

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE INHIBICIÓN DEL EUGENOL, O-EUGENOL
Y DIFENOL, SOBRE EL ACERO AISI 1020 EXPUESTO A UN MEDIO ÁCIDO DE
HCl 1M POR MEDIO DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS**

**DIANA PATRICIA CAMACHO LAGUADO
GISELLE PAOLA VESGA ABRIL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE INHIBICIÓN DEL EUGENOL, O-EUGENOL
Y DIFENOL, SOBRE EL ACERO AISI 1020 EXPUESTO A UN MEDIO ÁCIDO DE
HCl 1M POR MEDIO DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS**

**DIANA PATRICIA CAMACHO LAGUADO
GISELLE PAOLA VESGA ABRIL**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director

**DIONISIO ANTONIO LAVERDE CATAÑO
Ph.D. en Ingeniería Industrial**

Codirectores

**DIEGO ROLANDO MERCHAN ARENAS
Ph.D. en Química**

**JAVIER ALBERTO SANABRIA CALA
M.sc. en Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

Primeramente a Dios por permitirme culminar esta meta.

A la memoria de mi padre, hombre y amor de mi vida, aunque tu tiempo fue corto, sé que has estado en cada paso que he dado a lo largo de mi vida. Te amo papá.

A mi madre, ejemplo de superación, gracias por tu gran apoyo, sin eso no estuviera donde estoy. Te amo mamá.

A mi hermano, mis abuelos y demás familiares, por ser ese apoyo incondicional, por no permitirme flaquear en los peores momentos. Gracias.

Al profesor Javier Sanabria, por su constante guía y apoyo en lo largo del proyecto. Gracias por la confianza depositada en nosotras.

A mis amigos: Angélica, Wendy, Nathalia, Juliana, Elkin, Aleja y Silvia, más que amigos, mi familia, por aguantarme, darme ánimos cuando no veía la salida a mis problemas y ser mis “polos a tierra”. Gracias feos.

A las demás personas que de una u otra forma contribuyeron al alcance de esta meta.

Diana Camacho

DEDICATORIA

Como siempre, a Dios por permitirme culminar este logro.

Para mis papás, Sonia Abril y Jaime Vesga que junto a mi hermano Jaime Andrés han estado guiándome y entregando su constante apoyo en la realización de todas mis metas.

A Fabián Calderón, por siempre estar ahí para brindarme consejos y ser la mejor compañía posible.

Por último, a todas las personas que conocí en la carrera que de una u otra manera me ayudaron a crecer como persona, en especial a aquellas que siguen formando parte esencial de mi vida.

Giselle Vesga.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirnos alcanzar un nuevo logro.

Dr. Dionisio Laverde, por brindarnos la oportunidad de realizar este trabajo de investigación.

M.sc. Javier Sanabria, por la dedicación y guía a lo largo del proyecto de grado.

Dr. Darío Peña, por concedernos usar las instalaciones del Grupo de Investigaciones en Corrosión (GIC).

A los profesores Nerly Montañez y Anderson Sandoval, por su colaboración en el desarrollo de la investigación.

Al laboratorio de Química Orgánica y Biomolecular, en especial a Luis Cortes y Diego Merchán por su contribución al trabajo de grado.

A los laboratorios del Parque Tecnológico Guatiguará, por prestarnos sus instalaciones en la elaboración de las pruebas, resaltando el laboratorio de Microscopía.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. ESTADO DEL ARTE	21
2. MARCO TEÓRICO	24
2.1. CORROSIÓN.....	24
2.1.1. Corrosión por picado.....	24
2.2. INHIBIDORES DE CORROSIÓN.....	25
2.2.1. Inhibidores verdes.....	25
2.3. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.....	26
2.3.1. Potencial de Circuito Abierto (PCA).....	26
2.3.2. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).....	26
2.3.2.1. Diagrama de Nyquist.....	26
2.3.2.2. Diagrama de Bode	26
2.3.3. Resistencia a la Polarización Lineal (RPL).....	27
2.3.4. Curvas Potenciodinámicas.....	27
3. METODOLOGÍA	28
3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	28
3.2. VARIABLES DE OPERACIÓN.....	29
3.3. PREPARACIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS.....	29

3.3.1. Probetas.....	29
3.3.2. Solución de Ácido Clorhídrico	30
3.3.3. Equipos	30
3.3.4. Técnicas de evaluación.....	31
3.3.5. Montaje Experimental	31
3.4. PRUEBAS PRELIMINARES	31
3.5. PRUEBAS EXPERIMENTALES	32
3.6. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN	32
3.7. EFICIENCIA DE INHIBICIÓN DEL INHIBIDOR VERDE DE CORROSIÓN....	32
3.8. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA SUPERFICIE DEL ACERO AISI 1020.	32
3.9. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	33
3.10. INFORME FINAL	33
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	34
4.1. PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS	34
4.1.1. Potencial de circuito abierto	34
4.1.1.1. Pruebas preliminares.	34
4.1.1.2. Pruebas experimentales.	35
4.1.2. Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (Diagrama de Nyquist)	37
4.1.2.1. Pruebas Preliminares.....	37
4.1.2.2. Pruebas Experimentales.....	38
4.1.3. Curvas de Polarización Tafel.....	40
4.1.3.1. Pruebas Preliminares.....	40

4.1.3.2. Pruebas Experimentales.....	41
4.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) EN COMBINACIÓN CON ESPECTROMETRÍA DE ENERGÍA DISPERSA DE RAYOS X (EDS)	44
5. CONCLUSIONES	47
6. RECOMENDACIONES.....	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
BIBLIOGRAFÍA	54
ANEXOS.....	58

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de Flujo de la Metodología.	28
Figura 2. Dimensiones de la probeta AISI 1020.....	29
Figura 3. Celda Electroquímica.....	30
Figura 4. Potencial de circuito abierto para pruebas preliminares.	34
Figura 5. Curvas de Potencial de Circuito Abierto para pruebas experimentales. .	35
Figura 6. Diagramas de Nyquist para pruebas preliminares.	37
Figura 7. Diagramas de Nyquist para pruebas experimentales.	38
Figura 8. Curva de Polarización Potenciodinámica para pruebas preliminares.	40
Figura 9. Curvas de Polarización de Tafel para pruebas experimentales.....	41
Figura 10. SEM-EDS de la superficie del blanco.	44
Figura 11. SEM-EDS de la superficie de la probeta en medio ácido HCl 1M y Difenol.....	45
Figura 12. SEM-EDS de la superficie de la probeta en medio ácido HCl 1M.	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variables de operación.	29
Tabla 2. Valores de potencial de corrosión de las pruebas preliminares.	35
Tabla 3. Datos electroquímicos de las pruebas preliminares extraídos por interpolación de las curvas de polarización.	41
Tabla 4. Datos electroquímicos de las pruebas experimentales extraídos por interpolación de las curvas de polarización.	43

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Información general del Acero al carbono AISI 1020.....	58
ANEXO B. Pruebas Experimentales.	60
ANEXO C. Inhibidores Verdes de Corrosión.	61
ANEXO D. Valores de resistencia a la transferencia de carga.	62
ANEXO E. Cálculo para la velocidad de Corrosión.....	63

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE INHIBICIÓN DEL EUGENOL, O-EUGENOL Y DIFENOL, SOBRE EL ACERO AISI 1020 EXPUESTO A UN MEDIO ÁCIDO DE HCl 1M POR MEDIO DE PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS*

AUTORES: DIANA PATRICIA CAMACHO LAGUADO.
GISELLE PAOLA VESGA ABRIL**

PALABRAS CLAVES: Inhibidores verdes de Corrosión, Ácido Clorhídrico (HCl), Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), Polarización Potenciodinámica.

DESCRIPCIÓN:

Por daños generados a partir de la corrosión, la industria invierte millones de dólares en la mitigación de este problema, que se presenta básicamente en equipos y tuberías metálicas, tanto de manera externa como interna. Una posible solución a las diferentes consecuencias causadas por la corrosión, es el uso de inhibidores verdes de corrosión.

En el presente proyecto de investigación, se evaluó el potencial de inhibición del eugenol, el o-eugenol y el difenol, sobre un acero al carbono AISI 1020 expuesto a un medio ácido de HCl 1M. Con base en lo anterior, se calculó la velocidad de corrosión del material en soluciones con y sin inhibidor verde de corrosión bajo la influencia de dos variables de operación: la temperatura y el tiempo de inmersión; aplicando técnicas como Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) y Polarización Potenciodinámica. Además, se caracterizó la superficie del acero al carbono AISI 1020 por medio de: Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) en combinación con Espectrometría de Energía Dispersa de Rayos X (EDS), antes y después de la exposición al medio corrosivo.

Las pruebas preliminares dan como resultados que el inhibidor a base de Difenol obtuvo una eficiencia de 96.24% respecto a una media de 74% para los otros dos inhibidores verdes de corrosión. Las pruebas experimentales dan como resultado que el porcentaje de inhibición aumenta a medida que aumentan la temperatura y el tiempo de inmersión de la celda electroquímica en el sistema, lográndose así un porcentaje máximo de inhibición en la velocidad de corrosión del acero AISI 1020 del 92.23% para una temperatura de 80°C y 6 horas de tiempo de inmersión.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ph.D. Dionisio Laverde Cataño

ABSTRACT

TITLE: EVALUATING THE INHIBITION POTENTIAL OF EUGENOL, O-EUGENOL AND DIPHENOL, ON AISI 1020 STEEL EXPOSED TO A 1M HCl ACID MEDIUM THROUGH ELECTROCHEMICAL TEST*.

AUTHORS: DIANA PATRICIA CAMACHO LAGUADO.
GISELLE PAOLA VESGA ABRIL**

KEY WORDS: Green Corrosion Inhibitors, Hydrochloric Acid (HCl), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), Potentiodynamic Polarization.

DESCRIPTION:

Due to damages generated from corrosion, industry invests millions of dollars in the mitigation of this problem, which is presented basically in equipment and metal pipes, both externally and internally. A possible solution to the different consequences caused by corrosion is the use of green corrosion inhibitors.

In the present research project, the inhibition potential of the essential oil of eugenol, o-eugenol and diphenol, on AISI 1020 carbon steel exposed to a 1M HCl acid medium is evaluated. Hence, the corrosion rate of the material in solutions with and without green corrosion inhibitor was calculated under the influence of two operating variables: temperature and immersion time; applying techniques such as Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and Potentiodynamic Polarization. In addition, the surface of AISI 1020 carbon steel was characterized by: Scanning Electron Microscopy (SEM) in combination with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), before and after the exposure to the corrosive medium.

Preliminary tests show that the Diphenol-based inhibitor obtained an efficiency of 96.24% compared to an average of 74% for the other two green corrosion inhibitors. The experimental results show that the percentage of inhibition increases as the temperature and immersion time of the electrochemical cell increase in the system, thus achieving a maximum percentage of inhibition in the corrosion rate of AISI 1020 steel of 92.23% for a temperature of 80 ° C and 6 hours of immersion time.

* Degree work

** Faculty of Engineering Physical Chemical. School of Engineering Chemical Director: Ph.D. Dionisio Laverde Cataño.

INTRODUCCIÓN

En la cima de las torres de destilación atmosférica (TDA), se presenta corrosión ácida, corrosión bajo depósito y/o ensuciamiento. La corrosión ácida y bajo depósitos son un problema complejo que tienen su causa raíz en las impurezas contenidas en los diferentes crudos que ingresan al proceso, las cuales en su mayoría son corrosivas, por lo tanto, ocasionan problemas a los equipos de refinación de crudos [1].

La corrosión ácida se origina por la presencia de ácido clorhídrico (HCl). El ácido clorhídrico en fase vapor es corrosivo para el acero al carbono, pero llega a serlo en forma extrema cuando condensa en compañía del agua; en las torres de destilación la formación del ácido clorhídrico se debe a la hidrólisis de las sales inorgánicas de cloruros de calcio y magnesio [1-2], luego se condensa en las zonas frías y al entrar en contacto con el agua forma ácido clorhídrico. Después, el HCl se disuelve en el agua y el ácido ataca la superficie del metal, produciendo corrosión por picado [2].

Para prevenir dicho daño, los inhibidores de corrosión se añaden normalmente a las soluciones ácidas [3]. Dependiendo de la naturaleza del mismo puede ser inorgánico, actuando como inhibidor catódico o anódico u orgánico formando una película protectora. Sin embargo, algunos inhibidores han dejado de ser empleados debido a sus propiedades tóxicas. Debido a lo anterior, se ha planteado el uso de moléculas orgánicas con características más amigables con el medio ambiente, las cuales se les conoce como inhibidores verdes de corrosión (IVC) [4].

La mayoría de los inhibidores verdes no son tóxicos, son biodegradables y son abundantes en la naturaleza. Hasta el momento, ya se han utilizado extractos a partir de semillas, frutas, hojas, flores, entre otros; y se ha encontrado que reducen notablemente la velocidad de corrosión (VC) [5]. En los extractos de plantas, están presentes un gran número de compuestos químicos, especialmente heterocíclicos, que inhiben la corrosión de manera eficiente. El efecto inhibidor se atribuye a la adsorción de estas sustancias orgánicas sobre la superficie del metal, que bloquea los sitios activos o forman una capa protectora [5].

La mayoría de inhibidores orgánicos actúan por adsorción en la interfase metal/solución; mediante el desplazamiento de las moléculas de agua formando una película compacta que funciona como barrera. La adsorción se ve influenciada por la naturaleza y la carga de la superficie del metal, el tipo de electrolito, la temperatura y la estructura química del inhibidor. De hecho, la interacción específica entre los grupos funcionales, la superficie del metal y heteroátomos como el nitrógeno, oxígeno, azufre y fósforo juegan un papel clave en la inhibición debido a los pares de electrones libres que poseen [5], es por eso, que se ha despertado el interés por las moléculas orgánicas capaces de mitigar la corrosión.

En el presente trabajo de investigación, se evaluó el potencial de inhibición del aceite esencial de frutos secos de clavo (*Syzygium aromaticum*), el o-eugenol y el difenol, así como el efecto de la temperatura y el tiempo de exposición en la velocidad de corrosión del acero al carbono AISI 1020 expuesto a un medio ácido de HCl 1M, por medio de técnicas electroquímicas como: Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y Polarización Potenciodinámica. Se caracterizó la superficie del acero al carbono antes y después de la inmersión en el sistema corrosivo, utilizando Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) combinada con Espectrometría de Energía Dispersa de Rayos X (EDS).

1. ESTADO DEL ARTE

M. A. Quraishi y colaboradores en 2015, sintetizaron tres Bis (Indolil) metanos (BIMs) y comprobaron su eficiencia de inhibición a la corrosión de acero al carbono en una solución de ácido clorhídrico (1M) mediante métodos como: Gravimetría, Electroquímica, Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopia de Dispersión de Energía de Rayos X (EDX). La adsorción de los inhibidores en la superficie del acero al carbono obedeció a la isoterma de adsorción de Langmuir. La morfología superficial del acero en ausencia de inhibidor presentó daño en la superficie. Sin embargo, en presencia de BIMs la superficie del material mejoró significativamente. Este hallazgo apoya que los BIMs inhiben la corrosión del acero al carbono por el mecanismo de adsorción [1].

Abraham Joseph y colaboradores en 2015, estudiaron extractos de Pimenta Dioica (PD) como inhibidor de la corrosión para acero al carbono en un medio ácido (0.5M y 1M HCl). Las velocidades de corrosión se evaluaron a 303, 308 y 313 K, utilizando Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) y Polarización Potenciodinámica. También llevaron a cabo estudios de adsorción para obtener el mecanismo de inhibición a la corrosión, el cual resulta en una combinación de fisorción y quimisorción. Las pruebas electroquímicas revelaron que los extractos de PD exhiben excelente eficiencia de inhibición en la velocidad de corrosión del acero al carbono y funcionan como inhibidores de corrosión tipo mixto a las diferentes temperaturas, pero dicha eficiencia de inhibición disminuye con el aumento de la temperatura en el sistema [2].

B. Ramezanzadeh y colaboradores en 2015, investigaron un nuevo inhibidor verde de corrosión utilizando morus alba pendula extraída de la hoja de maple, para un acero al carbono AISI 1020 en una solución con ácido clorhídrico (1M) a

diferentes concentraciones (0.1-0.4 g/L) y temperaturas (25-60 °C). Realizaron pruebas electroquímicas como: Polarización Potenciodinámica y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica. Los resultados indicaron que la eficiencia del inhibidor incrementa con el aumento de la concentración de la hoja de maple, mientras que se presenta una tendencia descendente en la eficiencia del inhibidor cuando se incrementa la temperatura del sistema [3].

F. Bentiss y colaboradores en 2015, se dedicaron al estudio del aceite esencial de *Artemisia Mesatlantica* (AMEO) como inhibidor verde de corrosión para proporcionar protección al acero al carbono SAE 1035 en un medio HCl (1M) a 30°C. Realizaron pruebas de Gravimetría y técnicas electroquímicas (Polarización Potenciodinámica y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica), además de pruebas como el análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopia Fotoeléctrica de Rayos X (XPS) para la caracterización morfológica del AMEO y determinar la composición química del inhibidor formado sobre la superficie del acero. AMEO actuó como un inhibidor eficaz contra la corrosión del acero al carbono en HCl (1M) y su eficiencia de inhibición aumentó con la concentración del inhibidor. Los estudios de XPS mostraron que se formó una película en la superficie del material y está compuesta de una mezcla de óxido de hierro e hidróxido de hierro donde se incorporan moléculas de AMEO [4].

R. Solmaz y colaboradores en 2015, realizaron pruebas de corrosión a tres derivados de Piridazina (MPYO, PPYO y PPYS) para el acero al carbono en una solución de ácido clorhídrico (1M) por técnicas electroquímicas (Polarización Potenciodinámica, EIS). Los estudios experimentales y teóricos coincidieron que el PPYS es el mejor inhibidor de corrosión entre los compuestos orgánicos estudiados. La adsorción de las moléculas de PPYS en la superficie metálica obedece a la isoterma de adsorción de Langmuir. Los parámetros termodinámicos sugirieron que este compuesto se adsorbe fuertemente sobre la superficie de

acero al carbono. La mejor eficiencia de inhibición de PPYS podría ser asignada a la presencia de un átomo de azufre en su estructura molecular [5].

2. MARCO TEÓRICO

2.1. CORROSIÓN

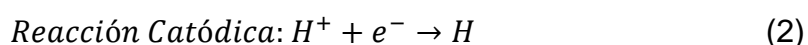
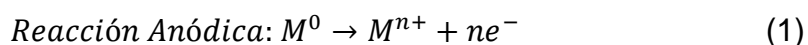
La corrosión es el deterioro que sufren los metales ante una reacción química o electroquímica en un medio específico; el cuál puede ser ácido, básico o condiciones ambientales, la cual puede verse afectada por factores como la temperatura y las composiciones, tanto del metal como del medio en el cual se encuentra el metal atacado por corrosión [10].

En el caso del medio ácido, éste se puede dar debido al transporte de sustancias con componentes ácidos disueltos, limpiezas de equipos, procesos de decapados y descalcificación [11]. El ácido clorhídrico es un ácido fuerte y altamente reductor, siendo de los más usados en el estudio con pruebas electroquímicas. La velocidad de corrosión del acero está en función de la concentración de ácido clorhídrico (HCl), a medida que se aumenta la concentración, aumenta la velocidad de corrosión del acero [12].

2.1.1. Corrosión por picado. La corrosión por picadura es un tipo de corrosión localizada, responsable de al menos el 90% de los daños causados por este fenómeno en la industria química. Su daño radica en la rapidez con la que puede llegar a provocar la perforación en la pieza de metal afectada [13]. En los aceros al carbono, los productos resultantes de la corrosión se depositan en los agujeros generados por el picado, dando así la posibilidad de continuidad en el ataque corrosivo. Este tipo de ataque se puede dar por imperfecciones e impurezas en el material, transformaciones debidas a procesos como soldaduras y formación de pequeñas celdas electrolíticas entre los metales en contacto o con algún medio corrosivo [10].

2.2. INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Un inhibidor de corrosión es una sustancia química que, tras la adición a un ambiente corrosivo, genera una disminución de la velocidad de corrosión. En las soluciones ácidas, las reacciones anódica y catódica son la oxidación del metal y la reducción de los iones hidrógeno, respectivamente [14]:



El inhibidor puede afectar la velocidad de reacción anódica, la reacción catódica o ambas. El cambio en el potencial de corrosión aumenta tras la adición del inhibidor indicando así que el proceso ha sido inhibido. La adsorción del inhibidor en el metal puede estudiarse mediante la determinación de curvas de polarización anódica y catódica [14].

2.2.1. Inhibidores verdes. Los actuales cambios ambientales generan que la industria se adapte a nuevas condiciones que respeten el medio ambiente, en esto los inhibidores no son la excepción. Los inhibidores verdes no son tóxicos y benefician al medio ambiente, provenientes de fuentes vegetales, estos compuestos orgánicos contienen entre sus grupos funcionales átomos de nitrógeno, azufre y oxígeno, utilizados en la prevención de la corrosión [12].

Los inhibidores verdes disminuyen los crecientes niveles de toxicidad, al contener componentes ya sean orgánicos, aminoácidos, extractos de plantas y compuestos de metales de tierras raras, que hacen del inhibidor una sustancia biodegradable y de baja acumulación en el ambiente en el cual es usado [12].

2.3. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

2.3.1. Potencial de Circuito Abierto (PCA). Técnica electroquímica que consiste en polarizar las áreas anódicas y catódicas en la superficie del acero expuesto a un medio definido, para alcanzar un único valor de potencial, el cual se conoce como potencial de circuito abierto (PCA) o potencial de corrosión (E_{corr}) [15].

Es una técnica útil para asegurar la estabilidad electroquímica de la celda y la estimación del potencial de corrosión de un metal inmerso en un medio específico [16].

2.3.2. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS). Técnica electroquímica consistente en la aplicación de un potencial eléctrico de frecuencia variable a un material estudiado y como éste responde en términos de corriente, capacitancia y resistencia. Este tipo de mediciones suele darse en intervalos de temperatura amplios dentro de celdas electroquímicas de dos y tres electrodos [17].

La espectroscopia de impedancia electroquímica se puede representar gráficamente de dos maneras:

2.3.2.1. Diagrama de Nyquist. El eje imaginario representa la parte capacitiva del sistema y el eje real indica la resistencia a la transferencia de carga. La forma que adopte la gráfica indica la tasa de corrosión y lo que está sucediendo en términos generales en la superficie del material estudiado [17].

2.3.2.2. Diagrama de Bode. De este diagrama se obtiene como respuesta la impedancia y el ángulo de fase en función de la frecuencia, las cuales describen el comportamiento que se presenta en la superficie del metal y como afecta la

velocidad de corrosión según las variaciones en la pendientes de sus gráficas y el rango de frecuencias obtenido [17].

2.3.3. Resistencia a la Polarización Lineal (RPL). Técnica electroquímica que consiste en la aplicación de un barrido de potencial a un electrodo de trabajo en una celda electroquímica, en donde el electrodo de referencia devuelve como respuesta la corriente que pasa por el sistema.

La relación entre el potencial y la corriente es lineal, la pendiente de la recta obtenida será la resistencia a la polarización del sistema, la cual tiene relación inversamente proporcional a la velocidad de corrosión del acero evaluado [18].

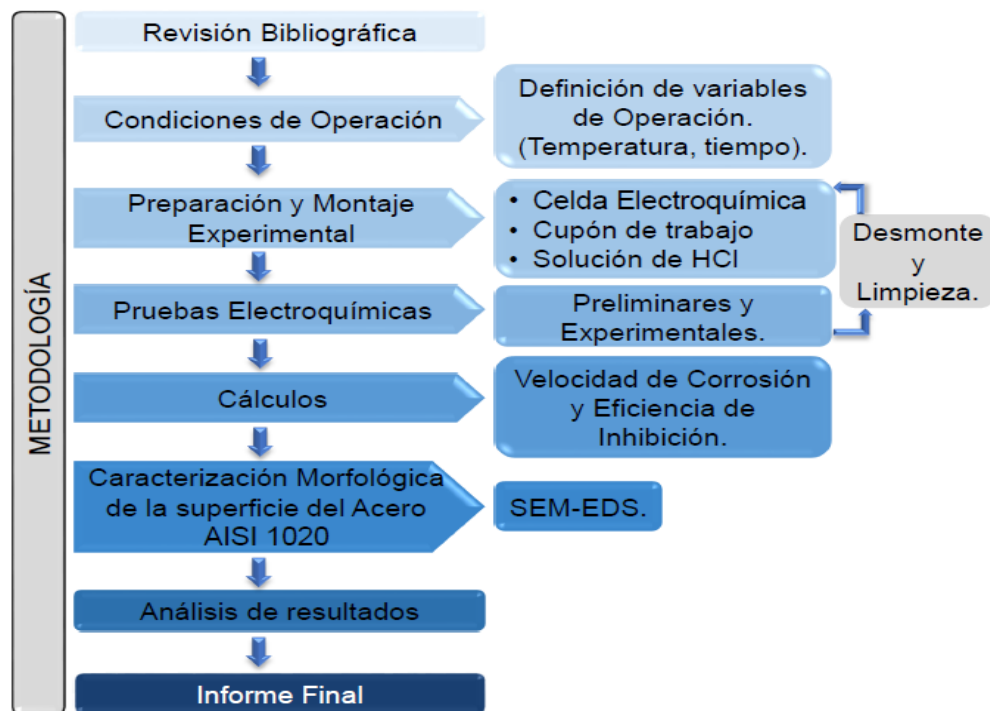
2.3.4. Curvas Potenciodinámicas. Esta técnica electroquímica consiste en que a partir de un rango de potencial (más grande que en la resistencia a la polarización) se genera una cierta medida de corriente.

Este tipo de gráfico es de los más usados para calcular la velocidad de corrosión a partir del potencial de corrosión (E_{corr}) y la intensidad de corriente de corrosión (I_{corr}) [19].

3. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se indica la metodología usada para el desarrollo del presente proyecto de investigación.

Figura 1. Diagrama de Flujo de la Metodología.



3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para esta investigación, se realizó una revisión bibliográfica y del estado del arte respecto al uso de inhibidores orgánicos utilizados en la mitigación de la corrosión de un acero al carbono en soluciones con ácido clorhídrico, a partir, de la consulta de recursos bibliográficos como: base de datos, libros, normas, trabajos de grado,

páginas web, entre otros. Con base en lo anterior, se identifican las variables de operación, condiciones, equipos, técnicas de evaluación, entre otros; que proporcionaron los parámetros necesarios para un adecuado desarrollo experimental.

3.2. VARIABLES DE OPERACIÓN

Las variables de operación son: la temperatura y el tiempo de inmersión. Las pruebas electroquímicas fueron realizadas en soluciones con y sin inhibidor verde de corrosión, además de los blancos a temperatura ambiente; se relacionan en la Tabla 1 y Anexo B.

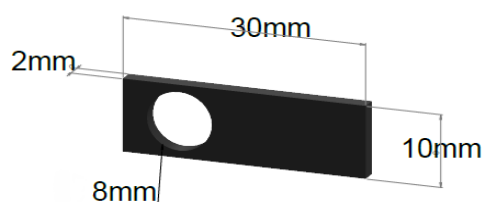
Tabla 1. Variables de operación.

Tiempo de inmersión [h]	Temperatura [°C]		
0	25		
2	40	60	80
4			
6			

3.3. PREPARACIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS

3.3.1. Probetas. Las probetas para los ensayos electroquímicos fueron maquinadas de una pieza de acero al carbono AISI 1020 con un área de exposición de 1.8 cm² y con las siguientes dimensiones: Largo: 30 mm, ancho: 10 mm, profundidad: 2 mm, diámetro del agujero: 8 mm, como se relaciona en la Figura 2.

Figura 2. Dimensiones de la probeta AISI 1020.

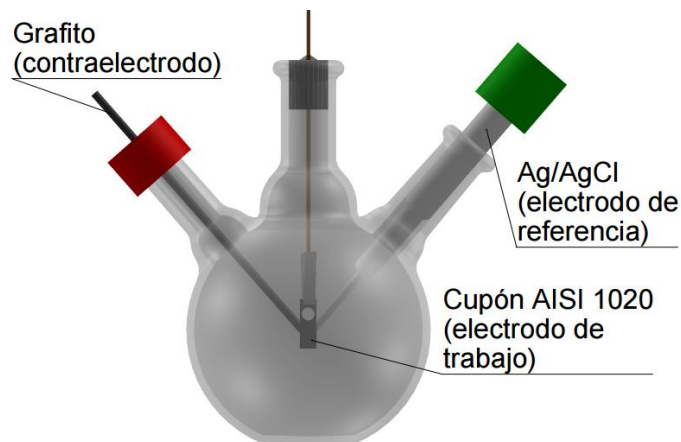


Para garantizar una superficie homogénea se realizó una preparación metalográfica siguiendo los lineamientos de la norma ASTM G1 a cada una de las probetas para realizar los ensayos electroquímicos, a continuación, se procede a un desbaste mecánico con papel de lija de carburo de silicio N° 220, 400, 600 y 1000. Para garantizar trabajar con un área de exposición de 1.8 cm² se realizó un recubrimiento a una cara de la probeta.

3.3.2. Solución de Ácido Clorhídrico. Se usó ácido clorhídrico grado analítico MERCK (37% en peso), para cada una de las pruebas se utilizaron 1.50 ml de ácido clorhídrico con agua destilada para obtener 60 ml de solución a una concentración de 1 Molar.

3.3.3. Equipos. Para el desarrollo del proyecto se usaron los siguientes equipos: Potenciostato Gamry 3000, baño termostático y una celda electroquímica de tres electrodos, como se detalla en la Figura 3; la cual está compuesta por el electrodo de Ag/AgCl como referencia, grafito como contraelectrodo y como electrodo de trabajo el acero al carbono AISI 1020.

Figura 3. Celda Electroquímica.



3.3.4. Técnicas de evaluación. Se utilizó el software Gamry Framework 6.04 para obtener los siguientes resultados: Potencial de circuito abierto (OCP), Espectroscopia de impedancia Electroquímica (EIS) y Polarización Potenciodinámica. Estas técnicas se realizaron en cada prueba para determinar la velocidad de corrosión del acero al carbono AISI 1020 expuesto a la solución con HCl.

La prueba de Potencial de circuito abierto se realizó durante 1 hora para definir la estabilidad del sistema. En la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica se utilizó un rango de frecuencia de barrido de 0,001 Hz a 100.000 Hz. La amplitud de la onda sinusoidal AC fue de 10 mV. Para la Polarización Potenciodinámica, las mediciones se iniciaron desde la dirección catódica hasta la anódica (-0.5 a +1.5 V) con una velocidad de barrido de 1.0 mV/s.

3.3.5. Montaje Experimental. Se realizó el montaje en una celda electroquímica, con un volumen de 60 ml de solución de ácido clorhídrico a una concentración 1M. Se limpiaron los tres electrodos con agua destilada y se embebieron en la celda electroquímica con el baño termostático realizando la respectiva conexión al Potenciostato. Por último, se espera el tiempo de inmersión necesario para cada prueba y se procede a realizar la prueba experimental.

3.4. PRUEBAS PRELIMINARES

Se efectuaron pruebas electroquímicas preliminares con el objetivo de elegir el inhibidor con la mejor eficiencia de inhibición. Para lo anterior, se contaron con tres potenciales inhibidores orgánicos: eugenol, o-eugenol y difenol, los cuales fueron evaluados a concentraciones de 200 ppm y suministrados por el Laboratorio de Química Orgánica y Biomolecular. La estructura de los compuestos utilizados en el presente trabajo se muestra en el anexo C.

3.5. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Se realizaron 20 pruebas experimentales, a las temperaturas (25, 40, 60 y 80 °C) y los tiempos de exposición (0, 2,4 y 6 h) como se describe en el anexo B.

3.6. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Los cálculos y gráficas de la velocidad de corrosión del acero al carbono AISI 1020 fueron realizados según lo estipulado en la norma ASTM G59-97.

3.7. EFICIENCIA DE INHIBICIÓN DEL INHIBIDOR VERDE DE CORROSIÓN

La eficiencia de Inhibición del inhibidor verde de corrosión se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$E(\%) = \frac{(CR_o - CR_i)}{CR_o} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

E (%): Eficiencia de inhibición

CR_o: Velocidad de corrosión blanco

CR_i: Velocidad de corrosión prueba

3.8. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA SUPERFICIE DEL ACERO AISI 1020.

La caracterización morfológica de la superficie del acero al carbono AISI 1020 se desarrolló por medio de: Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) en combinación con Espectrometría de Energía Dispersa de Rayos X (EDS).

3.9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, se analizó la información para determinar la velocidad de corrosión del acero al carbono AISI 1020, así como la eficiencia de inhibición del inhibidor verde de corrosión.

3.10. INFORME FINAL

Se redacta un informe final, con los resultados y análisis realizados.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS

Las pruebas electroquímicas preliminares, se realizaron para determinar el inhibidor verde de corrosión con el mayor porcentaje de inhibición de la velocidad de corrosión del acero 1020 en un sistema corrosivo, se evaluó la acción del inhibidor bajo el cambio en los parámetros de temperatura y tiempo de inmersión. Las condiciones se relacionan en la Tabla 6 (Anexo B).

4.1.1. Potencial de circuito abierto. En las siguientes gráficas (Figuras 4 y 5) se relaciona la estabilidad en cada una de las pruebas electroquímicas preliminares y su valor de potencial de corrosión.

4.1.1.1. Pruebas preliminares.

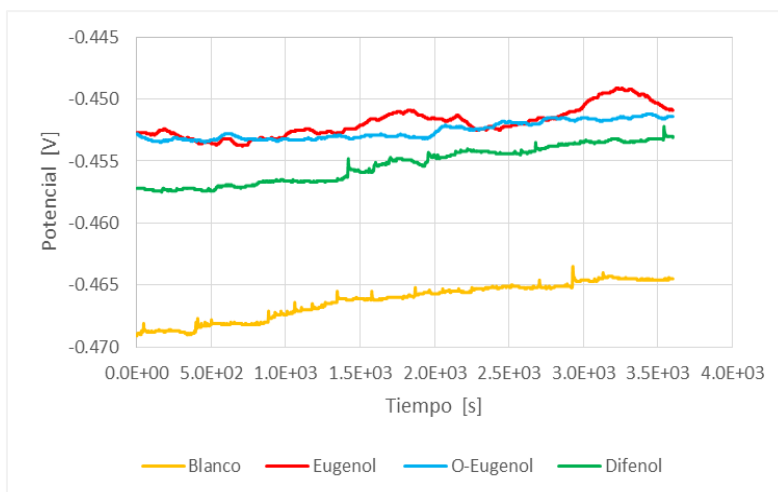


Figura 4. Potencial de circuito abierto para pruebas preliminares.

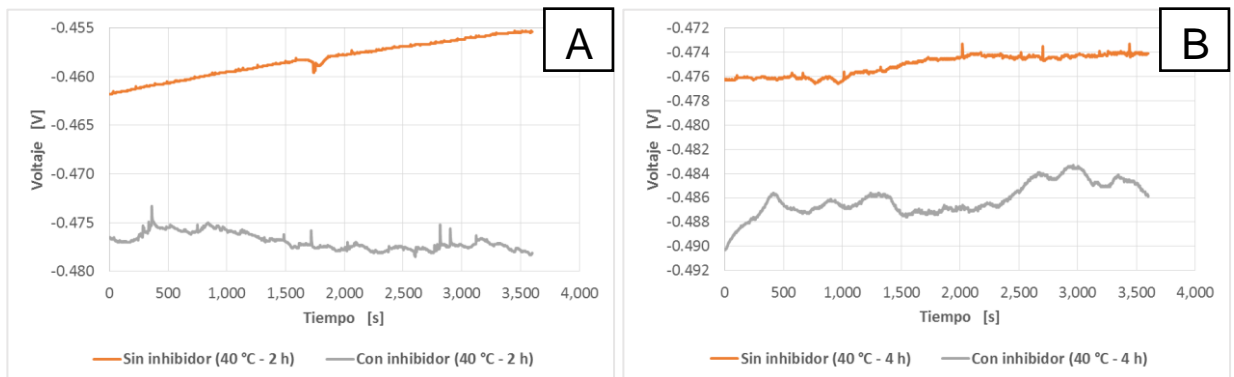
Tabla 2. Valores de potencial de corrosión de las pruebas preliminares.

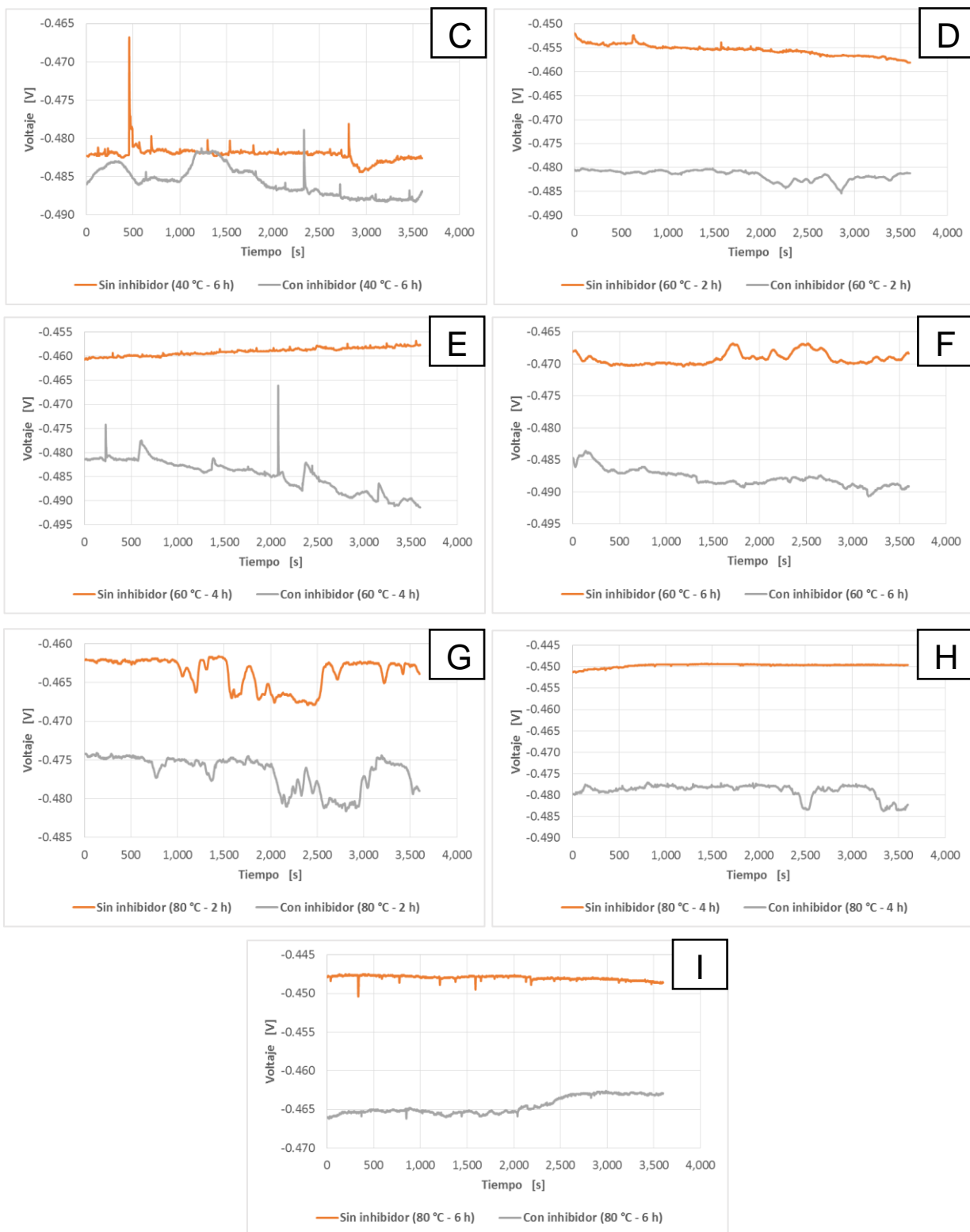
PRUEBA	E_{corr} [V]
Blanco	-0.465
Inhibidor Eugenol	-0.451
Inhibidor O-Eugenol	-0.452
Inhibidor Difenol	-0.453

Como se observa en la Figura 4, el potencial de corrosión de los inhibidores es mayor respecto al blanco (Tabla 2), esto indica que todos los inhibidores verdes de corrosión (IVC) utilizados tienen un comportamiento anticorrosivo hacia el material, mediante el control anódico que se da por la posible formación de una película en la superficie del acero AISI 1020 que genera una resistencia a la transferencia de carga frente a la acción de los iones cloruro presentes en la solución electrolítica en la cual está sumergida la celda electroquímica.

4.1.1.2. Pruebas experimentales.

Figura 5. Curvas de Potencial de Circuito Abierto para pruebas experimentales.





A) 40 °C – 2 h, B) 40 °C – 4 h, C) 40°C – 6 h, D) 60 °C – 2 h, E) 60 °C – 4 h, F) 60 °C – 6 h, G) 80 °C – 2 h, H) 80 °C – 4 h, I) 80 °C – 6 h.

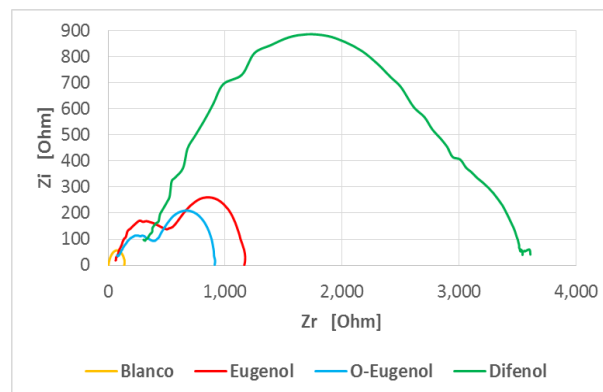
En la Figura 5, se relacionan los valores de voltaje, muestran en todos los casos sistemas estables, esto se determina porque la variación no supera los 5 mV entre punto y punto, por lo tanto, se asegura que las siguientes pruebas electroquímicas se ejecutarán establemente.

En las gráficas anteriores (Figura 5) también se puede observar que el potencial de corrosión es un valor menos negativo que al inicio de la prueba, esto indica la aparición de una película en la superficie del electrodo de trabajo debida a la interacción de las moléculas del inhibidor con la superficie metálica; que puede aumentar la resistencia a la transferencia de carga con el electrolito, por lo que se puede inferir que el mecanismo de acción del inhibidor es por fisisorción, esto repercute en que la película formada no es lo suficientemente resistente a la acción de los iones cloruro y por ende la exposición del metal al medio ácido sea intermitente, generando así cambios en los valores de voltaje mostrados.

4.1.2. Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (Diagrama de Nyquist)

4.1.2.1. Pruebas Preliminares.

Figura 6. Diagramas de Nyquist para pruebas preliminares.

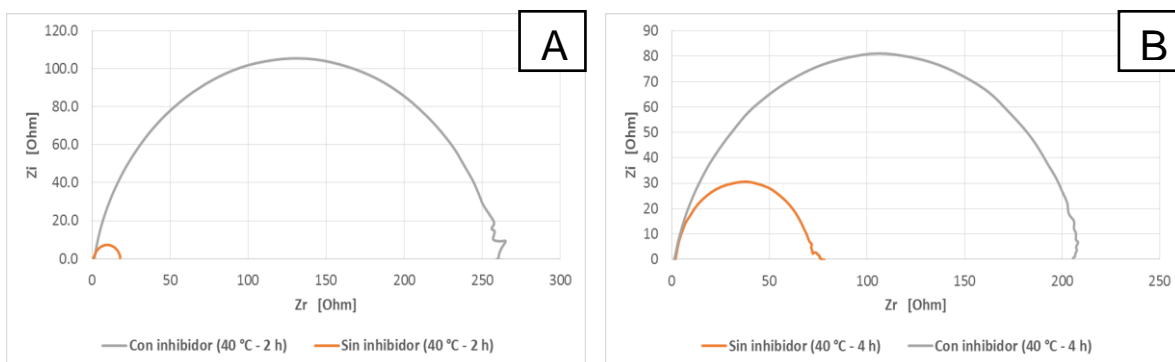


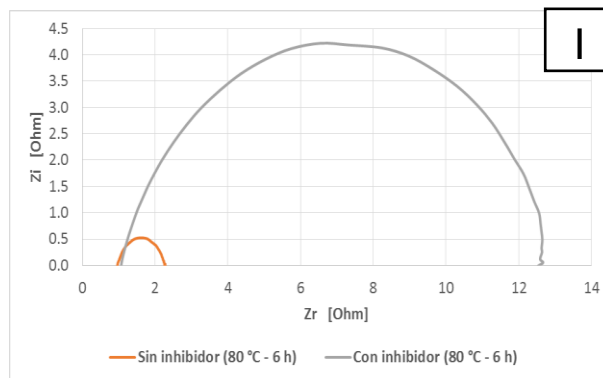
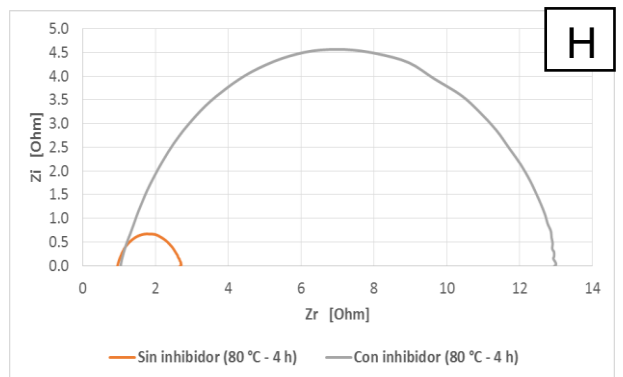
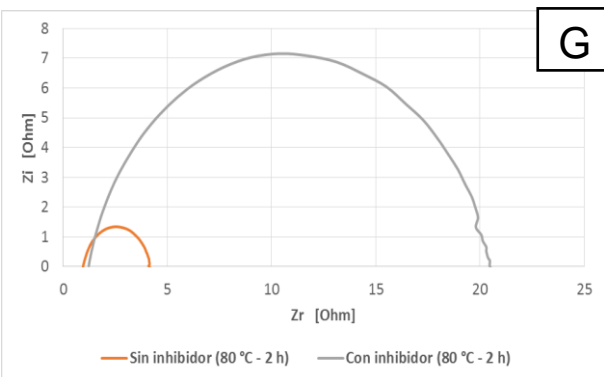
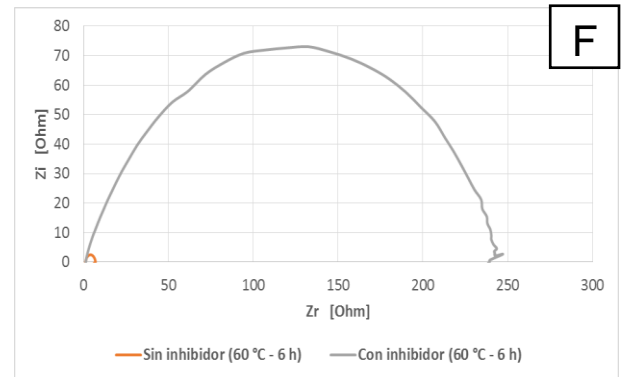
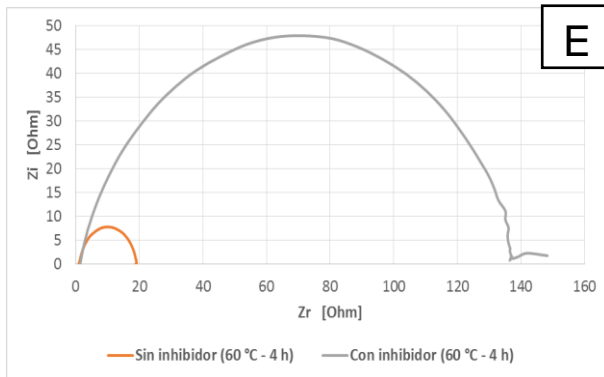
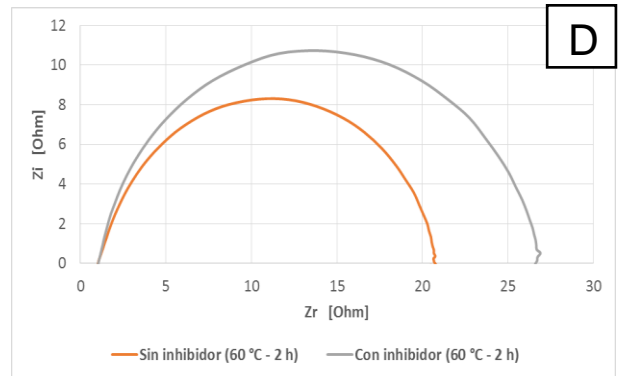
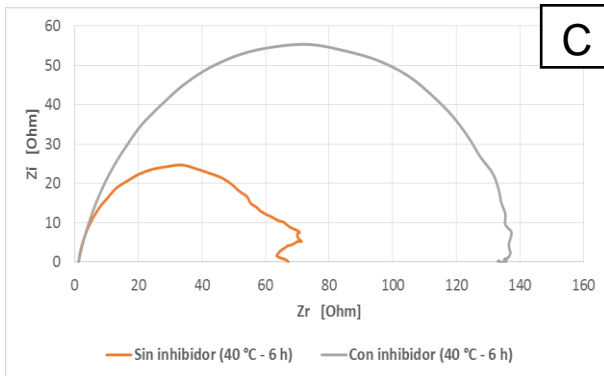
Según las gráficas obtenidas para cada uno de los inhibidores evaluados (Figura 6), el inhibidor a base de Difenol posee un mayor valor tanto de reactancia como de resistencia en comparación a los inhibidores a base de Eugenol, con lo cual se determina que el inhibidor con mayor eficiencia es el que está hecho a base de Difenol.

Para los diagramas de Nyquist (Figura 6) de los inhibidores a base de Eugenol se presenta un doble domo, lo cual se atribuye a la formación de productos de corrosión (PC) en la superficie del acero, debida a que la naturaleza de los inhibidores a base de Eugenol es menos efectiva en comparación al inhibidor a base de Difenol. Además, estos domos no se comportan como semicírculos ideales, indicando que los PC formados no son completamente homogéneos, dando la posibilidad de un mayor ataque localizado de los iones cloruros en la superficie del acero.

4.1.2.2. Pruebas Experimentales.

Figura 7. Diagramas de Nyquist para pruebas experimentales.





A) 40 °C – 2 h, B) 40 °C – 4 h, C) 40°C – 6 h, D) 60 °C – 2 h, E) 60 °C – 4 h, F) 60 °C – 6 h, G) 80 °C – 2 h, H) 80 °C – 4 h, I) 80 °C – 6 h.

En la Figura 7, la acción del inhibidor a base de Difenol bajo las condiciones descritas en la Metodología es óptima en todos los casos, ya que al aumentar los valores de reactancia y resistencia a la transferencia de carga respecto a la misma situación pero sin inhibidor, demuestra un comportamiento decreciente en la velocidad de corrosión del material expuesto.

Según los datos mostrados en la Tabla 8 (Anexos D), se infiere como varían los valores la resistencia a la transferencia de carga respecto al tiempo de inmersión y la temperatura. Resaltando el tiempo de inmersión, la resistencia aumenta a medida que se aumenta el tiempo de inmersión, caso contrario para el aumento de temperatura, en la cual se muestra un decrecimiento en los valores de la resistencia. Lo anterior indica que el inhibidor aumenta su acción a medida que el tiempo de inmersión del acero en el sistema aumenta, pero su acción se ve delimitada al entrar en juego la temperatura, la cual es responsable del aumento de la velocidad de corrosión del material.

4.1.3. Curvas de Polarización Tafel.

4.1.3.1. Pruebas Preliminares.

Figura 8. Curva de Polarización Potenciodinámica para pruebas preliminares.

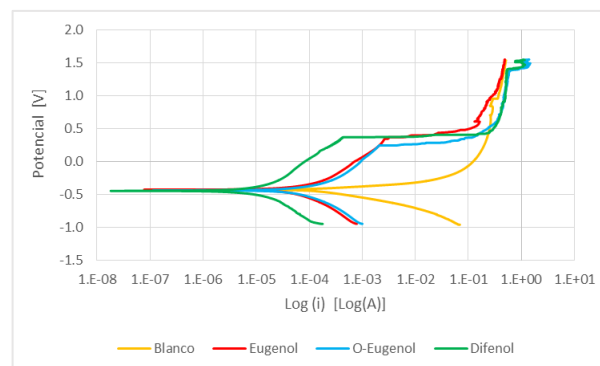


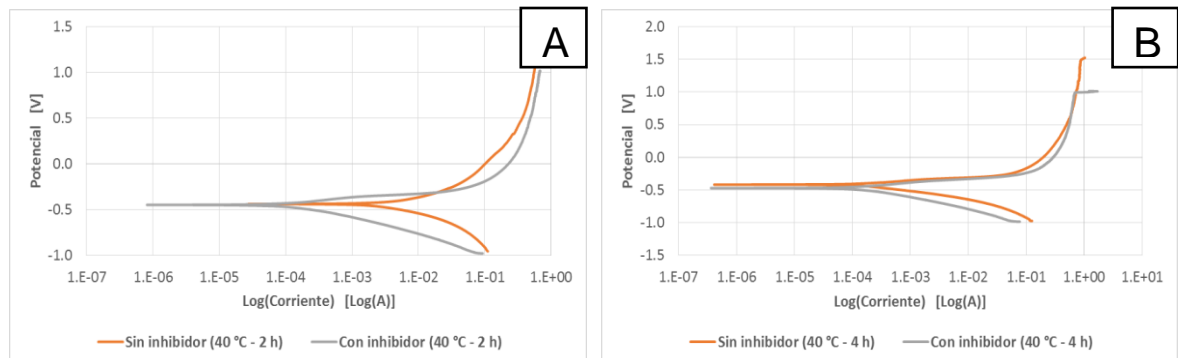
Tabla 3. Datos electroquímicos de las pruebas preliminares extraídos por interpolación de las curvas de polarización.

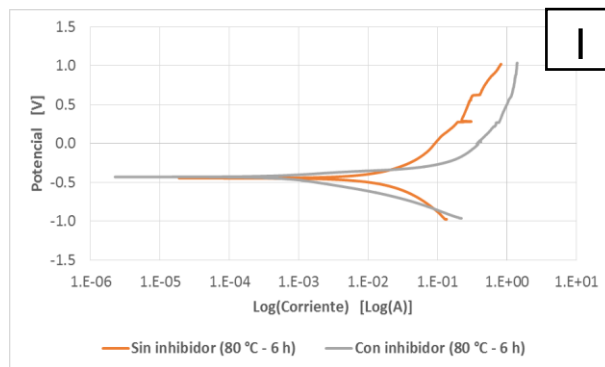
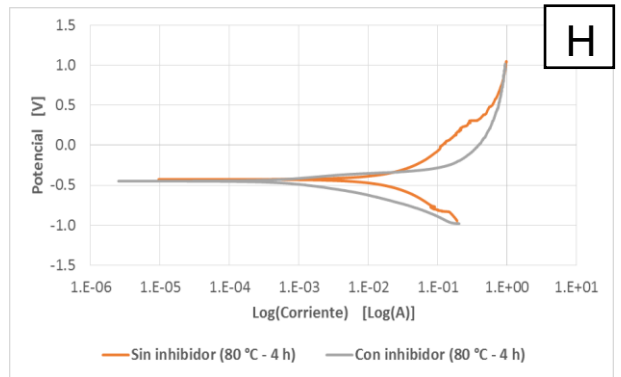
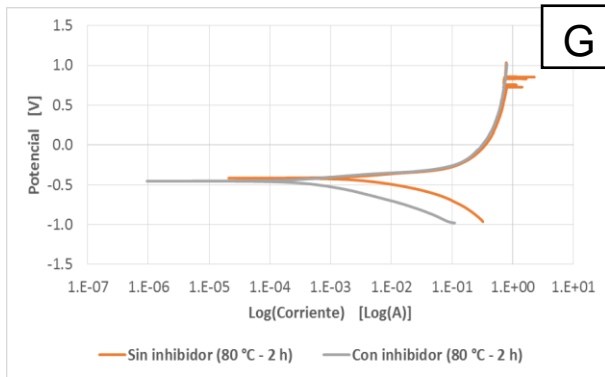
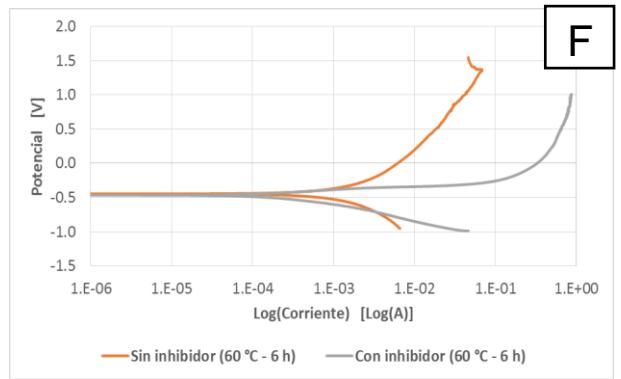
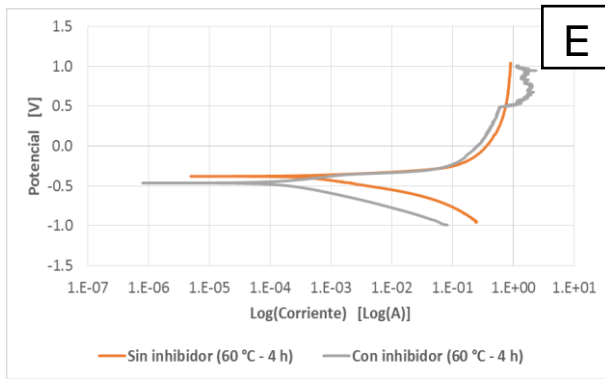
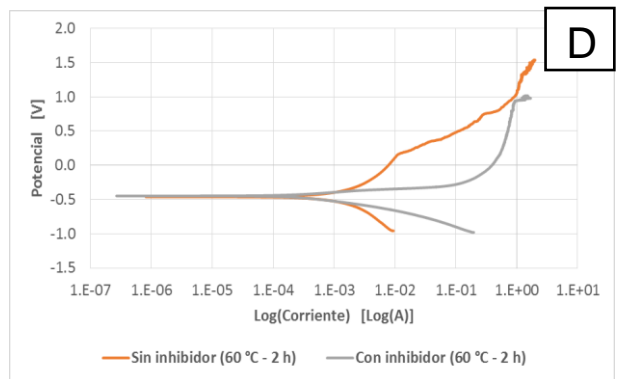
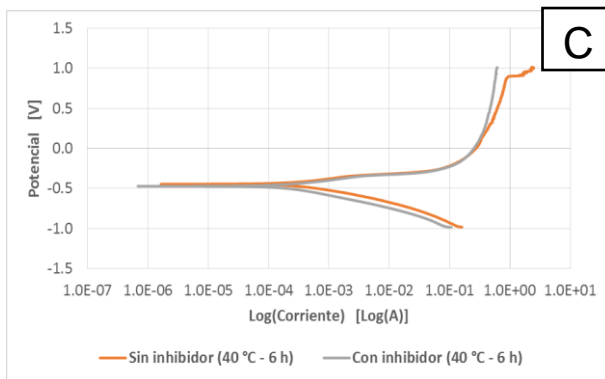
PRUEBA	PENDIENTES		E _{corr} [V]	I _{corr} [μA/cm ²]	VC [mpy]	Eficiencia %
	Catódica	Anódica				
Blanco	-0.111	0.048	-0.431	52.883	24.389	-
Inhibidor Eugenol	-0.156	0.124	-0.431	12.228	5.64	76.877
Inhibidor O-Eugenol	-0.151	0.123	-0.441	15.286	7.05	71.094
Inhibidor Difenol	-0.129	0.14	-0.45	1.986	0.916	96.244

La Tabla 3 (ver también Figura 8), relaciona los valores de densidad de corriente (I_{corr}), los cuales son menores en el Inhibidor a base de Difenol en comparación de los inhibidores a base de Eugenol, lo que genera que la velocidad de corrosión del acero AISI 1020 en el sistema que contiene el Difenol sea menor, por lo tanto, para las pruebas experimentales el inhibidor será el hecho a base de Difenol.

4.1.3.2. Pruebas Experimentales.

Figura 9. Curvas de Polarización de Tafel para pruebas experimentales.





A) 40 °C – 2 h, B) 40 °C – 4 h, C) 40°C – 6 h, D) 60 °C – 2 h, E) 60 °C – 4 h, F) 60 °C – 6 h, G) 80 °C – 2 h, H) 80 °C – 4 h, I) 80 °C – 6 h.

Tabla 4. Datos electroquímicos de las pruebas experimentales extraídos por interpolación de las curvas de polarización.

PRUEBA	PENDIENTES		E _{corr} [V]	I _{corr} [μA/cm ²]	VC [mpy]	Eficiencia %	
	Catódica	Anódica					
BLANCOS	40 °C - 2 h	-0.099	0.075	-0.447	64.591	29.789	-
	40 °C - 4 h	-0.103	0.081	-0.417	43.986	20.286	-
	40 °C - 6 h	-0.107	0.095	-0.446	110.608	51.012	-
	60 °C - 2 h	-0.131	0.135	-0.46	184.588	85.131	-
	60 °C - 4 h	-0.13	0.135	-0.379	150.059	69.206	-
	60 °C - 6 h	-0.107	0.045	-0.446	230.271	106.2	-
	80 °C - 2 h	-0.1	0.056	-0.415	823.913	379.984	-
	80 °C - 4 h	-0.129	0.135	-0.428	2253.519	1039.311	-
	80 °C - 6 h	-0.136	0.13	-0.446	2819.894	1300.519	-
PRUEBAS CON INHIBIDOR	40 °C - 2 h	-0.117	0.083	-0.304	51.37	23.692	20.468
	40 °C - 4 h	-0.121	0.057	-0.471	30.527	14.079	30.598
	40 °C - 6 h	-0.118	0.084	-0.472	73.367	33.837	33.669
	60 °C - 2 h	-0.099	0.066	-0.447	92.328	42.581	49.982
	60 °C - 4 h	-0.118	0.087	-0.464	59.227	27.315	60.531
	60 °C - 6 h	-0.115	0.075	-0.465	48.914	22.559	78.758
	80 °C - 2 h	-0.092	0.063	-0.453	97.663	45.042	88.146
	80 °C - 4 h	-0.102	0.075	-0.449	212.45	97.981	90.573
	80 °C - 6 h	-0.12	0.051	-0.43	219.102	101.049	92.23

En la Figura 9 y Tabla 4, se relacionan los valores correspondientes a la densidad de corriente, los cuales disminuyen respecto a su correspondiente blanco en todos los sistemas que contienen el inhibidor a base de Difenol, esto contribuye directamente a que las velocidades de corrosión del acero 1020 sean más bajas y en consecuencia el porcentaje de eficiencia de inhibición sea mayor; teniendo así para las condiciones máximas (80 °C y 6 horas de inmersión) una velocidad de corrosión de 101.049 mpy con un porcentaje de inhibición de 92.23%.

Los valores de eficiencia del inhibidor aumentan a medida que las temperaturas y tiempos de inmersión aumentan, esto puede ser debido a que favorecen la fisiorción existente entre el inhibidor y la superficie metálica mediante la formación de una película que impide el ataque de la corrosión en un área mayor, esto bloquea la acción de los iones cloruro sobre el metal.

4.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) EN COMBINACIÓN CON ESPECTROMETRÍA DE ENERGÍA DISPERSA DE RAYOS X (EDS)

El análisis de la caracterización morfológica de la superficie del acero al carbono AISI 1020 se realizó a tres probetas utilizadas en los ensayos electroquímicos, de las cuales una es un blanco a temperatura ambiente y sin tiempo de inmersión previa; los otros dos fueron expuestos a soluciones ácidas HCl 1M con y sin inhibidor verde de corrosión, a una temperatura de 80°C y un tiempo de inmersión de 6 horas. La elección de las probetas se hizo considerando los resultados de las pruebas electroquímicas las cuales muestran que a mayores tiempos de exposición y de temperatura en el sistema, se presenta una mayor velocidad de corrosión del acero AISI 1020, por lo tanto, se puede comparar el comportamiento del inhibidor verde de corrosión en el sistema.

En la figura 10, se relaciona el blanco del acero al carbono AISI 1020. Las figuras 11 y 12 muestran la superficie del acero después de 6 horas de inmersión a una temperatura de 80 °C con y sin el Difenol, respectivamente.

Figura 10. SEM-EDS de la superficie del blanco.

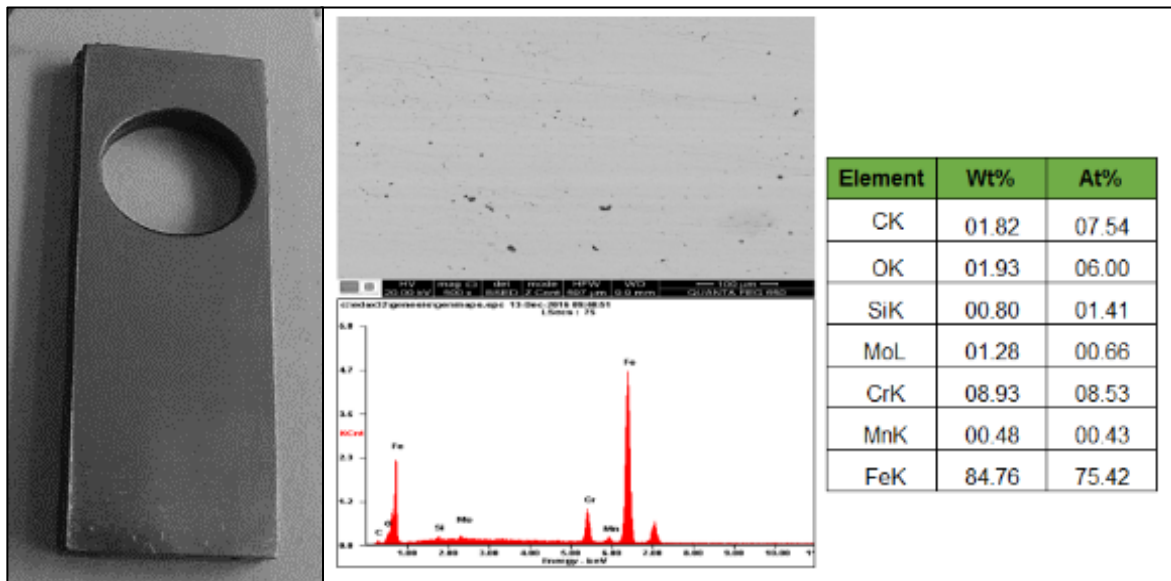
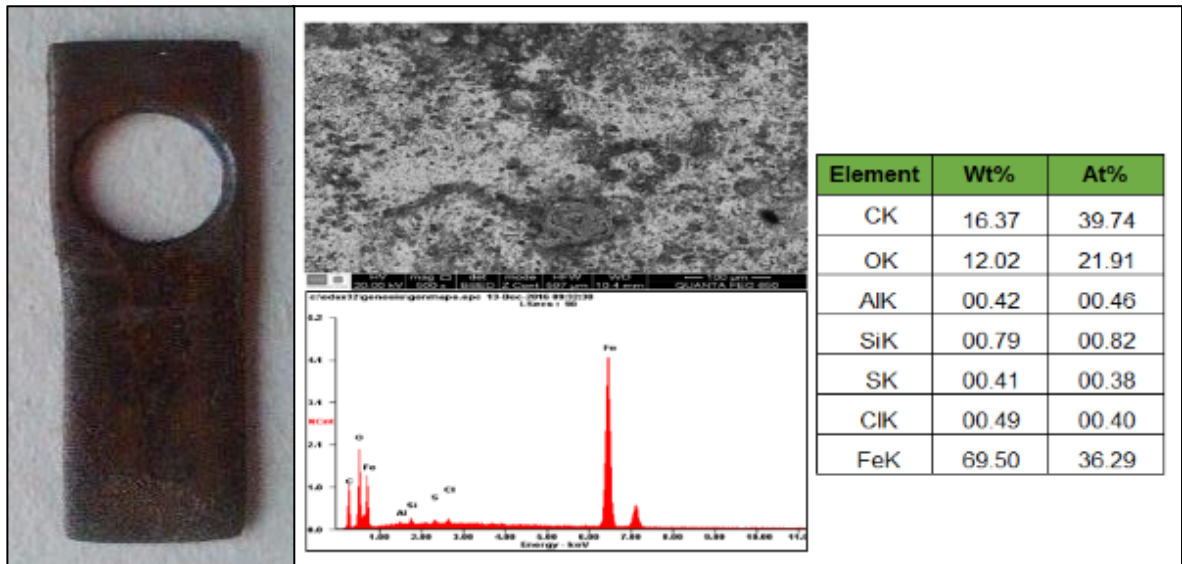
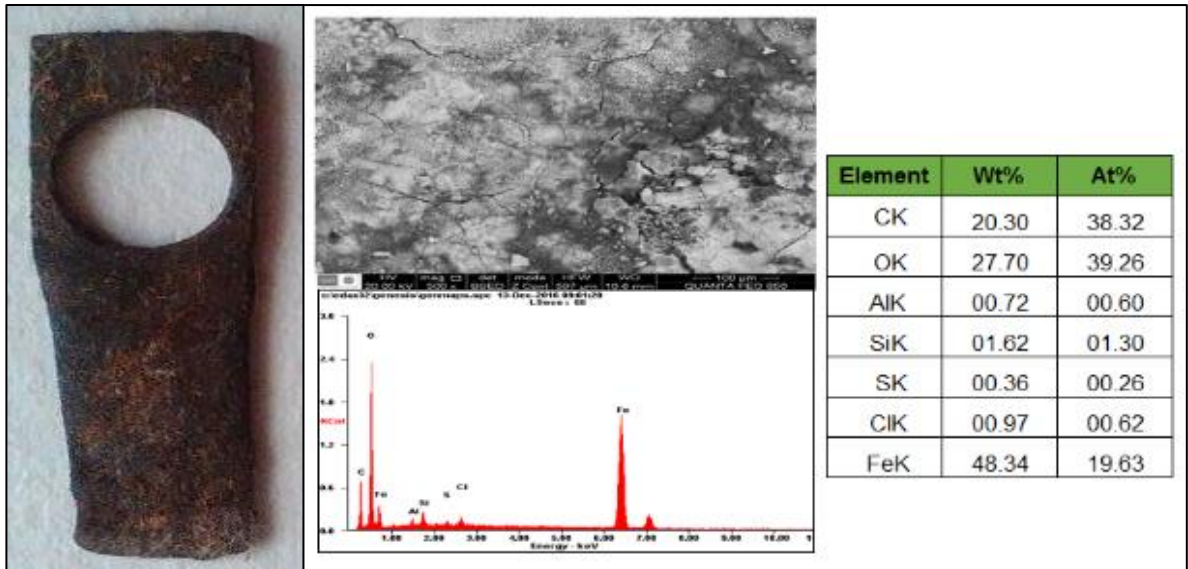


Figura 11. SEM-EDS de la superficie de la probeta en medio ácido HCl 1M y Difenol.



Debido a la agresión general de las soluciones ácidas, los inhibidores se utilizan para prevenir la disolución del metal [7]. En los resultados de las micrografías SEM-EDS de las probetas con y sin inhibidor verde de corrosión se muestra que la superficie del acero presenta pérdida del material al disminuir su porcentaje de hierro (de 69.5 a 48,34 Wt%). Sin embargo, la probeta en presencia de Difenol tiene mayor contenido del mismo, por lo que no se presentó la corrosión de la misma magnitud, por la acción del inhibidor en base de Difenol.

Figura 12. SEM-EDS de la superficie de la probeta en medio ácido HCl 1M.



5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos por medio de las pruebas electroquímicas para los tres inhibidores (Eugenol, O-Eugenol y Difenol), demuestran la eficiencia de estos frente al proceso de corrosión por un medio ácido al cual fue sometido el acero AISI 1020, alcanzando así un porcentaje máximo de 96,24% para el inhibidor a base de Difenol.

Los inhibidores a base de Eugenol muestran un doble domo, lo que indica la formación de productos de corrosión, los cuales afectan tanto al metal como la resistencia al medio ácido, caso diferente al inhibidor a base de Difenol, en el cual se presenta la formación de una película en la superficie del metal debida a la interacción de las moléculas de inhibidor con la superficie del acero AISI 1020, generando así una resistencia mayor frente al medio corrosivo, por lo tanto, el porcentaje de inhibición para el inhibidor a base de Difenol es superior comparado con los a base en Eugenol.

El inhibidor a base de Difenol demostró tener un comportamiento óptimo, a una temperatura de 80 °C y un tiempo de inmersión de 6 horas, el porcentaje de inhibición de la velocidad de corrosión del acero AISI 1020 aumenta, llegando a un máximo de 92.23%.

La micrografía SEM-EDS de la probeta para ensayos electroquímicos con inhibidor a 80°C y 6 horas de exposición al medio ácido presentó un contenido en peso de hierro de 69.5% mientras que la probeta sin inhibidor a las mismas condiciones presentó 48.34%, lo que demuestra que el uso de Difenol como inhibidor verde de corrosión logró disminuir la pérdida de material en el medio corrosivo.

El inhibidor a base de Difenol es un inhibidor verde de corrosión recomendable para ambientes donde la temperatura es alta y el tiempo de exposición prolongado. Además de presentar características más amigables con el medio ambiente como no ser tóxico, ser biodegradable y de fácil obtención.

6. RECOMENDACIONES

- Estudiar la variación de la concentración del medio ácido en la corrosión del acero al carbono AISI 1020 a las condiciones de temperaturas y tiempos de inmersión utilizados.
- Realizar un estudio económico de la adecuación de Difenol como inhibidor verde de corrosión como opción de remplazo a los métodos utilizados en la industria para mitigar la corrosión en el acero al carbono AISI 1020.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CASTELLANOS B., David Ernesto. Evaluación del Impacto integrado de la dieta de crudo y las variables de operación en el punto de rocío y punto de sal, en el circuito de cima de una unidad de destilación atmosférica usando metamodelos. Bucaramanga, Colombia. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería de Materiales. Universidad Industrial de Santander. 2012.

[2] PEÑA, D.Y., et al. Evaluación del Efecto corrosivo de los crudos pesados sobre el Acero 5Cr-1/2Mo utilizado en las unidades de destilación. En: *Revista ION*. 2009, vol. 23, nro. 1, p. 99-110. ISSN 0120-100X.

[3] RAMEZANZADEH, B., et al. Electrochemical and surface characterizations of morus alba pendula leaves extract (MAPLE) as a green corrosion inhibitor for steel in 1M HCl. En: *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2015, vol. 63, p. 436-452. ISSN 1876-1070.

[4] MERCHAN, Diego. Recubrimiento Orgánico a base de productos naturales Fenólicos y sus derivados como Inhibidores de la velocidad de corrosión en las Tuberías de Producción. [En línea]. Bucaramanga, Colombia. 2016. Disponible en: <https://recubrimiento.ecopetrol.spigit.com/Page/ViewIdea?ideaid=30550>

[5] TEJEDA B., Lesly Patricia, et al. Uso de extractos de plantas como inhibidores. En: *Informador Técnico*. 2014, vol. 78, nro. 2, p. 155-165. ISSN 0122-056X.

[6] QURAIISHI, M.A., et al. A thermodynamical, electrochemical and surface investigation of Bis (indolyl) methanes as Green corrosion inhibitors for mild steel

in 1M hydrochloric acid solution. En: *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*. 2015, vol. 21, p. 24-30. ISSN 1815-3852.

[7] JOSEPH, Abraham, et al. Adsorption and electrochemical studies of Pimenta dioica leaf extracts as corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid. En: *Materials Chemistry and Physics*. 2015, vol. 167, p. 28-41. ISSN 0254-0584.

[8] BENTISS, F., et al. Artemisia Mesatlantica essential oil as green inhibitor for carbon steel corrosion in 1M HCl solution: Electrochemical and XPS investigations. En: *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2015, vol. 29, p. 146-155. ISSN 1226-086X.

[9] SOLMAZ, R., et al. Gravimetric, electrochemical and quantum chemical studies of some pyridazine derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in 1M HCl solution. En: *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2015, vol. 58, p. 552-564. ISSN 1876-1070.

[10] CASALLAS S., Quilyam. Conceptos básicos de la corrosión. En: *Revista Ingenio Libre*. 2006, nro. 5, p. 29-32. ISSN 2322-8415.

[11] ZAKARIA, K., et al. New organic compounds based on siloxane moiety as corrosion inhibitors for carbon steel in HCl solution: Weight loss, electrochemical and surface studies. En: *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2015, vol. 65, p. 530-543. ISSN 1876-1070.

[12] SASTRI, Vedula. Green Corrosion Inhibitors: Theory and practice. [En línea]. Editorial Wiley. Estados Unidos. 2011. 328 p., p. 105-107, 191-192, 265, 287. ISBN 978-0-470-45210-3. Disponible en: <http://ezproxy.uis.edu.co:2051/lib/bibliouis>.

[13] FERNÁNDEZ, J., et al. Corrosión por picaduras de una tubería de acero al carbono. En: *Revista de Minas (RDM)*. 1991, nro. 6, p. 43-48. ISSN 1130-9644.

[14] DAVIS, J. Corrosion: Understanding the Basics. [En línea]. Editorial ASM International. Estados Unidos. 2000. 346 p., p. 217-218, 227. ISBN 978-1-61503-825-1. Disponible en: <http://ezproxy.uis.edu.co:2051/lib/bibliouis>.

[15] CALDERÓN, Jorge Andrés, et al. Análisis de la evolución del potencial de circuito abierto del Cobalto en medio levemente alcalino. En: *Revista Facultad de Ingeniería*. 2006, nro. 38, p. 20-30. ISSN 0120-6230.

[16] ZELINSKY, A.G., et al. Open circuit potential transients and electrochemical quartz crystal microgravimetry measurements of dissolution of copper in acidic sulfate solutions. En: *Corrosion Science*. 2004, vol. 46, nro. 5, p. 1083-1093. ISSN 0010-938X.

[17] VÁZQUEZ G, José Luis. Empleo de la técnica de Espectroscopía de Impedancias Electroquímicas para la caracterización de biomateriales, aplicación a una aleación biomédica de Co-Cr-Mo. Valencia, España. Trabajo de grado para optar al título de Máster Oficial en Seguridad Industrial y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. 2007.

[18] BECERRA C., Erika N. y GUALDRÓN R., Andres F. Estudio de la Inhibición de Corrosión por HCl en acero al carbono en crudos pesados mediante el uso de aceites esenciales. Bucaramanga, Colombia. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Químico. Universidad Industrial de Santander. 2011.

[19] CRIADO, M., et al. Aspectos cinéticos de la corrosión y fenómenos de Pasividad. En: VALDEZ S., B & SCHORR W., M. *Corrosión y preservación de la*

infraestructura Industrial. Barcelona, España: OmniaScience. 2013, p. 11-32. ISBN 978-84-940234-7-7.

BIBLIOGRAFÍA

ARDILA P., Wilmar Y. y BARRERA S., Geovanny A. Evaluación de la velocidad de corrosión por sulfidación del acero AISI 317L expuesto a condiciones de una línea de transferencia en el procesamiento de un crudo pesado. Bucaramanga, Colombia. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander. 2016.

BECERRA C., Erika N. y GUALDRÓN R., Andres F. Estudio de la Inhibición de Corrosión por HCl en acero al carbono en crudos pesados mediante el uso de aceites esenciales. Bucaramanga, Colombia. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Químico. Universidad Industrial de Santander. 2011.

BENTISS, F., et al. Artemisia Mesatlantica essential oil as green inhibitor for carbon steel corrosion in 1M HCl solution: Electrochemical and XPS investigations. En: *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2015, vol. 29, p. 146-155. ISSN 1226-086X.

CALDERÓN, Jorge Andrés, et al. Análisis de la evolución del potencial de circuito abierto del Cobalto en medio levemente alcalino. En: *Revista Facultad de Ingeniería*. 2006, nro. 38, p. 20-30. ISSN 0120-6230.

CASALLAS S., Quilyam. Conceptos básicos de la corrosión. En: *Revista Ingenio Libre*. 2006, nro. 5, p. 29-32. ISSN 2322-8415.

CASTELLANOS B., David Ernesto. Evaluación del Impacto integrado de la dieta de crudo y las variables de operación en el punto de rocío y punto de sal, en el

circuito de cima de una unidad de destilación atmosférica usando metamodelos. Bucaramanga, Colombia. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería de Materiales. Universidad Industrial de Santander. 2012.

COTTIS, Robert, TURGOOSE, Stephen. Electrochemical Impedance and noise. Barry C. Syrett Series Editor, 1999, p. 30-47. ISBN 1-57590-093-9.

CRIADO, M., et al. Aspectos cinéticos de la corrosión y fenómenos de Pasividad. En: VALDEZ S., B & SCHORR W., M. *Corrosión y preservación de la infraestructura Industrial*. Barcelona, España: OmniaScience. 2013, p. 11-32. ISBN 978-84-940234-7-7.

DAVIS, J. Corrosion: Understanding the Basics. [En línea]. Editorial ASM International. Estados Unidos. 2000. 346 p., p. 217-218, 227. ISBN 978-1-61503-825-1. Disponible en: <http://ezproxy.uis.edu.co:2051/lib/bibliouis>.

FERNÁNDEZ, J., et al. Corrosión por picaduras de una tubería de acero al carbono. En: *Revista de Minas (RDM)*. 1991, nro. 6, p. 43-48. ISSN 1130-9644.

JOSEPH, Abraham, et al. Adsorption and electrochemical studies of Pimenta dioica leaf extracts as corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid. En: *Materials Chemistry and Physics*. 2015, vol. 167, p. 28-41. ISSN 0254-0584.

MERCHAN, Diego. Recubrimiento Orgánico a base de productos naturales Fenólicos y sus derivados como Inhibidores de la velocidad de corrosión en las Tuberías de Producción. [En línea]. Bucaramanga, Colombia. 2016. Disponible en: <https://recubrimiento.ecopetrol.spigit.com/Page/ViewIdea?ideaid=30550>

PEÑA, D.Y., et al. Evaluación del Efecto corrosivo de los crudos pesados sobre el Acero 5Cr-1/2Mo utilizado en las unidades de destilación. En: *Revista ION*. 2009, vol. 23, nro. 1, p. 99-110. ISSN 0120-100X.

QURAIISHI, M.A., et al. A thermodynamical, electrochemical and surface investigation of Bis (indolyl) methanes as Green corrosion inhibitors for mild steel in 1M hydrochloric acid solution. En: *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*. 2015, vol. 21, p. 24-30. ISSN 1815-3852.

RAMEZANZADEH, B., et al. Electrochemical and surface characterizations of morus alba pendula leaves extract (MAPLE) as a green corrosion inhibitor for steel in 1M HCl. En: *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2015, vol. 63, p. 436-452. ISSN 1876-1070.

RAMÍREZ, José L., URUCHURTU, Jorge. Métodos experimentales en la ciencia de la corrosión. Impedancia electroquímica. [En línea]. México. Poza Rica, Veracruz, México. 2010. Disponible en: https://www.academia.edu/23057820/M%C3%A9todos_Experimentales_en_la_Ciencia_de_la_Corrosi%C3%B3n_Impedancia_Electroqu%C3%ADmica

SASTRI, Vedula. Green Corrosion Inhibitors: Theory and practice. [En línea]. Editorial Wiley. Estados Unidos. 2011. 328 p., p. 105-107, 191-192, 265, 287. ISBN 978-0-470-45210-3. Disponible en: <http://ezproxy.uis.edu.co:2051/lib/bibliouis>.

SOLMAZ, R., et al. Gravimetric, electrochemical and quantum chemical studies of some pyridazine derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in 1M HCl solution. En: *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2015, vol. 58, p. 552-564. ISSN 1876-1070.

SOUTO, Ricardo M., GONZÁLEZ, Sergio. Investigación del comportamiento anticorrosivo de sustratos metálicos protegidos con recubrimientos orgánicos por medio de la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica. [En línea]. San Cristóbal de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, España. 2003. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/256834695_Investigacion_del_comportamiento_anticorrosivo_de_sustratos_metalicos_protegidos_con_recubrimientos_orgánicos_por_medio_de_la_espectroscopia_de_impedancia_electroquimica

TEJEDA B., Lesly Patricia, et al. Uso de extractos de plantas como inhibidores. En: *Informador Técnico*. 2014, vol. 78, nro. 2, p. 155-165. ISSN 0122-056X.

VÁZQUEZ G, José Luis. Empleo de la técnica de Espectroscopía de Impedancias Electroquímicas para la caracterización de biomateriales, aplicación a una aleación biomédica de Co-Cr-Mo. Valencia, España. Trabajo de grado para optar al título de Máster Oficial en Seguridad Industrial y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. 2007.

ZAKARIA, K., et al. New organic compounds based on siloxane moiety as corrosion inhibitors for carbon steel in HCl solution: Weight loss, electrochemical and surface studies. En: *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2015, vol. 65, p. 530-543. ISSN 1876-1070.

ZELINSKY, A.G., et al. Open circuit potential transients and electrochemical quartz crystal microgravimetry measurements of dissolution of copper in acidic sulfate solutions. En: *Corrosion Science*. 2004, vol. 46, nro. 5, p. 1083-1093. ISSN 0010-938X.

ANEXOS

ANEXO A. Información general del Acero al carbono AISI 1020.

ACERO AISI 1020

Descripción: Acero de bajo carbono, blando, responde bien al trabajo en frío y al tratamiento térmico de cementación. Tiene un alto índice de soldabilidad, y por su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para elementos de maquinaria y usos convencionales de baja exigencia.

Tabla 5. Composición Química.

Elemento	Composición Química (%)
C	0.18-0.23
Mn	0.3-0.6
P	0.04 Máx.
S	0.05 Máx.

Propiedades Mecánicas: Laminado en caliente.

- Resistencia a la tracción: 40-45 kgf/mm²
- Límite de fluencia: 27 kgf/mm²
- Elongación: 20%
- Reducción de área: 50%
- Maquinabilidad: 72%
- Dureza (HB): 110-140

Aplicaciones: Se utiliza en ejes, cadenas, remaches, tornillos, pernos, sujetadores, engranajes, piñones, piezas de maquinaria, pasadores de baja resistencia, prensas y levas.

Fuente: Aceros al carbono. [Citado el 14 de enero de 2017]. Disponible en:
<http://www.acerosbravo.cl/productos-pro.php?idcat=2&idpro=47>

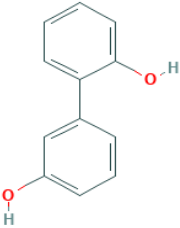
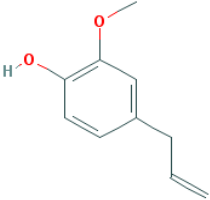
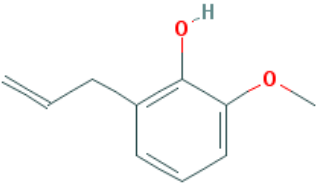
ANEXO B. Pruebas Experimentales.

Tabla 6. Pruebas experimentales.

Prueba	Material	Solución	VARIABLES	
			Temperatura (°C)	Tiempo de Inmersión (h)
1	ACERO AISI 1020	HCl 1M	25	0
2			40	2
3			60	
4			80	
5			40	
6			60	
7			80	
8			40	6
9			60	
10			80	
11		25	0	
12		40	2	
13		60		
14		80		
15		40		4
16		60		
17		80		
18		40	6	
19		60		
20		80		

ANEXO C. Inhibidores Verdes de Corrosión.

Tabla 7. Estructura química de los Inhibidores Verdes de Corrosión.

Nombre	Estructura (Fórmula química)
Difenol	 <p>The structure shows two benzene rings connected at their para positions. Each ring has a hydroxyl group (-OH) attached at the ortho position relative to the connection point.</p>
Eugenol	 <p>The structure shows a benzene ring with a hydroxyl group (-OH) at the 3-position, a methoxy group (-OCH₃) at the 4-position, and an allyl group (-CH₂-CH=CH₂) at the 1-position.</p>
o-Eugenol	 <p>The structure shows a benzene ring with a hydroxyl group (-OH) at the 1-position, a methoxy group (-OCH₃) at the 2-position, and an allyl group (-CH₂-CH=CH₂) at the 4-position.</p>

ANEXO D. Valores de resistencia a la transferencia de carga.

TEMPERATURA	TIEMPO DE INMERSIÓN	RESISTENCIA A LA TRANSFERENCIA DE CARGA	
		Blancos	Con inhibidor [Ohm]
[°C]	[h]		
40	2	18.10	263.80
	4	78.10	206.10
	6	67.40	135.30
60	2	20.80	26.60
	4	18.70	139.70
	6	1.19	239.40
80	2	2.28	12.50
	4	2.72	13.20
	6	2.28	20.50

Tabla 8. Resistencia a la transferencia de carga de pruebas experimentales.

ANEXO E. Cálculo para la velocidad de Corrosión.

VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Fórmula

$$CR = (0.1288) * \frac{i_{corr} * EW}{\rho}$$

(5)

Donde:

CR: Velocidad de corrosión [mpy]

i_{corr} : Densidad de corriente de corrosión [$\mu A/cm^2$]

EW: Peso equivalente de la probeta (Se asume adimensional)

ρ : Densidad de la probeta [g/cm^3]

Constante: $0.1288 \left[\frac{mpy * g}{\mu A * cm} \right]$

Fórmula tomada de la norma ASTM G59-97 y ASTM G102-89.

Tabla 9. Valores característicos para la velocidad de corrosión de las pruebas realizadas.

	Condiciones	Pendientes		RPL	Ecorr	Área	ρ	EW	Icorr	icorr	Velocidad de corrosión
		Catódica	Anódica	[V/A]	[V]	[cm ²]	[g/cm ³]		[μ A]	[μ A/cm ²]	[mpy]
Blanco preliminares		-0.111	0.048	160.660	-0.431				95.190	52.883	24.389
Preliminar Eugenol	Temperatura	-0.156	0.124	1163.800	-0.431				22.011	12.228	5.640
Preliminar O-Eugenol	Ambiente - 0 [h]	-0.151	0.123	810.280	-0.441				27.515	15.286	7.050
Preliminar Difenol		-0.129	0.140	3728.900	-0.450				3.575	1.986	0.916
Blanco sin inhibidor		-0.130	0.137	799.520	-0.463				28.318	15.732	7.256
Pruebas Blanco	40 [°C] - 2 [h]	-0.099	0.075	236.250	-0.447				116.263	64.591	29.789
	40 [°C] - 4 [h]	-0.103	0.081	94.405	-0.417				79.175	43.986	20.286
	40 [°C] - 6 [h]	-0.107	0.095	67.388	-0.446				199.095	110.608	51.012
	60 [°C] - 2 [h]	-0.131	0.135	61.928	-0.460				332.259	184.588	85.131
	60 [°C] - 4 [h]	-0.130	0.135	18.105	-0.379				270.107	150.059	69.206
	60 [°C] - 6 [h]	-0.107	0.045	8.004	-0.446				414.488	230.271	106.200
	80 [°C] - 2 [h]	-0.100	0.056	3.550	-0.415	1.8	7.87	27.92	1483.043	823.913	379.984
	80 [°C] - 4 [h]	-0.129	0.135	2.992	-0.428				4056.335	2253.519	1039.311
	80 [°C] - 6 [h]	-0.136	0.130	3.747	-0.446				5075.809	2819.894	1300.519
Pruebas con inhibidor	40 [°C] - 2 [h]	-0.117	0.083	12.515	-0.304				92.466	51.370	23.692
	40 [°C] - 4 [h]	-0.121	0.057	229.010	-0.471				54.949	30.527	14.079
	40 [°C] - 6 [h]	-0.118	0.084	130.010	-0.472				132.061	73.367	33.837
	60 [°C] - 2 [h]	-0.099	0.066	28.764	-0.447				166.190	92.328	42.581
	60 [°C] - 4 [h]	-0.118	0.087	147.070	-0.464				106.608	59.227	27.315
	60 [°C] - 6 [h]	-0.115	0.075	248.760	-0.465				88.046	48.914	22.559
	80 [°C] - 2 [h]	-0.092	0.063	41.955	-0.453				175.794	97.663	45.042
	80 [°C] - 4 [h]	-0.102	0.075	12.655	-0.449				382.410	212.450	97.981
	80 [°C] - 6 [h]	-0.120	0.051	10.772	-0.430				394.383	219.102	101.049