



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Unidad Azcapotzalco
División de Ciencias Básicas e Ingeniería

PROYECTO DE INTEGRACIÓN EN INGENIERÍA METALÚRGICA

**“FERMENTADO NATURAL DE AGAVE SALMIANA COMO
INHIBIDOR VERDE DE LA CORROSIÓN DEL ACERO API
5L X52 EN MEDIO ÁCIDO.”**

PRESENTA

Luis Manuel Silva Rosales

MATRÍCULA:

2133003051

ASESOR: Dr. Jorge Iván Aldana González

COASESOR: Dr. Mario Alberto Romero Romo

MÉXICO, CDMX

SEPTIEMBRE 2022

Datos del alumno

Nombre: Luis Manuel Silva Rosales

Datos del asesor

Nombre: Dr. Jorge Iván Aldana González

Área: Departamento de Materiales

Categoría: Profesor-Investigador

Nivel académico: Doctorado

Correo electrónico: jiag@azc.uam.mx

Datos del co-asesor

Nombre: Dr. Mario Alberto Romero Romo

Área: Departamento de Materiales

Categoría: Profesor-Investigador

Nivel académico: Doctorado

Correo electrónico: mmrr@azc.uam.mx

DECLARATORIA

Yo, Jorge Iván Aldana González, declaro que aprobé el contenido del presente reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Jorge Iván Aldana González, declaro que aprobé el contenido del presente reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Luis Manuel Silva Rosales, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento con título **FERMENTADO NATURAL DE AGAVE SALMIANA COMO INHIBIDOR VERDE DE LA CORROSIÓN DEL ACERO API 5L X52 EN MEDIO ÁCIDO** en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

AGRADECIMIENTOS

A las personas que fueron un apoyo incondicional para concluir este proyecto, en especial a mis asesores el Dr. Jorge Iván Aldana González y el Dr. Mario Alberto Romero Romo por haberme brindado su atención, asesorías y consejos para poder culminar de manera satisfactoria este proyecto, así como sus conocimientos y experiencia brindada para mi formación académica, pero más importante su sincera y verdadera amistad.

A María Fernanda por brindarme inspiración, al animarme a dar lo mejor de mí y ser una mejor persona, por ser un Sol en mis días y brindarme tanto en la vida.

A mis profesores pertenecientes a la carrera de Ingeniería Metalúrgica que me brindaron los conocimientos requeridos para mi formación profesional y el interés por el área de elección.

A mis compañeros y amigos que estuvieron en el proceso de mi formación dentro de la universidad y más aún en últimas fechas, por brindarme su compañía, apoyo y amistad. Lalo, Josie, Lu, Oliver, Carlos, Eva, Erick, Isaac, David, Are y demás que se encuentran en mi corazón.

A mi familia por darme el calor de su amor siempre presente y la confianza para poder concluir esta etapa de mi vida tan importante.

DEDICATORIA

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia, en especial a mis padres y hermano que me han apoyado en los momentos buenos y en los malos con total comprensión y amor. Gracias por enseñarme a afrontar aquellas dificultades que se presenten en mi camino con paciencia y sabiduría. Las mayores muestras de amor y cariño que me ha brindado la vida sin pedir nada a cambio. Por ser siempre un motor y una inspiración día con día para poder ser una persona íntegra, con valores y tener una misión en la vida.

También le dedico la culminación de este trabajo a María Fernanda. Por la paciencia, por la inspiración, por el apoyo incondicional, por todo el amor brindado, porque te quiero. Ya sea por casualidad o un regalo de la vida, llegar en este momento tan crucial en mi vida y brindarle tanta dicha, luz y felicidad a mi ser, es una bendición de la cuál estaré agradecido por siempre. Por ayudarme a alcanzar el equilibrio en mi vida que me permite dar todo de mí.

También le dedico este trabajo a Dios, por permitirme vivir cada día en plenitud y colmado de bendiciones.

ÍNDICE

1	RESUMEN	7
2	TABLA DE CONTENIDO	8
3	INTRODUCCIÓN	9
4	ANTECEDENTES	10
5	JUSTIFICACIÓN.....	15
5.1.	Social	15
5.2.	Científico y tecnológico	15
5.3.	Económico y ambiental	15
6	OBJETIVOS	16
6.1.	General	16
6.2.	Específicos	16
7	MARCO TEÓRICO.....	17
7.1.	Corrosión	17
7.1.1.	Tipos de corrosión	18
7.1.2.	Corrosión uniforme	19
7.1.3.	Corrosión por picadura.....	19
7.1.4.	Corrosión galvánica	20
7.1.5.	Corrosión por esfuerzo.....	21
7.1.6.	Corrosión intergranular	22
7.1.7.	Corrosión por desgaste	22
7.2.	Métodos de protección o inhibición de la corrosión.....	23
7.3.	Inhibidores de la corrosión.....	23
7.4.	Tipos de inhibidores de la corrosión	25
7.4.1.	Inhibidores que contienen átomos de oxígeno.....	26
7.4.2.	Inhibidores que contienen átomos de nitrógeno.....	27
7.4.3.	Inhibidores que contienen átomos de sulfuro	27
7.4.4.	Polímeros conductores.....	27
7.5.	Aplicaciones en la industria petrolera de inhibidores de la corrosión	28
7.6.	Inhibidores orgánicos verdes	29
7.6.1.	Pulque como inhibidor verde de la corrosión	30
7.7.	Impacto medioambiental de inhibidores verdes de la corrosión.....	31

8	DESARROLLO DEL PROYECTO	33
8.1.	Obtención de las probetas	33
8.2.	Elaboración de concentrado de Agave Salmiana	34
8.3.	Preparación de celda electroquímica	34
8.4.	Experimentación en condiciones estáticas.....	35
8.4.1.	Obtención de Diagramas Nyquist por medio de impedancia en celda electroquímica. 35	
8.4.2.	Obtención de Curvas de Polarización por medio de polarización potenciodinámica en celda electroquímica	36
8.5.	Caracterización por microscopía electrónica de barrido.....	36
9	RESULTADOS	36
9.1.	Evaluación electroquímica de la resistencia a la corrosión mediante espectroscopía de impedancia electroquímica	36
9.2.	Evaluación electroquímica de la resistencia a la corrosión mediante polarización potenciodinámica.....	42
9.3.	Microscopía electrónica de barrido.....	44
10	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
11	CONCLUSIONES	47
12	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1 RESUMEN

En el presente proyecto de investigación se llevó a cabo un estudio empleando las técnicas electroquímicas de espectroscopía por impedancia electroquímica (EIS) y polarización potenciodinámica (R_p), para llevar a cabo la evaluación del extracto de *Agave Salmiana*, como un inhibidor verde de la corrosión del acero API 5L X52 en un medio ácido. Dicho estudio consistió en llevar a cabo una variación en las concentraciones del inhibidor verde para determinar la eficiencia de inhibición que tiene el extracto en el acero en un medio ácido. De acuerdo a los resultados obtenidos se logró determinar que la concentración de inhibidor a la cual se obtiene la mayor eficiencia de la inhibición de la corrosión en el acero, 90.4 %, fue la que corresponde a una concentración de 75 μL . Los resultados indican que la eficiencia del extracto de *Agave Salmiana* aumenta al adicionar mayores concentraciones de este mismo hasta un máximo reportado, por tal motivo este resulta ser un inhibidor verde de la corrosión, efectivo, que logra mitigar los efectos de la corrosión en un acero API 5L X52 en un medio ácido.

2 TABLA DE CONTENIDO

Figura 1. Diagrama del proceso de corrosión y extracción de un metal.....	13
Figura 2. Esquema de mecanismo de corrosión en ausencia y presencia de un inhibidor en acero al carbón	14
Figura 3. Distribución de costos de corrosión. (H, 2003)	18
Figura 4. Representación esquemática de corrosión uniforme y ejemplificación del mismo	19
Figura 5. Representación esquemática de corrosión por picadura o “pitting”	20
Figura 6. Representación esquemática de corrosión galvánica.	21
Figura 7. Metalografía de corrosión por esfuerzo intergranular en un intercambiador de calor de Inconel.....	21
Figura 8. Corrosión intergranular. (O., 2014)	22
Figura 9. Probeta de Acero API 5L X52 montada en baquelita con contacto metálico.....	33
Figura 10. Obtención de concentrado mediante evaporación en rotovapor BUCHI R-114.....	34
Figura 11. Celda electrolítica típica de tres electrodos.	35
Figura 12. Circuito eléctrico equivalente en el uso de la simulación de espectros de impedancia.	37
Figura 13. Gráficos experimentales en condiciones estándar de un sistema API 5L X52 en 0.1 M H ₂ SO ₄ . (A) Sin inhibidor (0μL) y (B) con variación en las adiciones del concentrado	38
Figura 14. Ajuste mediante circuitos equivalentes de diagramas de Nyquist de (A)Acero API 5L X52, (B)En presencia de una adición (12.5μL) de inhibidor, (C)Diferentes concentraciones del extracto de Agave Salmiana	41
Figura 15. Curvas de polarización obtenidas en el sistema API 5L X52/0.1 M H ₂ SO ₄ en (A)Blanco (sin inhibidor), (B)Distintas concentraciones de inhibidor.....	43
Figura 16. Pendientes anódicas y catódicas de campo bajo, obtenidas de curvas de polarización potenciodinámica de sistema API 5L X52 inmerso en H ₂ SO ₄ en distintas adiciones de inhibidor. ...	44
Figura 17. Imágenes de: A) Acero API 5L X52 (blanco), B) SEM de acero API 5L X52, C) Acero en sistema H ₂ SO ₄ en presencia del inhibidor, D) SEM de acero en sistema H ₂ SO ₄ en presencia de inhibidor, E) Acero en sistema H ₂ SO ₄ , F) SEM de acero en sistema H ₂ SO ₄	45
Tabla 1. Ambientes que pueden ser causantes de la corrosión en distintos metales y aleaciones. (Greene., 1978).....	11
Tabla 2. Composición química (%wt) de un acero API 5L X52	12
Tabla 3. Clasificación de inhibidores	25
Tabla 4. Algunos grupos funcionales en Inhibidores Orgánicos.....	26
Tabla 5. Toxicidad de algunos inhibidores de la corrosión	32
Tabla 6. Parámetros electroquímicos obtenidos durante el ajuste de los datos mostrados en la Figura 14(C)	41

3 INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia que se tiene ante la gran problemática de la corrosión en los metales, se buscan e investigan nuevas formas o alternativas que permitan evitar y mitigar los efectos que tiene la misma corrosión en estos materiales, además del enorme gasto que representa en la industria; una de estas alternativas resulta ser los inhibidores de la corrosión. Los inhibidores de la corrosión “verdes” han ido tomando cada vez una mayor relevancia en este campo de la ciencia, debido a que estos resultan ser amigables con el medio ambiente, con un bajo costo de producción y una alta tasa de degradación; siendo un extracto natural proveniente del *Agave Salmiana* un candidato que resulta apto para su uso como un inhibidor de la corrosión.

En la actualidad existen diversos tipos de inhibidores de la corrosión, de acuerdo a la necesidad en la cual se requieran para un tipo de industria en específico se tendrá así un tipo de inhibidor de la corrosión que se adecue a las necesidades de la industria a requerir. El uso desmedido de fluidos con alto grado de agresividad (corrosivos) en la industria, resulta ser un problema que requiere solución que puede repercutir en gran medida en diversas áreas, tales como la química, metalúrgica, petroquímica, por mencionar entre otras. Siendo más específicos, en el área petroquímica, en el refinamiento, procesamiento y transporte de hidrocarburos se requiere de un mayor control y mejoras de características en el metal a usar para poder mitigar los efectos de la corrosión en los que se ven envueltos en un ambiente corrosivo.

La investigación que se presenta se enfoca en el uso de un inhibidor verde obtenido del *Agave Salmiana* como un inhibidor de la corrosión que permita mitigar los efectos de la corrosión de un acero API 5L X52 inmerso en un medio ácido H_2SO_4 0.1M, para el cual se emplearon técnicas electroquímicas y caracterizaciones en microscopía electrónica de barrido.

4 ANTECEDENTES

El análisis del estado del arte que se presenta a continuación, con el objetivo de poder consolidar las investigaciones presentes realizadas a la determinación de un inhibidor de la corrosión apto para mitigar los efectos de la corrosión a un acero en medio ácido, analizando la evolución que pueda presentar en su uso tanto industrial como de investigación.

Antecedentes de la investigación.

El acero al carbón resulta ser un material de gran utilidad y ampliamente utilizado para el transporte y manejo de líquidos, productos de la industria química, petróleo, así como los derivados del mismo (Wei Wu, 2019); dentro de la gran familia de los aceros al carbono encontramos que los aceros API son aquellos aceros que resultan de mayor interés en la construcción de líneas de ductos que están destinados para el transporte de hidrocarburos y productos de la misma gama, esto debido a sus buenas propiedades mecánicas tales como la resistencia a la tracción, tenacidad, soldabilidad y formabilidad (Amir Golchinvafa, 2020). El principal problema en el uso de estos aceros para la industria de hidrocarburos y derivados, resultan ser los problemas relacionados con la corrosión, provenientes de compuestos que se forman en la superficie de las tuberías, así como procesos conocidos como “pitting” o “picaduras” en el mismo, resultantes de los procesos electroquímicos a los cuales se ven sometidos en un ambiente que se encuentra en presencia de un ambiente agresivo (Mohd Asyadi Azam, 2020).

Tabla 1. Ambientes que pueden ser causantes de la corrosión en distintos metales y aleaciones. (Greene., 1978)

Material	Ambiente	Material	Ambiente
Aleaciones de aluminio	Soluciones de NaCl H ₂ O ₂ Soluciones de NaCl Agua de Mar Aire Vapor de Agua	Aceros ordinarios	Soluciones de NaOH Soluciones de NaOH-Na ₂ SiO ₃ Calcio, Amoniacó y soluciones de nitrato de sodio Ácidos mezclados (H ₂ SO ₄ -HNO ₃) Soluciones de HCN Soluciones de H ₂ S ácidas Agua de mar Aleaciones de Na-Pb fundidas
Aleaciones de cobre	Vapores y soluciones de Amoniacó		
Aleaciones de oro	Aminas Agua, Vapor de agua Soluciones de FeCl ₂		
Plomo	Soluciones ácido acético-sal		
Aleaciones de Magnesio	Soluciones de Sosa Caustica		
Monel	Soluciones de Acetato de plomo	Aceros inoxidables	Soluciones de cloruros Ácidos como MgCl ₂ y BaCl ₂ Soluciones de NaOH-H ₂ S
Níquel	Soluciones de NaCl-H ₂ CrO ₄ Atmósfera rural y costera Agua destilada		

	Sosa Caustica fundida Ácido Fluorhídrico Ácido Hidrofluosilicílico		Vapor de condensación Aguas cloradas Ácido nítrico humeante rojo Agua de mar Metanol-HCl
--	--	--	--

Aunque la resistencia de los aceros es un tanto limitada y restrictiva en el tema de la corrosión, este sigue siendo un material que se prefiere sobre otros en la industria debido a sus buenas propiedades mecánicas y en la mayoría de los casos por cuestiones económicas; además se han reportado pérdidas asociadas a costos por problemas de corrosión de alrededor de 3.1% del PIB de los Estados Unidos (Battelle Columbus Laboratories, 1995), por lo que resulta imperativo el poder frenar estas pérdidas multimillonarias en medida de lo posible sin sacrificar los costos de producción del acero.

Uno de los aceros que son mayormente utilizados para la construcción de oleoductos y tuberías de transporte de hidrocarburos resulta ser el acero API 5L X52, con la composición química mostrada en la Tabla 2. (J. Aldana-González, 2020)

Tabla 2. Composición química (%wt) de un acero API 5L X52.

Elemento	%peso
C	0.22
Mn	1.22
Si	0.24
Cr	0.16
Cu	0.19
Ni	0.14
Fe	Balance

Los procesos de corrosión pueden llegar a definirse como “el resultado de la interacción que existe entre un metal y su entorno que tiene como resultado su destrucción gradual” (6); teniendo el entendimiento que es un resultado no deseado del metal en su interacción con el entorno en donde se ven envueltos diversas variables en un proceso que es llevado de manera natural (Figura 1), en donde el metal busca estar en su estado de mínima energía, comúnmente en la formación de óxidos en donde se encuentra esta estabilidad termodinámica.

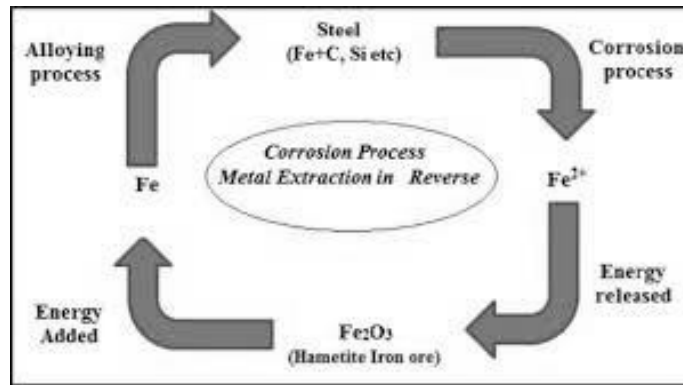


Figura 1. Diagrama del proceso de corrosión y extracción de un metal.

Algunos de los problemas de corrosión que son asociados a este tipo de materiales se deben a la agresividad de los líquidos que estos componentes transportan, tales como petróleo con un alto contenido de azufre, agua con altas concentraciones de iones disueltos, como cloruros y/o sulfatos (M. Abdallah, 2000).

Existen diversos métodos de protección contra la corrosión que son empleados para evitar el ataque agresivo del medio ambiente hacia el material expuesto, tales como recubrimientos metálicos, y poliméricos, tratamientos superficiales, protección catódica, películas pasivas, inhibidores de la corrosión, entre otros. (Schweitzer, 2009) Los inhibidores de la corrosión son compuestos que pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos que pueden formar una capa pasiva sobre la superficie del metal, teniendo así un efecto de inhibición o retardando la corrosión por la

inhibición de la reducción del agua circundante al metal a H_2 , oxígeno que se encuentre disuelto y presencia de cloruros. (Figura 2)

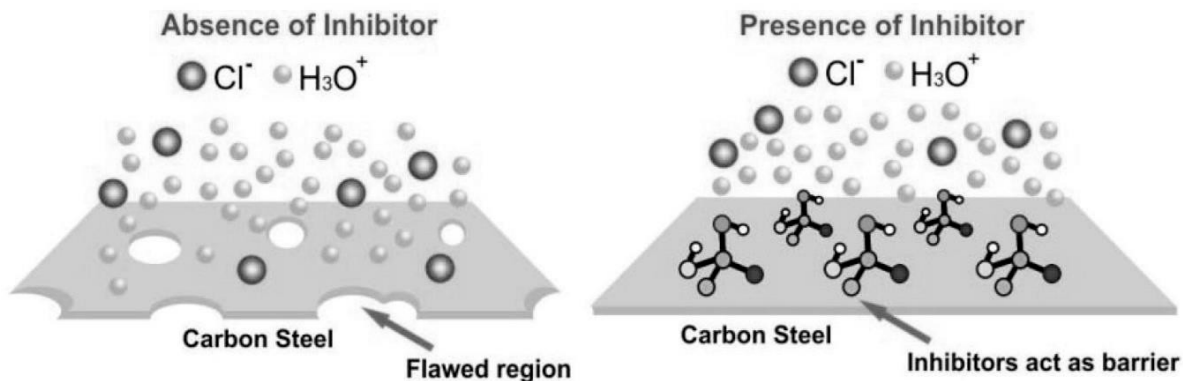


Figura 2. Esquema de mecanismo de corrosión en ausencia y presencia de un inhibidor en acero al carbono.

Se tiene una gran variedad de compuestos los cuales son utilizados como inhibidores de la corrosión en aceros, estos pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos, siendo estos últimos los de mayor interés; debido a que los inhibidores orgánicos que suelen usarse representan un efecto tóxico o nocivo en el medio ambiente. (Pautovskaya, 2000)

Los inhibidores orgánicos resultan una gran opción debido a sus propiedades de adsorción en la superficie del metal a recubrir, esto por efecto de su estructura molecular con enlaces π , heteroátomos de P, S, N y O; despertando así un gran interés en el uso de estos mismos como inhibidores de la corrosión en aceros. (El-Etre, 2007).

Así mismo, A.M. Abdel-Gaber (A.M. Abdel-Gaber, 2006) ha reportado el uso de extractos de plantas tales como manzanilla, hierba de limón, comino negro y frijol como inhibidores orgánicos de la corrosión.

5 JUSTIFICACIÓN

5.1. Social

Los aceros API 5L X52 son mayormente utilizados para la fabricación de componentes estructurales y funcionales donde se ven expuestos a condiciones en donde puede favorecerse la corrosión, por lo que el mejoramiento en su resistencia a la corrosión resulta de suma importancia para su aumento en la correcta funcionalidad y de operación.

5.2. Científico y tecnológico

Aquellos componentes que se ven expuestos a un ambiente corrosivo suelen tener un fallo inminente y consecuencias directas o indirectas en una amplia gama de empresas e industria en general, que a su vez pueden influir en pérdidas de producción, contaminación al medio ambiente, reparaciones costosas, suspensión del servicio necesario y riesgos medioambientales. Es necesario considerar la ampliación del funcionamiento de estos componentes mediante la inhibición de la corrosión sin repercutir directamente en el proceso.

5.3. Económico y ambiental

Los inhibidores de la corrosión resultan de vital importancia en una industria que tiene millones de dólares en pérdidas en componentes estructurales y funcionales de acero que están expuestos a condiciones marítimas, tales como los ductos que transportan los hidrocarburos. En este sentido, el proyecto pretende llevar a cabo una evaluación de la inhibición de la corrosión del Acero API 5L X52 en un medio ácido, empleando como inhibidor verde de la corrosión; pues este resulta de bajo costo, fácil obtención y presenta una alternativa que no causa efectos tóxicos o nocivos al medio ambiente, causante de riesgos en la salud de organismos vivos.

6 OBJETIVOS

6.1. General

Determinar el efecto del fermentado de Agave Salmiana (pulque) como un inhibidor verde de la corrosión para un acero API 5L X52 en una solución ácida 0.1 M de H_2SO_4 .

6.2. Específicos

1. Producir un concentrado del Agave Salmiana (pulque), a partir de la evaporación del mismo en condiciones controladas de presión y de temperatura.
2. Evaluar la resistencia a la corrosión del Acero API 5L X52 en una solución ácida 0.1 M H_2SO_4 , en presencia de diferentes adiciones (12.5 μ L) del inhibidor de la corrosión, mediante la técnica de Polarización Potenciodinámica (R_p).
3. Evaluar la resistencia a la corrosión del Acero API 5L X52 en una solución ácida 0.1 M H_2SO_4 , en presencia de diferentes adiciones (12.5 μ L) del inhibidor de la corrosión, mediante la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS).
4. Determinar la concentración óptima que corresponde a la máxima eficiencia de la inhibición a la corrosión.
5. Caracterizar la superficie mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

7 MARCO TEÓRICO

Los aceros al carbón resultan ser de un gran interés en la industria del petróleo, ya sea para su transporte o para su almacenamiento; esto se debe a que este posee buenas propiedades mecánicas; aunque la resistencia a la corrosión de estos materiales suele ser un tanto restrictivo, siguen siendo materiales a utilizar en la construcción de componentes estructurales y funcionales debido a consideraciones económicas y que la corrosión que se tiene suele ser de tipo generalizada, lo cual permite un mayor control y estudio sobre la misma. (Javidi, 2012)

Debido a que el Acero API 5L X52 es uno de los materiales mayormente utilizado para la construcción de tuberías encargadas del transporte de hidrocarburos, este está expuesto a un entorno agresivo que puede fomentar la corrosión sobre el material, esto por las concentraciones de cloruros y los medios ácidos presentes en este tipo de industria, por ello resulta de vital importancia el poder determinar métodos que logren disminuir o mitigar los efectos de la corrosión sobre estos componentes.

7.1. Corrosión

La corrosión es una reacción que da de forma natural en materiales metálicos debido a la interacción que existe entre estos con el medio ambiente y debido a que este último es distinto en las distintas industrias que se requiere el uso de estos materiales metálicos, así también se tendrá una amplia gama de tipos de corrosión los cuales son gobernados por distintos tipos de condiciones.

Una gran mayoría de materiales que son utilizados en la fabricación de ductos para transporte de hidrocarburos sufren de corrosión en medios acuosos que se dan mediante mecanismos electroquímicos. El paso de una corriente a través de un electrolito es posible a causa del flujo de aniones y de cationes hacia el ánodo y cátodo respectivamente.

El conocer y poder aplicar los conceptos más básicos del proceso de la corrosión en la selección de materiales, el diseño de componentes y el cuidado o prevención es importante para el correcto desarrollo de un país. (Llanos, 2003)

Con el incremento en la industrialización, los costos por batallar en contra de los procesos de corrosión han ido en incremento conforme el paso de los años. Muchos estudios se han concretado a lo largo de tres décadas y han revelado los costos de cerca de hasta el 3.1% del producto interno bruto de países como Estados Unidos, esto resultando en un valor cercano a los \$275 billones anualmente. (R.G., 2005)

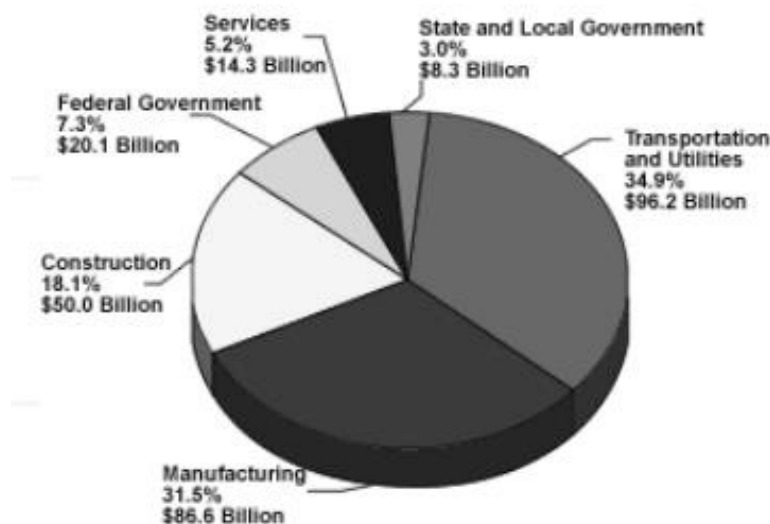


Figura 3. Distribución de costos de corrosión. (H, 2003)

7.1.1. Tipos de corrosión

Los distintos tipos de corrosión pueden ser clasificados de acuerdo con los procesos en los cuales se ven envueltos individualmente y las variables que intervienen en esos mismos procesos. La identificación puede realizarse mediante una gran variedad de técnicas, la mayoría interrelacionadas de alguna manera.

7.1.2. Corrosión uniforme

Este tipo de corrosión es considerado como un tipo de ataque que toma lugar sobre toda la superficie del material y suele ser también el tipo de corrosión que se presenta con mayor regularidad. (M.S., 1953) Se puede decir que este tipo de corrosión suele ser el más “benigno” debido a que el alcance de este suele ser observado y estudiado con una mayor facilidad, pudiendo así evaluarse con una mayor simplicidad mediante estudios de laboratorio que pueden reproducir y examinar este fenómeno. Suele ocurrir típicamente en áreas relativamente grandes de la superficie del material y forma una capa uniforme de “óxido” sobre la misma. ((NACE))

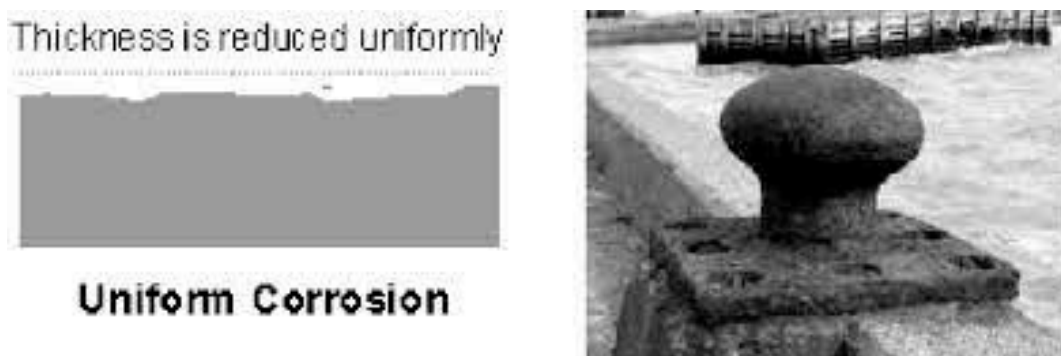


Figura 4. Representación esquemática de corrosión uniforme y ejemplificación del mismo.

7.1.3. Corrosión por picadura

Este tipo de corrosión se considera como uno de los tipos más destructivos de corrosión y de igual manera resulta difícil de predecir, detectar con precisión y lograr una caracterización adecuada. La “picadura” o “pitting” es una forma localizada de corrosión, el cual puede resultar de un punto local anódico o más común catódico, donde se forma una semi-celda que se encuentra rodeada de la superficie del material. Una vez que la picadura inicia, esta crece de forma que crea una cavidad de mayor espesor y profundidad que generalmente suele penetrar el material de

manera vertical. (Technology, s.f.) Suele causarse por algún daño o ruptura de una capa de óxido o uniformidades en la estructura metálica. Las picaduras resultan ser de un carácter muy destructivo y peligroso, debido a que llevan a un fallo de la integridad del componente con una relativa baja pérdida de material.

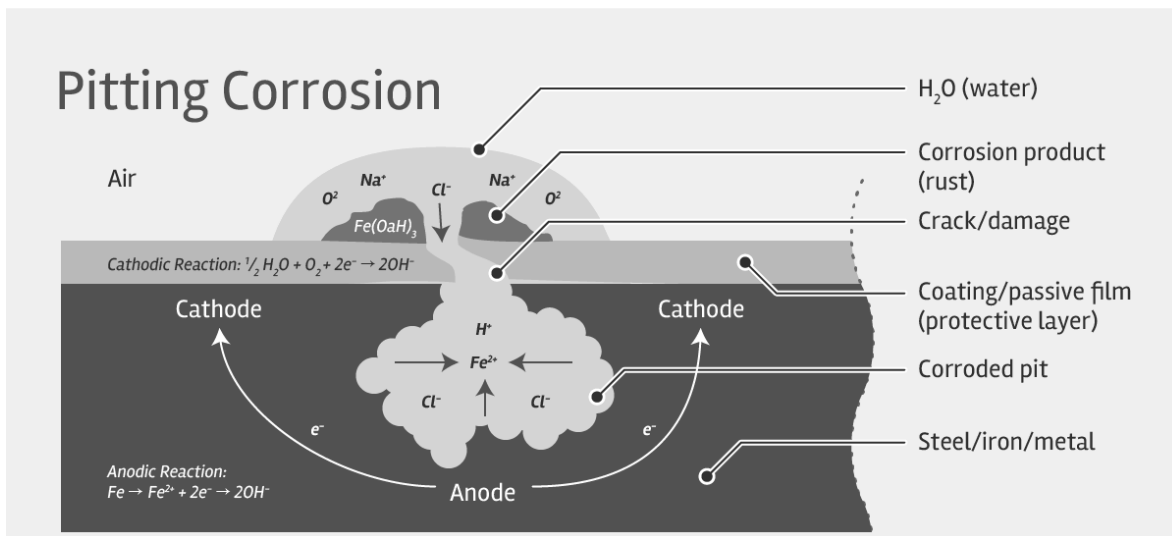


Figura 5. Representación esquemática de corrosión por picadura o “pitting”.

7.1.4. Corrosión galvánica

La corrosión galvánica es la degradación de un metal cerca de una unión o coyuntura cuando dos metales que son electroquímicamente opuestos se encuentran en contacto con un ambiente electrolítico creando así una diferencia de potencial electroquímico, generando así la corrosión. Amplios sistemas de ingeniería emplean distintos tipos de materiales metálicos para la construcción de los mismos y en los cuales se puede llevar a cabo la corrosión galvánica si no se tiene un especial cuidado en el diseño de estos componentes. Elegir los materiales que se encuentren cerca de la serie galvánica reduce en gran medida el riesgo que suceda este tipo de corrosión.

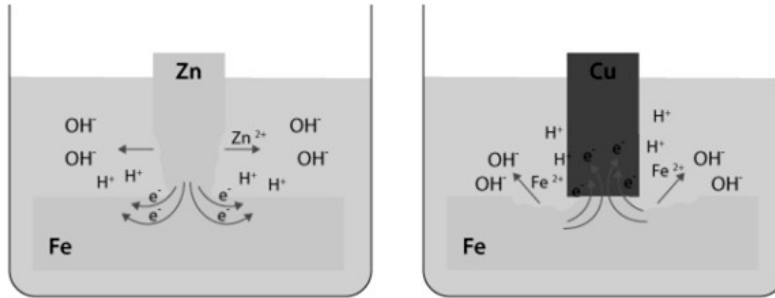


Figura 6. Representación esquemática de corrosión galvánica.

7.1.5. Corrosión por esfuerzo

La corrosión por esfuerzo resulta por la combinación de esfuerzos en el material con un ambiente corrosivo, usualmente acompañado temperaturas elevadas. Puede resultar por esfuerzos externos como estar sujeto a cargas por tensión o compresión debido a cambios bruscos de temperatura; así también puede resultar de esfuerzos residuales durante el proceso de manufactura como conformado en frío, soldadura, maquinado, etc. En este tipo de corrosión la superficie suele mantenerse intacta, sin embargo, pequeñas grietas aparecen en la microestructura del material, siendo no tan fáciles de detectar; típicamente apareciendo en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado.



Figura 7. Metalografía de corrosión por esfuerzo intergranular en un intercambiador de calor de Inconel.

7.1.6. Corrosión intergranular

Esta forma de corrosión puede observarse a niveles microscópicos en los metales, situada en los límites de grano. Un ataque rápido en los límites de grano cercanos eventualmente llevará a un agrietamiento de las estructuras granulares. Algunas veces los elementos y fases pueden precipitarse fuera de los granos y migrar a los límites de granos como un resultado de proceso como lo es el envejecido, estos precipitados pueden no corresponder con la composición de los límites de grano causando un “agotamiento” de los enlaces intergranulares.

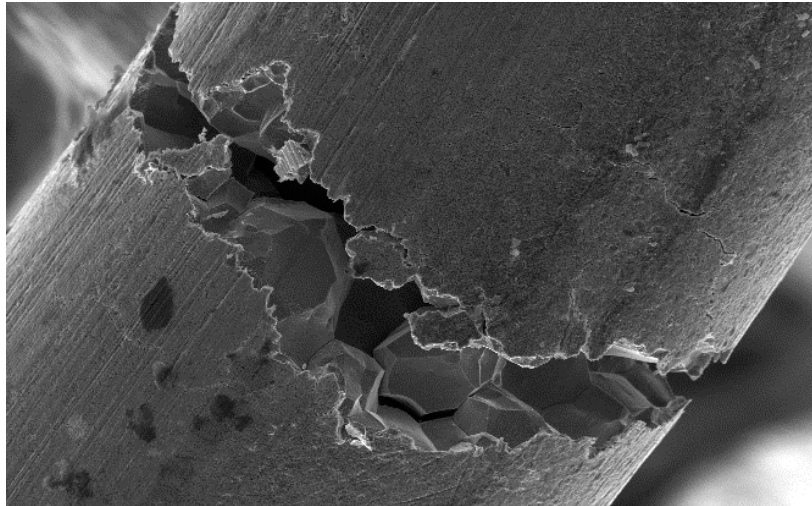


Figura 8. Corrosión intergranular. (O., 2014)

7.1.7. Corrosión por desgaste

La corrosión por desgaste ocurre en las interfaces de materiales bajo carga los cuales son expuestos a vibración y deslizamiento; aparece en forma de huecos o de picaduras que son rodeadas por productos de la corrosión.

7.2. Métodos de protección o inhibición de la corrosión

Las clasificaciones de la corrosión son realizadas en relación al mecanismo por el cual se gobierna el proceso de corrosión, en el medio ambiente en donde se lleva a cabo y a la morfología en la que la corrosión se ve manifestada.

Tales métodos, por mencionar algunos, pueden ser recubrimientos metálicos y poliméricos, tratamientos superficiales sobre el material, protección catódica, películas pasivas, inhibidores de corrosión, entre otros.

7.3. Inhibidores de la corrosión

Un inhibidor de la corrosión es considerado como un compuesto químico que estando presente en un sistema donde se lleva a cabo un proceso de corrosión, en una concentración apropiada, reduce la velocidad de corrosión del sistema mismo, esto sin cambiar significativamente la concentración del agente corrosivo; lo cual se logra generalmente con pequeñas concentraciones del inhibidor. (Monticelli, 2018)

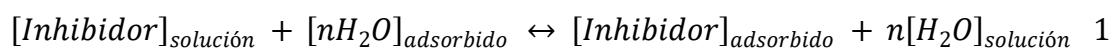
Los inhibidores de la corrosión pueden ser clasificados en catódicos, anódicos o mixtos, esto dependiendo de la influencia si es el retardo de una reacción catódica, anódica o de ambas, respectivamente. Como resultado de esto, se produce un cambio en el potencial de corrosión del metal con respecto a la dirección anódica o catódica del proceso.

Los inhibidores catódicos actúan generalmente sobre toda la superficie del metal y estos logran reducir el proceso de corrosión mediante la formación de una capa o película fina con una alta resistencia eléctrica sobre la superficie la cual permite actuar como una barrera para la corriente que produce la corrosión.

En cambio, los inhibidores de tipo anódico actúan formando un compuesto que resulta insoluble y que suele precipitar en lugares anódicos evitando así que suceda una reacción anódica.

Los inhibidores de tipo mixto suelen ser fenómenos de adsorción que ocurren como resultado de fuerzas electrostáticas entre la carga eléctrica del metal y las cargas iónicas o dipolos de las moléculas del inhibidor en cuestión. Las cargas en los inhibidores dependen primordialmente de la presencia de electrones de enlace que se encuentran perdidos, pares solitarios de electrones, enlaces π , compuestos aromáticos y grupos funcionales que contienen elementos del grupo V y VI de la tabla periódica; una buena parte de los inhibidores de este tipo contienen al menos un grupo funcional que actúa como el “centro de la reacción”. La fuerza de adsorción que se genera depende de la carga que posean los grupos mencionados y la estructura del resto de las moléculas influencia a la densidad de carga.

Las moléculas de agua que son adsorbidas sobre la superficie del metal que se encuentra inmerso en una fase acuosa; las moléculas orgánicas adsorbidas para reemplazar a las moléculas de agua responden a:



donde n resulta el número de las moléculas de agua que son desplazadas por una molécula del inhibidor.

La capacidad del inhibidor de poder reemplazar a las moléculas de agua depende de la interacción electrostática entre el metal y el inhibidor, por otra parte, el número de las moléculas de agua que son desplazadas depende del tamaño y de la orientación de las moléculas del inhibidor. En consecuencia, las interacciones que existen entre el inhibidor y la superficie del metal implican una baja energía de activación. Este proceso se le conoce como “adsorción física”, el cual sucede de forma rápida y en la mayoría de los casos suele ser reversible. (W. Lorenz, 1962)

7.4. Tipos de inhibidores de la corrosión

Los inhibidores son productos que resultan ser útiles, rentables e inclusive se puede recurrir a ellos para poder realizar algún diseño específico de estos mismos en procesos particulares; por eso existe una amplia variedad de inhibidores los cuales pueden denotarse en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Clasificación de inhibidores

Composición	Orgánicos Inorgánicos
Mecanismo de acción	Interface Membrana Capa Difusa Pasivantes Neutralizadores Captadores de Oxígeno
Aplicación	Corrosión atmosférica Soluciones acuosas Decapado Soluciones salinas Medios no acuosos
Proceso parcial en el que interfieren	Anódicos Catódicos Mixtos
Características químicas	Fuertes Débiles Intermedios

Los inhibidores de la corrosión pueden ser tanto sustancias puras como mezclas. Los ingredientes activos de los inhibidores de la corrosión orgánicos contienen ya sea uno o más de los grupos funcionales que contienen uno o más heteroátomos, N, O, P, S o Se, mediante los cuales los propios inhibidores se anclan a la superficie del metal, algunos de estos grupos se enlistan en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Algunos grupos funcionales en Inhibidores Orgánicos.

Estructura	Nombre	Estructura	Nombre
-OH	hydroxy	-CONH ₂	Amide
-C≡C-	-yne	-SH	Thiol
-C-O-C-	epoxy	-S-	Sulfide
-COOH	carboxy	-S=O	Sulfoxide
-C-N-C-	amine	-C=S-	Thio
-NH ₂	amino	-P=O	Phosphonium
-NH	imino	-P-	Phospho
-NO ₂	nitro	-As-	Arsano
-N≡N-N-	triazole	-Se-	Seleno

7.4.1. Inhibidores que contienen átomos de oxígeno

El ácido benzoico suele ser utilizado ampliamente como un inhibidor de la corrosión. (A. Akiyama, 1970) La adsorción que se tiene, así como la eficiencia de los ácidos benzoicos dependen plenamente de la naturaleza de sus sustituyentes; los sustituyentes que donan electrones incrementan la inhibición mediante un incremento en la densidad de los electrones del grupo anclado.

7.4.2. Inhibidores que contienen átomos de nitrógeno

El bentriazol (BTA) y los derivados de este, resultan ser inhibidores efectivos con la mayoría de los metales, especialmente con el cobre en una amplia variedad de condiciones. (Hatsuo Ishida, 1986) Cuando se tienen bajas concentraciones, el bentriazol es adsorbido ligeramente en la superficie del metal, mientras que a concentraciones lo suficientemente altas la precipitación del complejo ocurre en la superficie lo que causa una inhibición efectiva de la corrosión.

7.4.3. Inhibidores que contienen átomos de sulfuro

La tiourea o tiocarbamida, así como sus derivados, son usados como inhibidores de la corrosión en una amplia variedad de metales. (Singh, 1993) Estos no resultan ser compuestos tóxicos y no representan una amenaza medioambiental. La variación que se tiene en la eficiencia de la tiourea y sus derivados depende en su mayor parte en el peso molecular, usando así bajas concentraciones de moléculas grandes se pueden llegar a obtener altas eficiencias de inhibición a la corrosión.

7.4.4. Polímeros conductores

La polimerización de compuestos heterocíclicos, tales como el pirrol, el tiofeno y anilina pueden llegar a producir películas uniformes que se adhieren a la superficie del metal. (Skotheim, 1986) Estas películas suelen ser conductoras eléctricas y además poseen la ventaja de tener una buena tolerancia a micro defectos y pequeñas imperfecciones. Debido a estas propiedades, las películas que se forman pueden llegar a repasar áreas del metal que lleguen a quedar expuestas debido a los defectos e imperfecciones.

7.5. Aplicaciones en la industria petrolera de inhibidores de la corrosión

La corrosión en las industrias que manejan y transportan hidrocarburos y sus derivados suelen dividirse en dos tipos, “corrosión húmeda” y “corrosión seca”. La corrosión húmeda se produce cuando estos procesos se llevan a cabo a bajas temperaturas en donde el material suele corroerse debido a la presencia de una fase acuosa; por otra parte, la corrosión húmeda se produce cuando los procesos son llevados a una alta temperatura (arriba del punto de fusión del agua) y esta ocurre en ausencia de una fase acuosa.

La corrosión húmeda se ve influenciada directamente por la temperatura, presión y la composición de la fase acuosa en la que se encuentra presente; en las refinerías y plantas petroquímicas, la cantidad de agua no suele ser de alta concentraciones, pero el nivel de corrosión suele ser excesivo y se localiza en las regiones donde la fase acuosa presente entra en contacto con el metal. El agua circundante en el proceso puede llegar a contener disuelto ácido sulfhídrico (H_2S , dióxido de carbono (CO_2) y iones cloruro (Cl^-).

Las industrias petroquímicas y las refinerías emplean una amplia variedad de inhibidores formadores de películas que puedan controlar la corrosión húmeda; muchos de estos inhibidores son del tipo orgánico con largas cadenas nitrogenadas, las cuales incluyen aminas y amidas. Inhibidores solubles en agua y aceite son continuamente inyectados en tandas para poder tener un correcto control de la corrosión.

Aquellos inhibidores formadores de películas se anclan al metal que se desea proteger debido a su grupo polar. La región no polar sobresale de forma vertical, tal que la adsorción física de los hidrocarburos en esta región incrementa el grosor y efectividad de la barrera hidrofóbica en contra de la corrosión.

7.6. Inhibidores orgánicos verdes

Los inhibidores de la corrosión que suelen usarse con mayor regularidad en la industria de manejo y transporte de hidrocarburos y sus derivados son inhibidores que presentan un alto nivel de toxicidad, causante de un daño irreversible desde su síntesis, transporte y aplicación de los mismos. Se han realizado investigaciones con la tarea de reducir el uso de inhibidores de la corrosión tradicionales lo que a su vez reduzca el daño medioambiental.

Hay una amplia variedad de inhibidores que resultan ser amigables con el medioambiente, tales como inhibidores orgánicos, inhibidores inorgánicos e inhibidores poliméricos; estos a su vez pueden clasificarse en inhibidores naturales o artificiales dependiendo su método de obtención y preparación.

Se denomina a los inhibidores orgánicos verdes como inhibidores que son extraídos de productos naturales o son elaborados desde materias primas naturales. Algunos inhibidores orgánicos pueden ser obtenidos de hojas, flores, frutos, semillas, pericarpios y otras partes de plantas que pueden servir como sustancias efectivas en la inhibición de la corrosión.

Los métodos de obtención y extracción incluyen remojo, reflujo por calentamiento, hidrólisis enzimática, extracción Soxhlet, secado, y métodos de extracción ultrasónicos. (Wang X, 2018)

La eficiencia de la extracción de los componentes activos depende de la temperatura de extracción (60-80 °C para la mayoría de las plantas), temperatura de secado, solvente utilizado, tiempo y relación líquido-sólido. Para algunas plantas los métodos de extracción por medio de un solvente es significativamente mejor que en agua destilada.

Investigaciones se han realizado para el uso de extractos de plantas como inhibidores de la corrosión. Cítricos, ginko biloba, té e incluso girasol han resultado efectivos aunado a que estos no son tóxicos, son baratos y pueden ser obtenidos con facilidad, por ello la gran importancia y relevancia en el uso de estos mismos en

inhibición de la corrosión. Los inhibidores de la corrosión verdes suelen ser usados en su mayor parte en medios ácidos como HCl, H₂SO₄ y NaOH.

Un gran número de compuestos orgánicos han sido reportados con una alta tasa de efectividad como inhibidores de la corrosión, esto se le atribuye principalmente a su estructura molecular que indica la capacidad de adsorción de las moléculas que lo componen.

Los grupos funcionales polares como el hidroxil, carboxil carbonil, etc., tienen un papel primordial en el proceso de adsorción, este proceso involucra la efectividad de solubilidad de las sustancias para la inhibición de la corrosión. Los heteroátomos y los enlaces π juegan un rol muy importante en la formación de películas en la superficie del metal para poder inhibir la corrosión en los mismos.

7.6.1. Pulque como inhibidor verde de la corrosión

El pulque ha sido una bebida tradicional en la cultura mexicana, la cual se ha consumido de manera recreativa desde tiempos prehispánicos. Esta resulta ser una bebida alcohólica, fermentada a partir del Agave, especialmente del tipo *Agave Salmiana*. Esta fermentación puede lograrse de manera espontánea por la microbiota que se encuentra de manera natural en el aguamiel, el cual es un producto obtenido de un proceso previo al pulque o así también puede obtenerse mediante la adición de algún producto que lleve a cabo la inoculación del pulque.

Este se encuentra en su mayor parte compuesto por carbohidratos, los cuales se hayan acumulados en forma de fructosa, glucosa y oligosacáridos; así también tiene una importante cantidad de compuestos fenólicos los cuales incluyen flavonoides y saponinas, los cuales han mostrado tener capacidades antibacterianas, anti hongos, anti-carcinogénicas, antiinflamatorias, inmunoestimulantes, antiparasitarias y más importante aún las altas capacidades antioxidantes de las mismas las cuales cuentan con un alto potencial para que puedan ser utilizados como inhibidores orgánicos de la corrosión.

Los flavonoides representan una amplia familia de compuestos poli fenólicos que se encuentran en los tejidos vegetales provenientes de cereales y verduras que pueden actuar como antioxidantes naturales. Esta capacidad antioxidante que poseen los flavonoides proviene de su capacidad de donación de los átomos de hidrógeno que lo constituyen y así mismo. Estos también pueden ser adsorbidos sobre la superficie de los metales a través de un intercambio de los electrones por parte de los átomos de oxígeno presentes, lo cual formará una película o un recubrimiento en la superficie del metal.

La quercetina ($C_{15}H_{10}O_7$) es generalmente el flavonoide presente con mayor abundancia y resultando el más importante en el proceso de retrasar la velocidad de corrosión debido a sus propiedades antioxidantes.

7.7. Impacto medioambiental de inhibidores verdes de la corrosión

El impacto medioambiental es un tema de gran relevancia en la actualidad que incrementa día con día y a lo cual se relaciona de forma directa al momento de realizar la elección de un inhibidor de la corrosión.

La biodegradación o la demanda biológica de oxígeno (BOD), que es la medida de qué tanto tiempo el inhibidor persistirá en el ambiente, debe ser de al menos un 60% aunado a que los inhibidores no deben resultar tóxicos para el medio ambiente.

La toxicidad se puede determinar por LC_{50} o EC_{50} (Frenier, 1996), siendo la concentración de inhibidor que es necesario para matar al 50% de la población total de la especie a prueba y la concentración de inhibidor para tener un efecto adverso en el 50% de la población, respectivamente; por lo común los valores de EC_{50} suelen ser menores que de LC_{50} .

Tabla 5. Toxicidad de algunos inhibidores de la corrosión.

Compuesto	LC ₅₀ (mg/kg)
Alcohol propargílico	55
Hexynol	34
Cinamaldehído	2200
Formaldehído	800
Dodecyl pyridinium bromide	320
Naphthymethylquinolinium choride	644
Nonylphenol-ethylene oxide	1310

Existe una demanda en crecimiento por inhibidores de la corrosión que resulten menos tóxicos y cuenten con una mejor biodegradabilidad comparado con sus predecesores. Los inhibidores verdes de la corrosión han ido a la vanguardia de investigaciones que permitan mejorar sustancialmente las propiedades de estos mismos para un amplio uso de estos en un futuro cercano.

8 DESARROLLO DEL PROYECTO

8.1. Obtención de las probetas

Para la experimentación se llevaron a cabo el corte, montaje y desbaste del acero. Las probetas fueron obtenidas de una pieza rectangular de un acero al carbono API 5L X52 proporcionado por el Instituto del Petróleo Mexicano, con una composición química reportada en la *Tabla 2*.

Después de haber realizado los cortes, se obtuvieron probetas las cuales fueron embebidas en baquelita en una prensa *XQ-2B Laihua* durante 15 minutos. Siendo sujetadas mediante la inserción de un componente de acero (pija) que permita llevar a cabo un contacto eléctrico, donde el área de contacto baquelita-tornillo fue sellada por medio de resina para evitar el ingreso de líquido al interior de la probeta, finalmente dejando un área expuesta de 3 cm².

Para el desbaste fino de la superficie se llevó a cabo un desbaste mecánico empleando papel abrasivo de carburo de silicio grado: 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1000 y se llevará a cabo un pulido mediante polvo de alúmina hasta lograr un acabado espejo. Finalmente se limpió la superficie con alcohol a presión y un secado con aire forzado.



Figura 9. Probeta de Acero API 5L X52 montada en baquelita con contacto metálico.

8.2. Elaboración de concentrado de Agave Salmiana

Se realizó un concentrado de Agave Salmiana a partir de 100 ml de un producto fermentado de esta especie (pulque) en un rotovapor *BUCHI R-114* a condiciones controladas de presión y temperatura, donde se llevó a cabo hasta que no se observaron condensaciones de vapores en el colector, obteniendo así un concentrado de este producto el cuál se mantuvo en condiciones de congelación cuando no se encontró en uso debido a los efectos que la fermentación pudiera tener sobre este.



Figura 10. Obtención de concentrado mediante evaporación en rotovapor BUCHI R-114

8.3. Preparación de celda electroquímica

La celda se constituye de un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata, contra electrodo de grafito y las probetas de Acero API 5L X52 fungiendo como el electrodo de trabajo, esto en una solución de H_2SO_4 (0.1 M) la cual se preparó con agua des ionizada y reactivo H_2SO_4 Sigma Aldrich.

Los electrodos fueron limpiados por medio de agua des ionizada y secados con aire forzado para evitar cualquier tipo de contaminación en los mismos y posteriormente

se conectaron los respectivos electrodos por medio de sujeción con caimanes a los conectores de un potencióstato galvanostato.

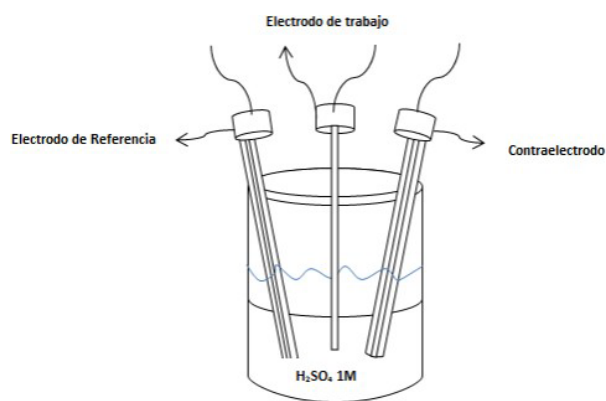


Figura 11. Celda electroquímica típica de tres electrodos.

8.4. Experimentación en condiciones estáticas.

Se evaluó al concentrado de pulque a una temperatura estándar (25°C) haciendo un barrido de concentraciones del inhibidor de 12.5µL desde un blanco hasta los 75µL.

8.4.1. Obtención de Diagramas Nyquist por medio de impedancia en celda electroquímica.

El electrodo de trabajo fue inmerso en, las soluciones 0.1 M H₂SO₄ con las adiciones de concentrado mencionadas y sin concentrado (blanco). Un circuito de potencial abierto (OCP) fue medido durante 15 minutos hasta que se logró conseguir un estado estable sin cambios en el potencial. Las mediciones se realizaron por medio de la técnica de impedancia electroquímica se realizaron en un potencióstato galvanostato *Zahner Zennium*, con una señal de perturbación ±10 mV en un rango de frecuencia de 10⁻⁶-10² Hz con 10 puntos por década.

8.4.2. Obtención de Curvas de Polarización por medio de polarización potenciodinámica en celda electroquímica

Para la obtención de las curvas de polarización se realizó la inmersión del electrodo en la misma solución ácida con las adiciones del concentrado hasta el límite mencionado, así como con una muestra sin concentrado para el blanco. Las mediciones fueron realizadas por medio de la técnica de polarización potenciodinámica en el potencióstato galvanostato *Zahner Zennium*, esto por medio de un escaneo del potencial del electrodo con un rango de búsqueda de ± 300 mV desde el E_{corr} con una velocidad de barrido de 5mV s^{-1} .

8.5. Caracterización por microscopía electrónica de barrido

La morfología superficial de las muestras después de estar inmersas en un medio corrosivo, en presencia y ausencia del inhibidor fueron caracterizadas por Microscopía electrónica de barrido (SEM) mediante un Zeiss Supra 55VP.

9 RESULTADOS

9.1. Evaluación electroquímica de la resistencia a la corrosión mediante espectroscopía de impedancia electroquímica

La inhibición de la corrosión del inhibidor orgánico por medio de la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica fue analizada mediante el uso de un circuito eléctrico correspondiente a la *Figura 12*.

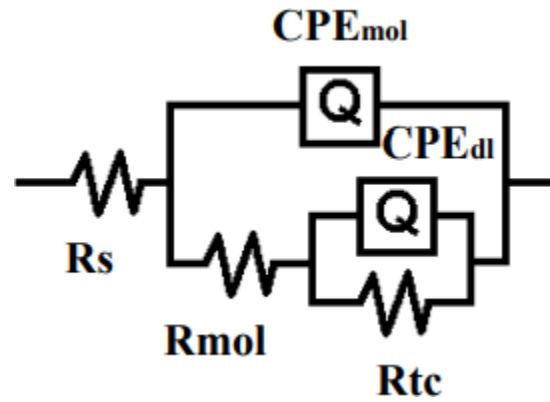


Figura 12. Circuito eléctrico equivalente en el uso de la simulación de espectros de impedancia.

El diagrama de impedancia de tipo Nyquist cuando se encuentra en ausencia de inhibidor (blanco), representa un semicírculo el cual esa relacionado a la resistencia a la transferencia de carga de $\sim 15 \Omega \text{ cm}^2$ *Figura 13(A)*.

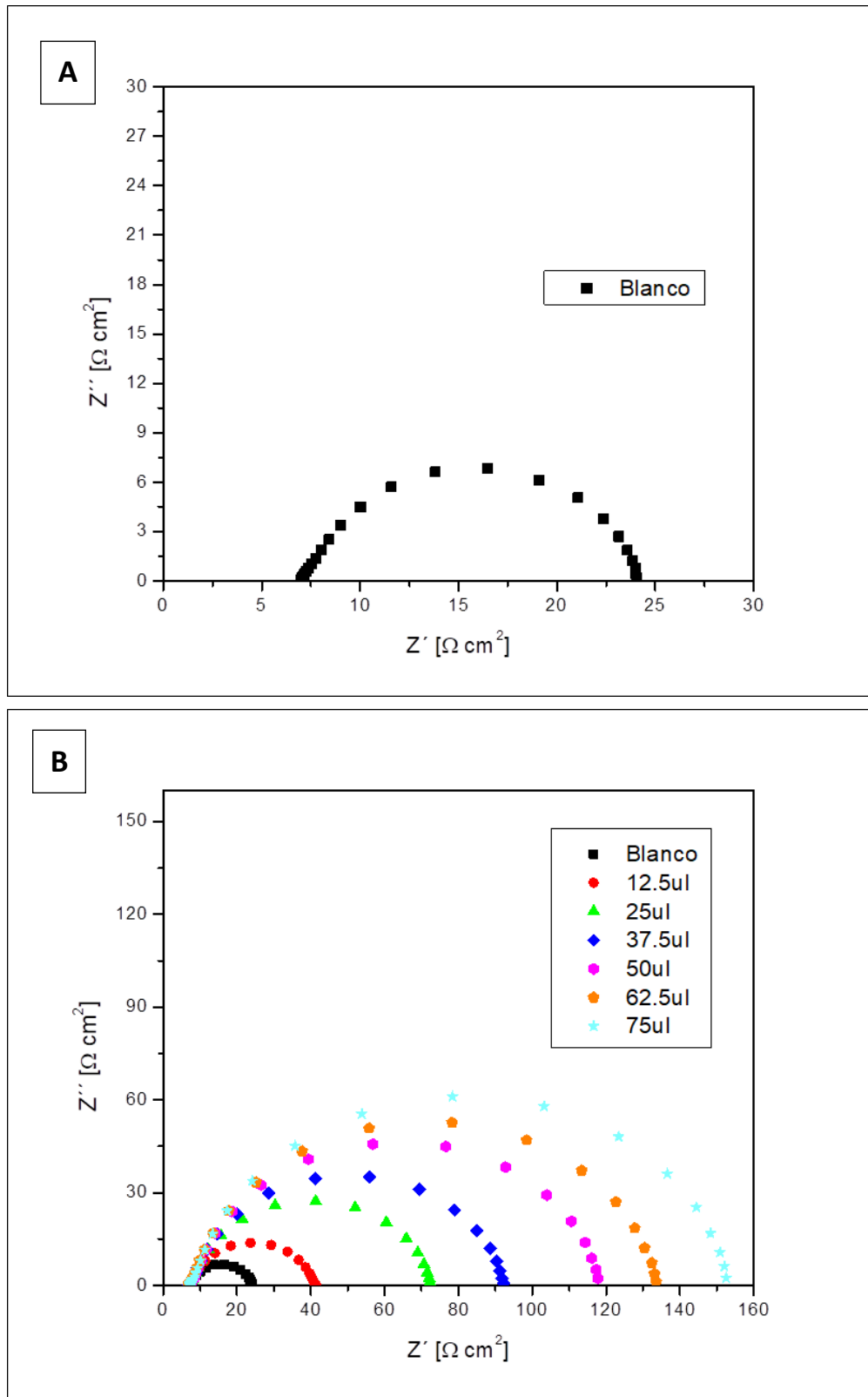
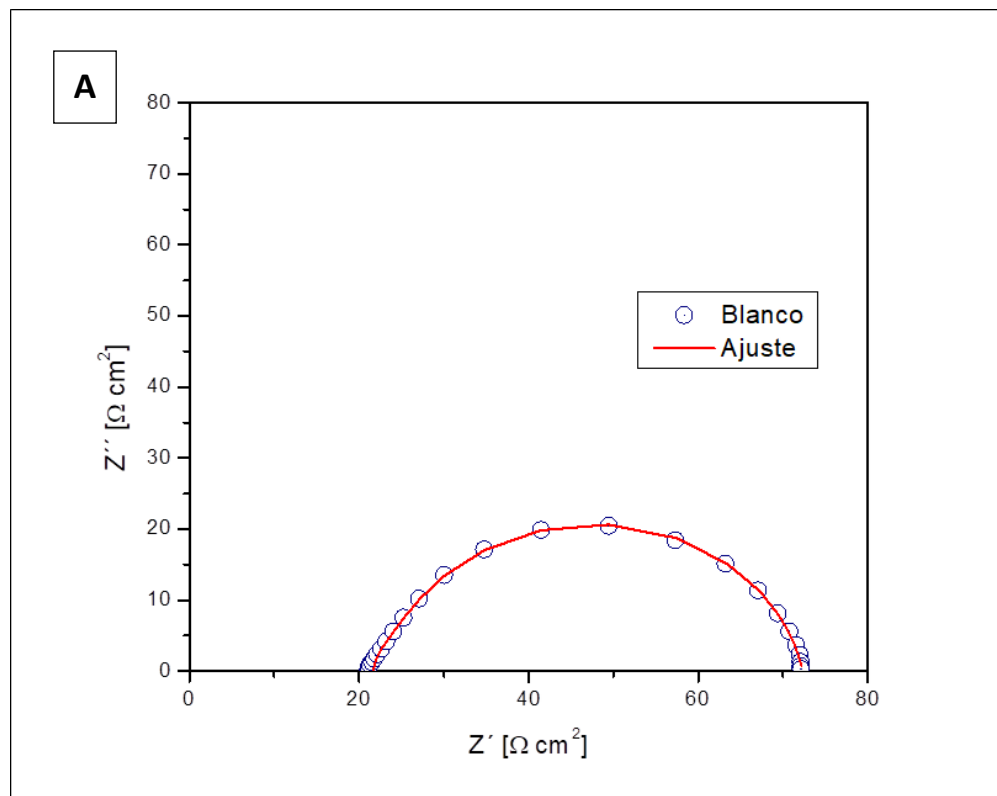


Figura 13. Gráficos experimentales en condiciones estándar de un sistema API 5L X52 en 0.1 M H_2SO_4 . **(A)** Sin inhibidor (0 μL) y **(B)** con variación en las adiciones del concentrado.

La Figura 13(B) muestra los diagramas de Nyquist obtenidos en una solución H_2SO_4 0.1 M en presencia del extracto a distintas concentraciones.

Habiendo obtenido los gráficos relacionados a los diagramas de Nyquist se realiza un ajuste con el circuito eléctrico equivalente de la Figura 12, los cuales son mostrados en la Figura 14.



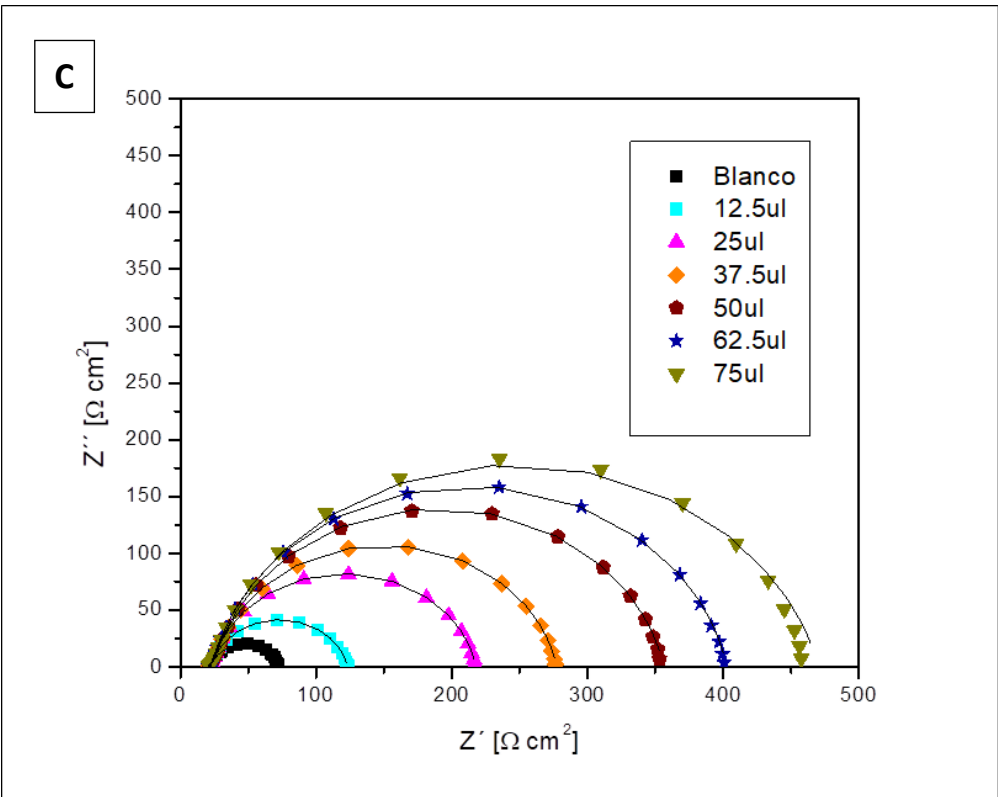
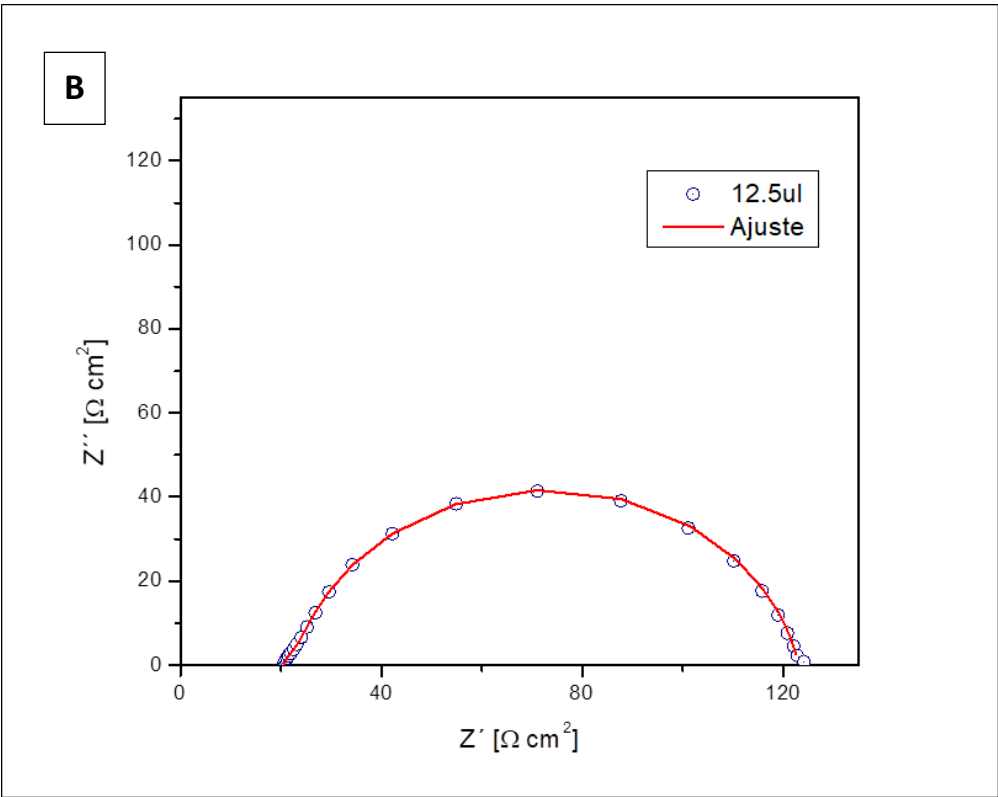


Figura 14. Ajuste mediante circuitos equivalentes de diagramas de Nyquist de (A)Acero API 5L X52, (B)En presencia de una adición (12.5μL) de inhibidor, (C)Diferentes concentraciones del extracto de Agave Salmiana.

Se realiza así mismo una estimación de la capacitancia de doble capa mediante la ecuación

$$C_{dl} = Y_0(\omega'')^{-n} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde, n es el valor asociado a la superficie del electrodo y su grado de heterogeneidad, Y₀ corresponde a la constante CPE y ω'' como el valor máximo de la frecuencia en las impedancias realizadas.

La eficiencia fue calculada mediante la ecuación

$$E_i = 1 - \left(\frac{R_{ct}(\text{blanco})}{R_{ct}(\text{inhibidor})} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

La Tabla 6 muestra los valores obtenidos de la experimentación de EIS con la variación de concentración de extracto de Agave Salmiana.

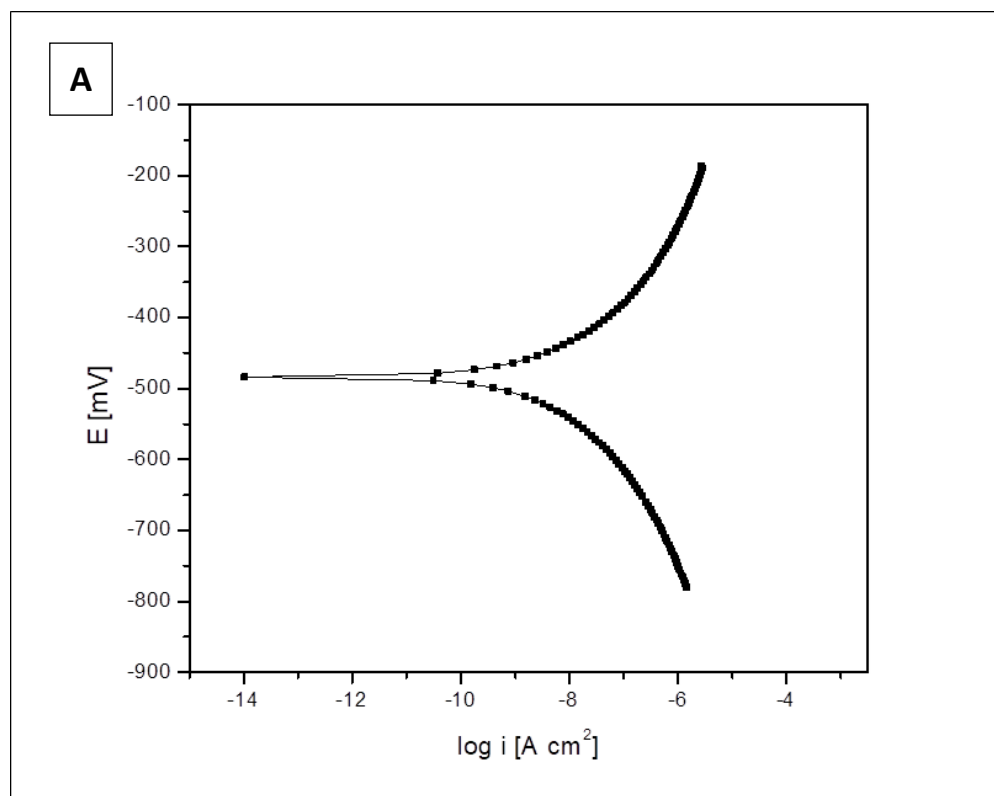
Tabla 6. Parámetros electroquímicos obtenidos durante el ajuste de los datos mostrados en la Figura 14(C)

C [μL]	R _s [Ω cm ²]	n	C _{dl} [μF cm ⁻²]	E _{corr} [mV]	R _{ct} [Ω cm ²]	Ef [%]
0	21.74	0.8277	1.559	-485	41.8	-
12.5	20.57	0.8782	1.885	-494	93.3	55.2
25	20.54	0.8862	4.294	-504	187.2	77.6

37.5	20.99	0.8857	6.459	-512	245.4	82.9
50	21.45	0.8809	6.753	-516	323	87
62.5	20.54	0.8798	10.526	-518	370.9	88.7
75	22.03	0.8343	0.0040	-519	438.1	90.4

9.2. Evaluación electroquímica de la resistencia a la corrosión mediante polarización potenciodinámica

La determinación de la resistencia a la corrosión mediante curvas de polarización se realizaron con un barrido de 5mV en un intervalo de ± 300 mV con respecto a su valor de E_{corr} . La densidad de corriente fue obtenida mediante extrapolación de Tafel.



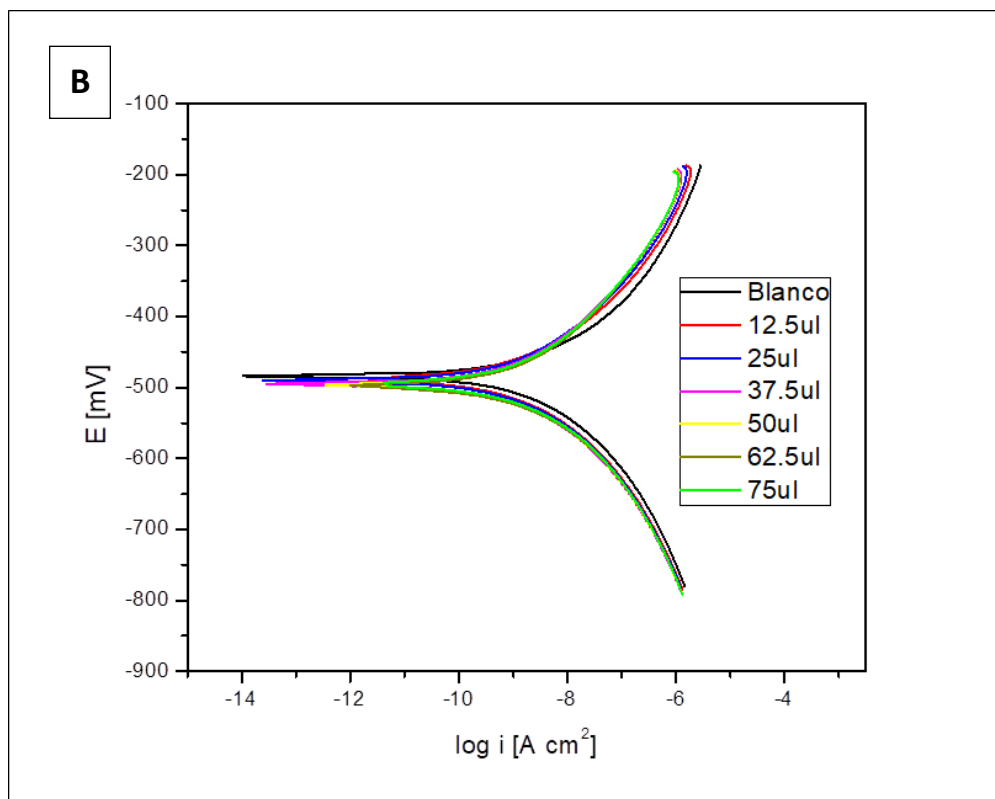


Figura 15. Curvas de polarización obtenidas en el sistema API 5L X52/0.1 M H_2SO_4 en (A) Blanco (sin inhibidor), (B) Distintas concentraciones de inhibidor.

Haciendo un análisis y un respectivo ajuste en el campo bajo obtenido por las curvas de polarización potenciodinámica es posible determinar el tipo de mecanismo por el cual opera el inhibidor, siendo de tipo anódico, catódico o mixto mediante las pendientes anódicas y catódicas. Figura 16.

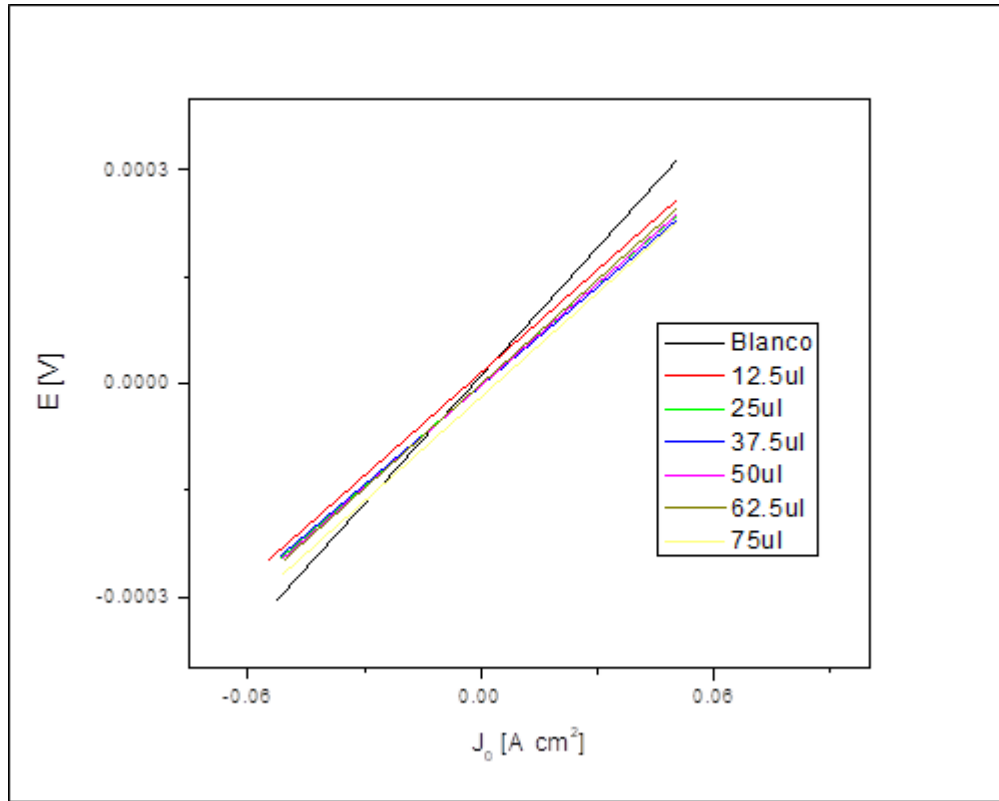


Figura 16. Pendientes anódicas y catódicas de campo bajo, obtenidas de curvas de polarización potenciodinámica de sistema API 5L X52 inmerso en H_2SO_4 en distintas adiciones de inhibidor.

9.3. Microscopía electrónica de barrido

Se requirió de imágenes de microscopía electrónica de barrido para observar cual fue la interacción entre la superficie del metal, el sistema ácido y el inhibidor, mostradas en la Figura 17.

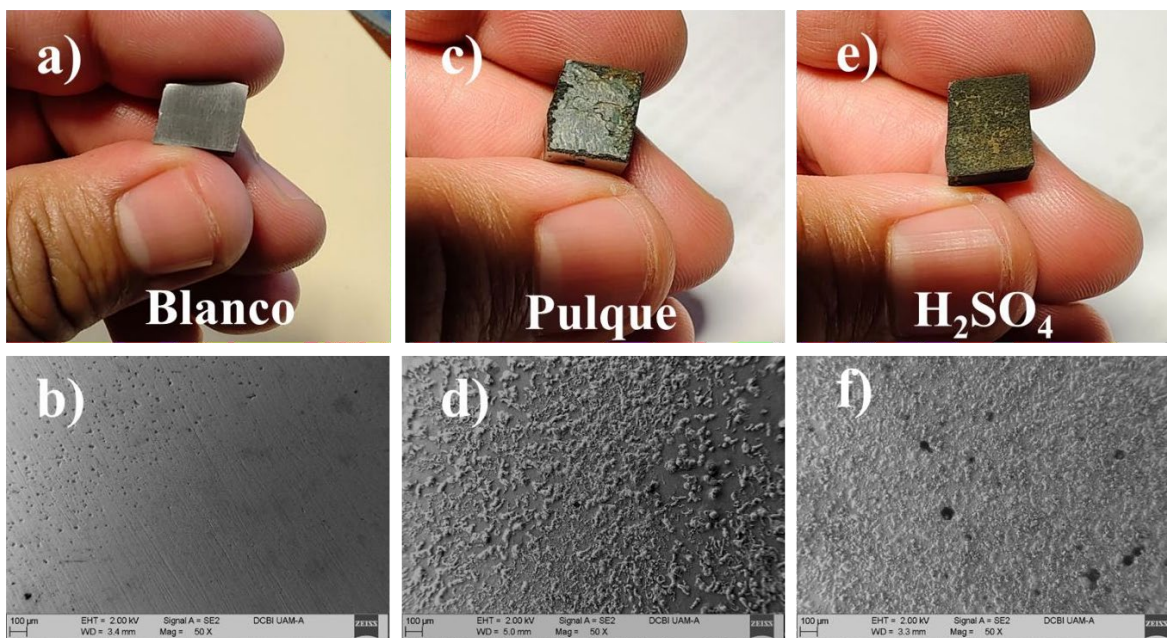


Figura 17. Imágenes de: A) Acero API 5L X52 (blanco), B) SEM de acero API 5L X52, C) Acero en sistema H_2SO_4 en presencia del inhibidor, D) SEM de acero en sistema H_2SO_4 en presencia de inhibidor, E) Acero en sistema H_2SO_4 , F) SEM de acero en sistema H_2SO_4 .

10 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los diagramas de Nyquist de la *Figura 13* se muestran de la forma de un semicírculo, este comportamiento indica que la corrosión del acero API 5L X52 en la solución ácida H_2SO_4 es controlada o se lleva a cabo por medio de transferencia de carga.

Se denota un aumento en el diámetro de los semicírculos formados a la par del aumento en la concentración del extracto de *Agave Salmiana*, este incremento de referirse a la adsorción de moléculas en la superficie del acero y a su vez se relaciona directamente con el incremento en la resistencia a la transferencia de carga del electrodo de trabajo por las adiciones del inhibidor.

Puede observarse de las Figuras 14 (A), (B), (C) como a medida que se tiene un aumento en la eficiencia de inhibición a razón de que se tiene un aumento en las

concentraciones del inhibidor de Agave Salmiana hasta llegar a un máximo de eficiencia de 90.4%.

Los parámetros que se derivaron de los diagramas de Nyquist enlistados en la Tabla 6 muestran el incremento de la R_{ct} y una disminución en la C_{dl} a medida que se tiene un aumento en la concentración del inhibidor. Estos resultados pueden atribuirse a la formación de una capa protectora, por acción del inhibidor, que se forma entre el acero y la solución ácida.

Haciendo un análisis de las curvas de polarización de la Figura 15, a medida que se tiene un incremento en la concentración del inhibidor, incrementa así el valor del OCP, volviéndose más negativo. De ello, puede denotarse que la velocidad de corrosión en cada caso disminuye en función de la concentración del inhibidor.

Por medio de los parámetros derivados de las curvas de polarización potenciodinámica, fue posible obtener las pendientes anódicas y catódicas las cuales operan en el proceso, siendo esta de un tipo mixto, debido a que se tiene un desplazamiento en la inclinación tanto del lado catódico como del lado anódico como puede observarse en la Figura 16.

Los resultados obtenidos por microscopía electrónica de barrido Figura 17 representan las diferentes morfologías que se obtuvieron. La Figura 17 (B) muestra la superficie del acero que no estuvo sujeta al sistema H_2SO_4 . La Figura 17 (D) muestra una superficie donde puede denotarse el efecto de inhibición que tiene el extracto de Agave Salmiana, con una adición de 75 μL y donde se presenta una homogeneidad en la película formada, por lo que se tiene una disminución en el deterioro del acero inmerso en el sistema ácido, contrario a lo que puede observarse en la Figura 17 (F) donde picaduras superficiales están presentes en el acero, similares a los que se forman en un medio rico en cloruros.

11 CONCLUSIONES

La capacidad de inhibición de corrosión de un extracto natural proveniente del Agave Salmiana se determinó mediante el uso de un acero API 5L X52 expuesto a un medio ácido 0.1 M H₂SO₄ alcanzando un máximo de eficiencia de 90.4% a 75µL. De acuerdo a los resultados obtenidos por las curvas de polarización se determinó que el inhibidor puede ser considerado como uno de tipo mixto el cuál es corroborado con los resultados de EIS.

12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (NACE), N. A. (s.f.). Obtenido de www.nace.org/corrosion-central/corrosion-101/
- A. Akiyama, K. K. (1970). Electrochemical Characteristics of Iron in Acidic Solutions Containing Ring-Substituted Benzoic Acids. *Journal of The Electrochemical Society*, 117.
- A.M. Abdel-Gaber, B. A.-E.-N.-Z. (2006). Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media. *Corrosion Science.*, 48.
- Amir Golchinvafo, S. (2020). The effect of natural inhibitor concentration of Fumaria officinalis and temperature on corrosion protection mechanism in API X80 pipeline steel in 1 M H₂SO₄ solution. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 6.
- Battelle Columbus Laboratories, N. (1995). *Economic Effects of Metallic Corrosion in the United States*.
- El-Etre, A. (2007). Inhibition of acid corrosion of carbon steel using aqueous extract of olive leaves. *Journal of Colloid and Interface Science.*, 2.
- Frenier, W. (1996). Development and testing of a low-toxicity acid corrosion inhibitor for industrial cleaning applications. *NACE Houston*.
- Greene., M. G. (1978). *Corrosion Engineering*. 2da. Ed. Mc Graw.Hil.
- H, A. (2003). Combating Plate Corrosion: Improving Corrosion Resistance Through Welding, Fabrication Methods. *The Fabricator*.
- Hatsuo Ishida, R. J. (1986). The inhibition of copper corrosion byazole compounds in humid environments. *Corrosion Science*, 657-667.
- J. Aldana-González, H. C.-C.-R.-C.-C.-R.-Y.-G.-H.-P. (2020). Experimental and theoretical study on the corrosion inhibition of API 5L X52 steel in acid media by a new quinazoline derivative. *Journal of Molecular Liquids.*, 3.

- Javidi, M. H. (2012). Corrosion inhibition and adsorption behaviour of an amido-imidazoline derivative on API 5L X52 steel in CO₂-saturated solution and synergistic effect of iodide ions. *Corrosion Science*, 148-155.
- Llanos, .. R. (2003). Corrosión, su tradición y alcances., (págs. 51-63).
- M. Abdallah, E.-E. A. (2000). Natural honey as corrosion inhibitor for metals and alloys. II. C-steel in high saline water. *Corrosion Science*, 42.
- M.S., F. M. (1953). *The Eight Forms of Corrosion and Corrective Measures*. NML, Jamshedpur.: Symposium on Industrial Failure of Engineering Metals & Alloys.
- Mohd Asyadi Azam, S. (2020). Corrosion behavior of API-5L-X42 petroleum/natural gas pipeline steel in South China Sea and Strait of Melaka seawaters. *Engineering Failure Analysis.*, 1.
- Monticelli, C. (2018). Encyclopedia of Interfacial Chemistry. Elsevier.
- O., L. (2014). *Forms of Corrosion: Intergranular Corrosion and Stress Corrosion*. Obtenido de <https://degradation.wordpress.com/2014/10/23/forms-of-corrosion>
- Pautovskaya, V. (2000). Some results of a research in the problem "Inhibitors of metal corrosion". Toxicology and industrial hygiene. *Prot Met.*, págs. 89-93.
- R.G., S. B. (2005). What Is Corrosion? *The Electrochemical Society Interface*.
- Schweitzer, P. P. (2009). *Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*. Taylor & Francis.
- Singh, I. (1993). Inhibition of Steel Corrosion by Thiourea Derivatives . *The Journal of Science & Engineering*, 49.
- Skotheim, T. (1986). *Handbook of Conducting Polymers*. New York: Marcel Dekker.
- Technology, S. M. (s.f.). Obtenido de www.smt.sandvik.com/en/materials-center/corrosion/wet-corrosion/pitting/
- W. Lorenz, Z. (1962). Physical Chemistry.
- Wang X, R. S. (2018). Preparation method and research direction of plant corrosion inhibitors. *Surface Technology*, 47.
- Wei Wu, Z. (2019). Electrochemical characteristic and stress corrosion behavior of API x70 high-strength pipeline steel under a simulated disbonded coating in an artificial seawater environment. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 1.