquílica facilita la formación de una película compacta en la interfaz acero/solución, lo que da lugar a una cobertura superficial pronunciada y a una mejor inhibición de la corrosión.” Al-Rashed, et al (2019)”

Entre la gran variedad de líquidos iónicos disponibles actualmente, los basados en imidazol han sido los más utilizados por su facilidad en su proceso de fabricación, costos accesibles y grandes propiedades.

De acuerdo con investigaciones de Arkadani, et al (2021), los líquidos iónicos basados en el imidazolio han sido los más utilizados. Estos compuestos actúan como inhibidores de la corrosión eficaces y excelentes, ya que, tienen los heteroátomos con pares de electrones libres (por ejemplo, O, S, N, P, etc.), el electrón pi (π), el sistema conjugado, y/o grupos funcionales polares.

Al Rashed et al (2019) estudiaron diferentes aniones, donde encontró que el anión Dicianamida ($-\text{N}(\text{CN})_2$) resultó ser el mejor para la protección del acero dulce en medios ácidos, seguido por el Tiocianato ($-\text{SCN}$) y luego aniones Hexafluorofosfato ($-\text{PF}_6$).

Se ha extendido exponencialmente el uso de líquidos iónicos como inhibidores de corrosión en comparación con los anteriores inhibidores volátiles y tóxicos tradicionales se basa en que poseen mejores propiedades como menor volatilidad, no inflamabilidad, naturaleza no tóxica, estabilidad química, alta solubilidad en los disolventes polares y su capacidad de adsorberse fácilmente en cualquier superficie metálica.

La gran mayoría de los autores describen el comportamiento de inhibición de los líquidos iónicos como una adsorción en las superficies metálicas. La adsorción de los líquidos iónicos sobre la superficie metálica da como resultado la formación de una película protectora que aísla los metales o aleaciones del entorno corrosivo y por lo tanto inhibe la corrosión.

Ya que el proceso de inhibición se produce por adsorción en la superficie que se debe proteger, otro parámetro a considerar es la propia superficie que proteger, es decir, la rugosidad que presenta la superficie es por ello por lo que Luna, et al (2018), pudo demostrar con su trabajo que a medida que aumenta la rugosidad de la superficie, aumenta la hidrofobicidad. Por lo tanto, el inhibidor será atraído más fácilmente a los planos más compactos (superficie lisa) que a los planos menos compactos o sueltos (superficie rugosa).

La razón detrás de este hecho puede explicarse a través de la relación entre la hidrofobicidad, que impide que el líquido permanezca en la superficie sólida durante un período prolongado y conduce a una menor exposición de la superficie sólida con el líquido al disminuir el área de contacto entre ellos, y la rugosidad de la superficie. (Kaya, et al 2016, como se citó en Luna, et al 2018)

Un ejemplo de mencionado se puede observar en la Figura 16 donde se muestra el proceso de adsorción que tiene una molécula que se basa en imidazolio y como evita el proceso de corrosión de un acero. Esto se produce cuando la molécula del líquido iónico se une a la superficie del metal (zona gris) evitando que se produzca el intercambio de las moléculas con los agentes corrosivos, (los iones cloruro del HCl). La adsorción e interacciones efectivas entre los átomos de la superficie de hierro y las moléculas de imidazolio (denotado con líneas rojas) provoca que se cubran los sitios activos del metal. Esto se produce cuando los pares de electrones

libres de los átomos de nitrógeno de las moléculas del líquido iónico tienen interacción efectiva con los orbitales de vacantes de los átomos de hierro.

10. CONCLUSIONES

Con la revisión bibliográfica realizada se pudo comprobar que los líquidos iónicos son excelentes inhibidores ecológicos y sostenibles de la corrosión de metales y aleaciones. La mayoría de los líquidos iónicos presentan un tipo de protección mixto, es decir, presentan cualidades de protección anódica y catódica en su protección del metal. Debido al tipo de protección los vuelve inhibidores completos y con una amplia cantidad de usos en la protección de aleaciones ferrosas o no ferrosas. El nivel de protección que otorgan esta clase de compuestos depende directamente de la concentración que se tenga en el medio que se desea proteger. Sin embargo, la concentración requerida de los inhibidores es mínima, ya que, se requieren en cantidades de milimolar o de partes por millón para la protección.

Un líquido iónico al variar su concentración dentro del medio otorga niveles distintos de protección que favorecen su uso en concentraciones más bajas con aceptables niveles de protección. La amplia utilización de los líquidos iónicos además de ser ecológicos es debida a que se adsorben en la superficie del metal formando una película protectora muy estable, la cual puede aumentar de grosor relacionado directamente con la concentración del líquido iónico. Finalmente, la capa que se forma por la adsorción del líquido iónico a la superficie es fácilmente explicable mediante análisis de superficie, Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), cálculos químicos cuánticos, o isothermas de adsorción, métodos utilizados ampliamente por los autores consultados.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, A. P., Frisch, G., & Ryder, K. S. (2013). Electroplating using ionic liquids. *Annual Review of Materials Research*, 43, 335-358.
- Al-Rashed, O. A., & Nazeer, A. A. (2019). Ionic liquids with superior protection for mild steel in acidic media: effects of anion, cation, and alkyl chain length. *Journal of Molecular Liquids*, 288, 111015.
- Ardakani, E. K., Kowsari, E., Ehsani, A., & Ramakrishna, S. (2021). Performance of all Ionic Liquids as the eco-friendly and sustainable compounds in inhibiting corrosion in various media: a comprehensive review. *Microchemical Journal*, 106049.
- Arellanes-Lozada, P., Olivares-Xometl, O., Likhanova, N. V., Lijanova, I. V., Vargas-García, J. R., & Hernández-Ramírez, R. E. (2018). Adsorption and performance of ammonium-based ionic liquids as corrosion inhibitors of steel. *Journal of Molecular Liquids*, 265, 151-163.
- Aslam, R., Mobin, M., Shoeb, M., Murmu, M., & Banerjee, P. (2021). Proline nitrate ionic liquid as high temperature acid corrosion inhibitor for mild steel: Experimental and molecular-level insights. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*.
- Aslam, R., Mobin, M., Obot, I. B., & Alamri, A. H. (2020). Ionic liquids derived from α -amino acid ester salts as potent green corrosion inhibitors for mild steel in 1M HCl. *Journal of Molecular Liquids*, 318, 113982.
- Bhaskaran, Y., Pancharatana, P. D., Sharma, R. K., Kaur, G., Lata, S., & Singh, G. (2021). To evaluate an ionic liquid for anticorrosive impact on iron-carbon steel: synthesis, computational and experimental mechanism. *Chemical Papers*, 75(2), 789-803.40
- Cao, S., Liu, D., Ding, H., Wang, J., Lu, H., & Gui, J. (2019). Task-specific ionic liquids as corrosion inhibitors on carbon steel in 0.5 M HCl solution: an experimental and theoretical study. *Corrosion Science*, 153, 301-313.
- Canovas López, F.A. (2013), "Selección de nuevos tipos de inhibidores de la corrosión de los aceros S355J2N y 80HLES" [Título Profesional,

Universidad Politécnica de Cartagena] Recuperado el 13/10/2021 de <https://is.gd/IyzOcb>

- Castagnino, J. M. (2005). Premio Nobel de Química 2005 Metátesis. Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana, 39 (4),421-422. [Consultada el 09/07/2022]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53539401>
- Chauhan, D. S., Quraishi, M. A., & Qurashi, A. (2021). "Recent trends in environmentally sustainable Sweet corrosion inhibitors". Journal of Molecular Liquids, 326, 115117.
- Cicek, V. (2014). "Corrosion engineering". John Wiley & Sons. Recuperado el 20/09/2021 de <https://is.gd/zy4EML>
- Clare B., Sirwardana A. & MacFarlane D. R. (2009). Synthesis, Purification and Characterization of Ionic Liquids, En Kirchner B. Ed, Ionic Liquids Topics in Current Chemistry, vol. 290. (pp. 2 - 37) Springer Berlin, Heidelberg.
- Durán, E. L. (2007). Estudio electrocinético de la adsorción de iones en electrodos líquidos y sólidos mediante técnicas de impedancia y modulación de la capacitancia. Maestría, CIDETEQ, Queretaro, México.
- El-Hajjaji, F., Messali, M., Aljuhani, A., Aouad, M. R., Hammouti, B., Belghiti, M. E., & Quraishi, M. A. (2018). Pyridazinium-based ionic liquids as novel and green corrosion inhibitors of carbon steel in acid medium: electrochemical and molecular dynamics simulation studies. Journal of Molecular Liquids, 249, 997-1008.
- Eshkalak, S. K., Khatibzadeh, M., Kowsari, E., Chinnappan, A., & Ramakrishna, S. (2018). A novel surface modification of copper (II) phthalocyanine with ionic liquids as electronic ink. Dyes and Pigments, 154, 296-302.
- Feng, L., Zhang, S., Qiang, Y., Xu, S., Tan, B., & Chen, S. (2018). The synergistic corrosion inhibition study of different chain lengths ionic liquids as green inhibitors for X70 steel in acidic medium. Materials Chemistry and Physics, 215, 229-241.

- Fernandes, C. M., Pina, V. G., Alvarez, L. X., de Albuquerque, A. C. F., dos Santos Júnior, F. M., Barrios, A. M., ... & Ponzio, E. A. (2020). Use of a theoretical prediction method and quantum chemical calculations for the design, synthesis, and experimental evaluation of three green corrosion inhibitors for mild steel. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 599, 124857.
- Guo, Y., Chen, Z., Zuo, Y., Chen, Y., Yang, W., & Xu, B. (2018). Ionic liquids with two typical hydrophobic anions as acidic corrosion inhibitors. *Journal of Molecular Liquids*, 269, 886-895.
- Godínez, L. A., Meas, Y., Ortega-Borges, R., & Corona, A. (2003). Los inhibidores de corrosión. *Revista De Metalurgia*, 39 (2), 140-158.
- Gomez G. J. J. (2014). "Caracterización de ases mediante Espectroscopia de Impedancia del sistema CTAT/AGUA" [Tesis de Maestría, Universidad de Guadalajara] <https://is.gd/gEQC8z>
- Groysman, A. (2009). "Corrosion for everybody. Springer Science & Business Media."
- Hajjaji, F. E., Salim, R., Taleb, M., Benhiba, F., Rezki, N., Chauhan, D. S., & Quraishi, M. A. (2021). Pyridinium-based ionic liquids as novel eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in molar hydrochloric acid: Experimental & computational approach. *Surfaces and Interfaces*, 22, 100881.
- Hanza, A. P., Naderi, R., Kowsari, E., & Sayebani, M. (2016). Corrosion behavior of mild steel in H₂SO₄ solution with 1, 4-di [1'-methylene-3'-methyl imidazolium bromide]-benzene as an ionic liquid. *Corrosion Science*, 107, 96-106.
- Kirchner, B. (2009). *Ionic Liquids Topics in Current Chemistry Volume Editor*. Springer Germany.
- Likhanova, N. V., Arellanes-Lozada, P., Olivares-Xometl, O., Hernández-Cocoletzi, H., Lijanova, I. V., Arriola-Morales, J., & Castellanos-Aguila, J. E. (2019). Effect of organic anions on ionic liquids as corrosion inhibitors of steel in sulfuric acid solution. *Journal of Molecular Liquids*, 279, 267-278.

- Luna, M. C., Le Manh, T., Sierra, R. C., Flores, J. M., Rojas, L. L., & Estrada, E. A. (2019). Study of corrosion behavior of API 5L X52 steel in sulfuric acid in the presence of ionic liquid 1-ethyl 3-methylimidazolium thiocyanate as corrosion inhibitor. *Journal of Molecular Liquids*, 289, 111106.
- Mansfeld, F.; Shih, H.; Tsai, C.H.: Analysis of EIS data por common corrosion processes. Scully, J.R.; Silverman, D.C.; Kendig, M.W. (editors). *Electrochemical impedance. Analysis and interpretation*. Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1993.
- Mendoza F.J., Duran R. R. & Genescá L. J (2020) Notas de Espectroscopia de impedancia electroquímica en corrosión. IMP - UNAM
- M. E. Hunter & R. F. Baker (2019). Chapter 41 | Corrosion. In G. Totten, R. Shah, & D. Forester (Eds.), *MNL37-2ND-EB Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing*, 2nd Edition (pp. 1405-1416).
- Morales, U. P., Camargo, A. M., & Flórez, J. J. O. (2010). Impedancia electroquímica interpretación de diagramas típicos con circuitos equivalentes. *DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín*, 77(164), 69-75.
- Pancharatna, P. D., Lata, S., & Singh, G. (2019). Imidazolium based ionic liquid as an efficient and green corrosion constraint for mild steel at acidic pH levels. *Journal of Molecular Liquids*, 278, 467-476.
- Perez, N. (2016). *Electrochemical corrosion*. In *Electrochemistry and Corrosion Science* (455 pp.) Springer, Cham.
- Rbaa, M., Ouakki, M., Galai, M., Berisha, A., Lakhrissi, B., Jama, C., & Zarrouk, A. (2020). Simple preparation and characterization of novel 8-Hydroxyquinoline derivatives as effective acid corrosion inhibitor for mild steel: Experimental and theoretical studies. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 602, 125094.
- SAE International (2014), "Chemical Compositions of SAE Carbon Steels (J403-2014) https://www.sae.org/standards/content/j403_201406/

- Sánchez C. A (2014), "Estudio de distintos transductores gráficos en electrodos serigrafiados" [Tesis de maestría en Ciencias analíticas y bioanalíticas, Universidad de Oviedo] <https://is.gd/ur9oAF>
- Seal, S., Sapre, K., Kale, A., Desai, V., Gopal, M., & Jepson, P. (2000). Effect of multiphase flow on corrosion of C-steel in presence of inhibitor: a surface morphological and chemical study. *Corrosion science*, 42(9), 1623-1634.
- Singh, A., Ansari, K. R., Quraishi, M. A., & Banerjee, P. (2021). Corrosion inhibition and adsorption of imidazolium based ionic liquid over P110 steel surface in 15% HCl under static and dynamic conditions: Experimental, surface, and theoretical analysis. *Journal of Molecular Liquids*, 323, 114608.
- Singh, D. K., Kumar, S., Udayabhanu, G., & John, R. P. (2016). "4 (N, N-dimethylamino) benzaldehyde nicotinic hydrazone as corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl solution: an experimental and theoretical study". *Journal of molecular liquids*, 216, 738-746.
- Stern, M., & Geary, A. L. (1957). Electrochemical polarization: I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves. *Journal of the electrochemical society*, 104(1), 56.
- Tawfik, S. M. (2016). Ionic liquids based gemini cationic surfactants as corrosion inhibitors for carbon steel in hydrochloric acid solution. *Journal of molecular liquids*, 216, 624-635.
- Total Materia (2011), "Introduction to the SAE-AISI Designation System" Recuperado el 12/10/2021 de <https://is.gd/JYQokc>
- Torriero, A. A. (2015). *Electrochemistry in ionic liquids*, Vol. 1. Fundamentals Switzerland: Springer.
- Verma, C., Ebenso, E. E., & Quraishi, M. A. (2018). Ionic liquids as green corrosion inhibitors for industrial metals and alloys. *Green Chemistry*. Hosam El-Din M. Saleh y Martin Koller, IntechOpen, DOI: 10.5772 / interchopen.70421.
- Verma, C., Obot, I. B., Bahadur, I., Sherif, E. S. M., & Ebenso, E. E. (2018). Choline based ionic liquids as sustainable corrosion inhibitors on mild steel

surface in acidic medium: gravimetric, electrochemical, surface morphology, DFT and Monte Carlo simulation studies. *Applied Surface Science*, 457, 134-149.

- Welker, R. W. (2012). Basics and sampling of particles for size analysis and identification. In *Developments in Surface Contamination and Cleaning* (pp. 1-80). William Andrew Publishing.
- Xing, B., & Pignatello, J. J. (2005). *SORPTION Organic Chemicals*.
- Zehra, S., Mobin, M., Aslam, R., Lgaz, H., & Chung, I. M. (2021). Assessment of biodegradable glycine and glutamic acid based ionic liquids as mild steel corrosion inhibitors in acid solution: an experimental and theoretical approach. *Journal of Molecular Structure*, 1240, 130505.
- Zeng, X., Zheng, X., Guo, L., Xu, Q., Huang, H., & Tan, B. (2021). Three imidazole ionic liquids as green and eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in sulfuric acid medium. *Journal of Molecular Liquids*, 324, 115063.

11.1 BIBLIOGRAFÍA DE FIGURAS

- [1] Swagelok (2021), "Tipos de Corrosión" Recuperado el 12/10/2021 de <https://is.gd/9ZbOL9>
- [2] Ing. Marítima (2016), "La corrosión" Recuperado el 12/10/2021 de <https://is.gd/mb51Gp>
- [3] Verma, C., Ebenso, E. E., & Quraishi, M. A. (2018). Ionic liquids as green corrosion inhibitors for industrial metals and alloys. *Green Chemistry*. Hosam El-Din M. Saleh y Martin Koller, IntechOpen, DOI: 10.5772 / interchopen.70421.
- [4] Electroquímica Mexicana S.A de C.V., "Control de H₂S" Recuperado el 19/09/2021 de <https://is.gd/GbAfYS>
- [5] Hernández N. M. A. (2019), "Corrosión en tuberías de revestimiento" Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [6] Mettler Toledo Group (2019), "Reducing Corrosion In the Hydrocarbon Processing Industry" Recuperado el 20/09/2021 de <https://is.gd/I9XUt4>

- [7] Total Materia (2011), "Introduction to the SAE-AISI Designation System"
Recuperado el 12/10/2021 de <https://is.gd/JYQokc>
- [8] Poursaee, A. (2010). Potentiostatic transient technique, a simple approach to estimate the corrosion current density and Stern–Geary constant of reinforcing steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(9), 1451-1458.
- [9] López, E. V. (2010). Uso de métodos electroquímicos como herramientas para evaluar parámetros de interfase en sistemas heterogéneos metal/medio acuoso. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, Tunja, Colombia.
- [10] EnergSoft (2020), "EIS - Electrochemical Impedance Spectroscopy"
Recuperado el 13/10/2021 de <https://is.gd/VuWYej>
- [11] Durán, E. L. (2007). Estudio electrocinético de la adsorción de iones en electrodos líquidos y sólidos mediante técnicas de impedancia y modulación de la capacitancia. Maestría, CIDETEQ, Querétaro, México.
- [12] Pérez, N. (2016). Electrochemical corrosion. In *Electrochemistry and Corrosion Science* (P 127.) Springer, Cham.
- [13] Mendoza F.J., Duran R. R. & Genescá L. J (2020) Notas de Espectroscopia de impedancia electroquímica en corrosión. IMP - UNAM
- [14] Fatemeh Moosavi (2013). The Structure of Supported Ionic Liquids at the Interface, *Ionic Liquids - New Aspects for the Future*, Jun-ichi Kadokawa, IntechOpen, Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/41932>
- [15] Kirchner, B. (2009). *Ionic Liquids Topics in Current Chemistry Volume* Editor. Springer Germany.
- [16] Ardakani, E. K., Kowsari, E., Ehsani, A., & Ramakrishna, S. (2021). Performance of all Ionic Liquids as the eco-friendly and sustainable compounds in inhibiting corrosion in various media: a comprehensive review. *Microchemical Journal*, 106049.