

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN BASE
AGUA PARA AGUAS DE FORMACIÓN EN LA EMPRESA CHEMDRILL S.A.S.

LINA PAOLA CORTÉS DAZA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ.
2018

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN BASE
AGUA PARA AGUAS DE FORMACIÓN EN LA EMPRESA CHEMDRILL S.A.S.

LINA PAOLA CORTÉS DAZA

Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA, INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ
2018

Nota de aceptación.

Edgar Fernando Moreno Torres

Jurado 1
Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Jurado 2
Ing. Alberto Vera Romero

Bogotá, D. C. agosto de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados.

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano General de la Facultad de Ingenierías.

Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química.

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Este proyecto es el resultado del esfuerzo y el apoyo de mi familia, que me brindaron su apoyo incondicional durante todo el proceso profesional y humano, a Dios por regalarme perseverancia, paciencia, entendimiento y persistencia durante toda la carrera.

A mi madre Martha Isabel Daza Rincón por depositar su confianza en mí durante este proceso profesional, por ayudarme a levantar en los momentos que caí, por regalarme su amor, por su sacrificio, por luchar contra la corriente para sacarnos adelante, por inculcarnos valores, por enseñarnos a agradecer y respetar, por su dedicación en mi formación personal y profesional, por sus grandes consejos, y por creer en mí.

A mi abuela Eloísa Rincón por ayudarnos en el momento que más lo necesitábamos, por apoyarme en el inicio de mi carrera, por acompañarme en cada paso que doy.

A mi hermano Carlos Andrés Cortés Daza por su respaldo en cada aspecto de mi vida, por ser mi modelo a seguir, por sembrar en mí el interés y el afecto por el sector petroquímico, por compartir conmigo su conocimiento durante todo el desarrollo de este proyecto, por creer en mí, por estar a mi lado en cada momento, por brindarme su tiempo para la supervisión de este trabajo.

A mi hermana Adriana Marcela Cortés Daza por apoyarme en todo momento de mi vida, por animarme en cada idea, por su dedicación en mi bienestar, por reafirmar su confianza en mí, por su valiosa ayuda en cada obstáculo que se presentó en el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, a mis amigos, a todos aquellos con los que tuve el placer de recorrer este camino, todos aquellos que de una u otra manera me hicieron crecer persona, a todos aquellos que ayudaron a la culminación de este proyecto aportándome su colaboración y conocimiento.

Siempre estaré eternamente agradecida con todos y cada uno de ellos, ya que, por sus enseñanzas y acciones durante este camino, tengo la certeza de lo que soy y la convicción de lo que seré.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa CHEMDRILL S.A.S. por brindarme apoyo tanto humano como técnico en este proceso; especialmente al Dr. José Fernando Aramburo y al Gerente General el Dr. Tomás Fernández por abrirme las puertas de la empresa y depositar en mí su confianza para llevar a cabo este proyecto.

A la Ingeniera Sandra Milena Virviescas Castillo, Gerente Técnico y Operaciones de la empresa CHEMDRILL S.A.S., Ingeniera Química y directora de este proyecto, por compartir conmigo su conocimiento y por su constante acompañamiento, paciencia, tiempo y ayuda; muchas gracias por su seguimiento y soporte en cada aspecto de este proyecto.

Al Ingeniero Luis Velásquez, por compartir su experiencia y conocimiento, por su seguimiento y consejo durante el desarrollo del proyecto; muchas gracias por dedicar su gran experiencia y tiempo al desarrollo experimental del proyecto.

Al Ingeniero Jimmy Torres, por su constante colaboración y por compartir su experiencia en cada aspecto del presente proyecto.

Al Ingeniero José González, por su orientación y ayuda durante el desarrollo de este trabajo.

Al Ingeniero Cesar Orduz, por su sugerencia en la realización de este proyecto.

Al Ingeniero Edgar Fernando Moreno Torres, por su orientación y oportunas recomendaciones durante todo el progreso del proyecto.

Al Ingeniero Diego Nicolás Rodríguez Serrano, por su apoyo y ayuda al inicio del proyecto.

A la Ingeniera Angie Ortega, por su vital ayuda en la argumentación y desarrollo de este proyecto.

Al Ingeniero Carlos Andrés Cortés Daza por su dedicación en cada aspecto de mi vida, por brindarme su ayuda en los obstáculos que se presentaron durante el desarrollo del proyecto, por compartir su sabiduría en el campo petrolero y por enfocar sus esfuerzos en aspectos teóricos y técnicos indispensables en la realización de este proyecto.

A la Universidad de América por proveer la educación e información durante todo el pregrado, por hacer parte de mi formación humana y profesional.

A mi familia, amigos y compañeros que de una u otra forma aportaron a la culminación de esta etapa profesional.

CONTENIDO

| | pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | 22 |
| OBJETIVOS | 23 |
| 1. GENERALIDADES | 24 |
| 1.1 AGUA DE FORMACIÓN | 24 |
| 1.2 CORROSIÓN | 26 |
| 1.2.1 Corrosión en sectores industriales | 27 |
| 1.2.2 Clasificación de los procesos de corrosión | 29 |
| 1.2.3 Elementos en una corrosión electroquímica | 31 |
| 1.2.4 Factores que influyen en la corrosión | 31 |
| 1.2.5 Tipos de corrosión presentes en pozos petroleros | 33 |
| 1.2.6 Formas de protección | 34 |
| 1.2.7 Métodos de selección nivel laboratorio para inhibidores de corrosión | 38 |
| 2. EVALUACIÓN EN LABORATORIO PARA SELECCIÓN DE INHIBIDORES DE CORROSION BASE AGUA | 48 |
| 2.1 EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO | 49 |
| 2.1.1 Estabilidad térmica | 49 |
| 2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL | 50 |
| 2.2.1 Materiales y métodos | 51 |
| 2.2.2 Resultados y análisis | 53 |
| 3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACION DE EFICIENCIA DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN EN AGUA | 57 |
| 3.1 CARACTERIZACIÓN DE AGUA | 58 |
| 3.2 CUPONES | 60 |
| 3.2.1 Limpieza de cupones | 61 |
| 3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL | 63 |

| | | |
|-------|----------------------------------|-----|
| 3.3.1 | Selección de diseños factoriales | 65 |
| 3.4 | MÉTODO EXPERIMENTAL | 66 |
| 3.5 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 72 |
| 4. | EVALUACIÓN FINANCIERA | 111 |
| 4.1 | COSTOS TOTALES | 111 |
| 4.1.1 | Costo de operación actual | 111 |
| 4.1.2 | Costo de operación con proyecto | 114 |
| 5. | CONCLUSIONES | 116 |
| 6. | RECOMENDACIONES | 118 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 119 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|---|------|
| Figura 1. El ciclo del agua | 25 |
| Figura 2. LPR Parameters (0002) | 44 |
| Figura 3. Esquema general de la evaluación en laboratorio de los inhibidores de corrosión. | 49 |
| Figura 4. Diagrama de flujo prueba de estabilidad térmica. | 53 |
| Figura 5. Diagrama de flujo preparación del agua sintética en laboratorio. | 60 |
| Figura 6. Diagrama de flujo proceso de limpieza de cupones. | 62 |
| Figura 7. Componentes de un sistema RCE. | 67 |
| Figura 8. Diagrama de flujo ingreso de datos al Software Aftermath OCP. | 68 |
| Figura 9. Diagrama de flujo ingreso de datos al Software Aftermath OCP | 71 |

LISTA DE CUADROS

| | pág. |
|---|------|
| Cuadro 1. Datos registrados y resultados en Aftermath. | 43 |
| Cuadro 2. Símbolos básicos de diagrama de flujo. | 52 |
| Cuadro 3. Hipótesis alternas y nulas con base en las variables de velocidad de rotación y concentración del inhibidor. | 66 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | pág. |
|---|------|
| Gráfica 1 Medición LPR. | 39 |
| Gráfica 2. Muestra circuito abierto potencial (OCP). (Potencial de corrosión [mV] Vs. Tiempo [s]). | 43 |
| Gráfica 3. Gráfica Velocidad de corrosión [mpy] Vs. Ppm del inhibidor. | 45 |
| Gráfica 4. Diagrama de Bode Z y diagrama de ángulo de fase para circuitos. (Circuito de Randles). | 46 |
| Gráfica 5. Curva de descomposición térmica dinámico obtenido durante el análisis de un inhibidor de corrosión, a velocidad de calentamiento de 10 °C/min y bajo atmósfera inerte de N ₂ . | 50 |
| Gráfica 6. Curva de descomposición térmica isotérmico obtenido para un inhibidor de corrosión, evaluado a 65 °C bajo atmósfera inerte de N ₂ . | 50 |
| Gráfica 7. Remanente en peso del inhibidor de corrosión IC 5480 puro. | 55 |
| Gráfica 8. Remanente en peso de inhibidor de corrosión C 907 puro. | 56 |
| Gráfica 9. Potencial de circuito abierto medida de corriente. | 69 |
| Gráfica 10. Medida de circuito abierto. | 70 |
| Gráfica 11. Resistencia a la polarización para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm. | 74 |
| Gráfica 12. Tasa pérdida de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 200 RPM. | 77 |
| Gráfica 13. Tasa de penetración para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm. | 79 |
| Gráfica 14. Resistencia a la polarización para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm. | 81 |
| Gráfica 15. Tasa pérdida de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm. | 83 |
| Gráfica 16. Tasa de penetración de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm. | 84 |
| Gráfica 17. Resistencia a la polarización para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 2000 RPM. | 87 |
| Gráfica 18. Tasa pérdida de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 2000 RPM. | 89 |
| Gráfica 19. Tasa de penetración para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 2000 RPM. | 91 |

| | |
|--|-----|
| Gráfica 20. Resistencia a la polarización para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm a 2000 RPM. | 93 |
| Gráfica 21. Tasa pérdida de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm a 2000 RPM. | 94 |
| Gráfica 22. Tasa de penetración para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm a 2000 RPM. | 96 |
| Gráfica 23. Resistencia a la polarización para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 4000 RPM. | 98 |
| Gráfica 24. Tasa pérdida de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 4000 RPM. | 100 |
| Gráfica 25. Tasa de penetración para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 4000 RPM. | 102 |
| Gráfica 26. Resistencia a la polarización para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm a 4000 RPM. | 104 |
| Gráfica 27. Tasa pérdida de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm a 4000 RPM. | 105 |
| Gráfica 28. Tasa de penetración para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm a 4000 RPM. | 107 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Resultados de la prueba de estabilidad térmica. | 54 |
| Tabla 2. Caracterización de agua de formación. | 58 |
| Tabla 3. Cálculos hidrodinámicos para un típico * 15 mm OD Pine Research Electrodo de cilindro giratorio en agua. | 64 |
| Tabla 4. Datos Resistencia a la polarización del blanco a 200 RPM. | 73 |
| Tabla 5. Datos Resistencia a la polarización con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 200 RPM. | 73 |
| Tabla 6. Datos Resistencia a la polarización con 250 ppm del inhibidor C 907 a 200 RPM. | 74 |
| Tabla 7. Datos Tasa pérdida de masa para el blanco a 200 RPM. | 75 |
| Tabla 8. Datos Tasa pérdida de masa con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 200 RPM. | 76 |
| Tabla 9. Datos Tasa pérdida de masa con 250 ppm del inhibidor C 907 a 200 RPM. | 76 |
| Tabla 10. Datos Tasa de penetración para el blanco a 200 RPM. | 78 |
| Tabla 11. Datos Tasa de penetración con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 200 RPM. | 78 |
| Tabla 12. Datos Tasa de penetración con 250 ppm del inhibidor C 907 a 200 RPM. | 78 |
| Tabla 13. Datos Resistencia a la polarización con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 200 RPM. | 80 |
| Tabla 14. Datos Resistencia a la polarización con 500 ppm del inhibidor C 907 a 200 RPM. | 80 |
| Tabla 15. Datos Tasa pérdida de masa con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 200 RPM. | 81 |
| Tabla 16. Datos Tasa pérdida de masa con 500 ppm del inhibidor C 907 a 200 RPM. | 82 |
| Tabla 17. Datos Tasa de penetración con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 200 RPM. | 83 |
| Tabla 18. Datos tasa de penetración con 500 ppm del inhibidor C 907 a 200 RPM. | 84 |
| Tabla 19. Datos Resistencia a la polarización para el blanco a 2000 RPM. | 85 |
| Tabla 20. Datos Resistencia a la polarización con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 2000 RPM. | 86 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 21. Datos Resistencia a la polarización con 250 ppm del inhibidor C 907 a 2000 RPM. | 86 |
| Tabla 22. Datos Tasa pérdida de masa para el blanco a 2000 RPM. | 87 |
| Tabla 23. Datos Tasa pérdida de masa con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 2000 RPM. | 88 |
| Tabla 24. Datos Tasa pérdida de masa con 250 ppm del inhibidor C 907 a 2000 RPM. | 88 |
| Tabla 25. Datos Tasa de penetración para blanco a 2000 RPM. | 89 |
| Tabla 26. Datos Tasa de penetración con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 2000 RPM. | 90 |
| Tabla 27. Datos Tasa de penetración con 250 ppm del inhibidor C 907 a 2000 RPM. | 90 |
| Tabla 28. Datos Resistencia a la polarización con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 2000 RPM. | 92 |
| Tabla 29. Datos Resistencia a la polarización con 500 ppm del inhibidor C 907 a 2000 RPM. | 92 |
| Tabla 30. Datos Tasa pérdida de masa con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 2000 RPM. | 93 |
| Tabla 31. Datos Tasa pérdida de masa con 500 ppm del inhibidor C 907 a 2000 RPM. | 94 |
| Tabla 32. Datos Tasa de penetración con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 2000 RPM. | 95 |
| Tabla 33. Datos Tasa de penetración con 500 ppm del inhibidor C 907 a 2000 RPM. | 95 |
| Tabla 34. Datos Resistencia a la polarización para el blanco a 4000 RPM. | 97 |
| Tabla 35. Datos Resistencia a la polarización con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 4000 RPM. | 97 |
| Tabla 36. Datos Resistencia a la polarización con 250 ppm del inhibidor C 907 a 4000 RPM. | 97 |
| Tabla 37. Datos Tasa pérdida de masa para el blanco a 4000 RPM. | 98 |
| Tabla 38. Datos Tasa pérdida de masa con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 4000 RPM. | 99 |
| Tabla 39. Datos Tasa pérdida de masa para el inhibidor C 907 con 250 ppm a 4000 RPM. | 99 |
| Tabla 40. Datos Tasa de penetración para el blanco a 4000 RPM. | 100 |
| Tabla 41. Datos Tasa de penetración con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 4000 RPM. | 101 |
| Tabla 42. Datos Tasa de penetración con 250 ppm del inhibidor C 907 a 4000 RPM. | 101 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 43. Datos Resistencia a la polarización con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 4000 RPM. | 103 |
| Tabla 44. Datos Resistencia a la polarización con 500 ppm del inhibidor C 907 a 4000 RPM. | 103 |
| Tabla 45. Datos Tasa pérdida de masa con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 4000 RPM. | 104 |
| Tabla 46. Datos Tasa pérdida de masa con 500 ppm del inhibidor C 907 a 4000 RPM. | 105 |
| Tabla 47. Datos Tasa de penetración con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 4000 RPM. | 106 |
| Tabla 48. Datos Tasa de penetración con 500 ppm del inhibidor C 907 a 4000 RPM. | 106 |
| Tabla 49. Resumen de resultados referentes a la metodología experimental. | 109 |
| Tabla 50. Costos del producto. | 112 |
| Tabla 51. Costo de servicio técnico. | 112 |
| Tabla 52. Costo punto de inyección. | 112 |
| Tabla 53. Costo transporte químicos. | 112 |
| Tabla 54. Costo de cuponeras. | 113 |
| Tabla 55. Costo de cupones laminares. | 113 |
| Tabla 56. Costo total de operación actual. | 113 |
| Tabla 57. Costo cupones RCE. | 114 |
| Tabla 58. Costos del producto. | 114 |
| Tabla 59. El costo total de operación con proyecto. | 114 |
| Tabla 60. Factores decisivos en el proyecto. | 115 |

LISTA DE IMÁGENES

| | pág. |
|---|------|
| Imagen 1. Pesaje del vidrio de reloj. | 51 |
| Imagen 2. Prueba de estabilidad térmica. | 52 |
| Imagen 3. Pesaje de componentes. | 59 |
| Imagen 4. Cupones de corrosión acero al carbón 1020. | 61 |
| Imagen 5. Limpieza de cupones. | 62 |

LISTA DE ECUACIONES

| | pág. |
|--|------|
| Ecuación 1. Extrapolación de Tafel. | 40 |
| Ecuación 2. Pendiente. | 40 |
| Ecuación 3. Resistencia a la polarización. | 40 |
| Ecuación 4. Stem-Geary. | 40 |
| Ecuación 5. Relación resistencia a la polarización y la ecuación de Stem-Geary. | 40 |
| Ecuación 6. Densidad de corriente de corrosión. | 41 |
| Ecuación 7. Velocidad de corrosión. | 41 |
| Ecuación 8. Porcentaje de eficiencia. | 72 |

GLOSARIO

AGUAS CORROSIVAS: se define como el agua con inclinación a degradar metales.

AGUAS INCRUSTANTES: se define como un agua que tiende a formar precipitados insolubles que se asocian a las paredes internas de las instalaciones.

CORROSIÓN: es el ataque destructivo del metal por una reacción química o electroquímica con su medio ambiente.

EMULSIÓN: es un procedimiento que consta de la unión de dos líquidos distintos que no se puedan mezclar.

ESPECTROSCOPIA POR IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA: la espectroscopia por impedancia electroquímica (EIS) consiste en el empleo de una señal de corriente alterna e independiente al sistema, sin afectar los fenómenos de materia del sistema, posteriormente se analiza una solución electroquímica emitida por el sistema en respuesta a la perturbación aplicada.

INHIBIDORES BASE ACEITE: son inhibidores que se basan en la formación de barreras protectoras, previenen que el agua entre en contacto con la superficie metálica; estos materiales son utilizados directamente, sin la necesidad de ser diluidos o preparados previamente para su uso.

INHIBIDORES BASE AGUA: son inhibidores que consisten en modificar las características de la superficie del metal a proteger, disminuyendo así su susceptibilidad a la formación de la corrosión; comúnmente se venden concentrados, por los que hay que diluirlos con agua.

INHIBIDORES DE CORROSIÓN: es una sustancia química, que, adicionada en pequeñas concentraciones en un ambiente corrosivo, disminuye efectivamente la velocidad de corrosión.

INHIBIDORES ORGÁNICOS: los inhibidores orgánicos o formadores de película, protegen al metal por la formación de una película hidrofóbica sobre él. Consisten en moléculas carboxílicas, son atraídos hacia las secciones donde se originan los pares galvánicos.

RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL: se trata de un método de selección de inhibidores, este método consiste en la aplicación de un voltaje o potencial de polarización a un electrodo que se encuentra sumergido en una solución.

RESUMEN

El fenómeno de la corrosión es una problemática que afecta a varios sectores industriales, entre estos se encuentra el sector petrolero; afectando directamente las estructuras de revestimiento, producción y perforación. Una de las soluciones implementadas en la industria petrolera, es el uso de inhibidores de corrosión base agua. Estos inhibidores poseen varias ventajas, pues su aplicación debe ser diluida al trabajar en concentraciones de ppm, pospone la corrosión mediante la alteración de la superficie del metal, aumentan la vida útil de equipos, no es necesaria su remoción antes de efectuar una operación, las películas generadas son delgadas y transparentes, reducen costos en cuanto a cantidades del producto, mitigan el daño ambiental debido a su baja toxicidad, tiempo prolongado de protección, no trabajan mediante eliminación del aire y agua.

Actualmente la empresa implementa un método de selección de inhibidores de corrosión base agua en campo por velocidad de desgaste de material, el cual consiste en la instalación de cupones laminares en la línea de flujo en puntos intermedios y finales de los tramos a proteger, teniendo en cuenta el peso del cupón antes y después de ser expuestos al medio; dicha metodología representa costos de \$ 8'128.612. Por esta razón el presente trabajo tiene como propósito generar una propuesta para la evaluación de la eficiencia de inhibidores de corrosión base agua para la empresa CHEMDRILL S.A.S. a nivel laboratorio que reduzca costos en su implementación.

En primer lugar se desarrolla una identificación de los parámetros involucrados en los inhibidores de corrosión, es decir, se realiza una recopilación bibliográfica que abarca cada una de las temáticas más importantes en la aplicación de inhibidores base agua; temas estrechamente relacionados con la corrosión como: agua de formación, factores influyentes, clases, formas de protección, inhibidores, funcionamiento, clasificación, métodos de análisis en la evaluación, métodos de selección nivel laboratorio, entre otros.

Por otra parte, se realiza una preselección de inhibidores por medio de una evaluación de desempeño de estabilidad térmica, haciendo uso de una línea de 12 diferentes inhibidores de corrosión base agua en total expuestos a una temperatura de 190 °C, durante diferentes intervalos de tiempo (0, 1,2,3,5,8,10 minutos); esto con el objetivo de conocer el comportamiento de dichos inhibidores en condiciones de temperatura variable.

De acuerdo con lo estudiado, se propone un método experimental de Resistencia a la polarización lineal, por la cual se logra realizar una evaluación de eficiencia de los inhibidores de corrosión base agua, seleccionado por medio de soportes bibliográficos que contribuyan al cumplimiento de dicho objetivo. Se desarrolla la etapa experimental con ayuda de un diseño factorial 3^2 de 9 ensayos por inhibidor; sin embargo, es innecesaria la realización de un blanco por inhibidor; por esta razón

se opta por un total de 15 corridas en total por medio del equipo Rotating Cylinder Electrodes (RCE), definiendo la eficiencia de los inhibidores seleccionados.

Finalmente, se determinó la viabilidad financiera del proyecto por medio de un estudio de costos, con el propósito de conocer la reducción de precios que adquiere la empresa al implementar el inhibidor base agua y obteniendo una reserva económica de \$ 7'111.026.

Palabras clave: Agua de formación, corrosión, inhibidor base agua, temperatura, velocidad.

INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera al realizar los procesos de producción en un campo, se genera igualmente la obtención de aguas de formación; por lo cual se puede ver afectada la instalación del pozo, presentando problemas de corrosión, los cuales dependen tanto de la composición del crudo, como de las sustancias que pueda contener el agua de formación. En zonas petroleras a nivel nacional se estima un promedio que por cada barril de crudo que se extrae, se obtiene 12,02 barriles de agua de formación, según el informe del desempeño ambiental del sector de hidrocarburos 2015, suministrado por la Asociación Colombiana del Petróleo; donde son evidentes los volúmenes de agua que maneja la industria petrolera en Colombia.

Con el objetivo de controlar la corrosión en las instalaciones, los inhibidores de corrosión se han venido utilizando en la industria, al ser un sistema abierto también debe tenerse en cuenta la deposición de precipitados inorgánicos, y al estar involucradas grandes cantidades de agua se debe procurar la limpieza de toda la superficie de la estructura donde será aplicado el inhibidor; sin embargo, presentan un problema en el descenso de la eficiencia de los inhibidores de corrosión.

Los inhibidores de corrosión base agua son opción para la industria petrolera, ya que al ser un producto que trabaja en concentraciones de ppm tienen un menor costo en el mercado, además protegen superficies expuestas por un prolongado periodo de tiempo, y contribuyen a mitigar un daño ambiental.

La solución que se plantea es la implementación de una correcta selección de inhibidores de corrosión base agua a nivel laboratorio, definiendo durante este proceso, su nivel de protección, eficiencia del producto, recursos utilizados, equipos necesarios, beneficios e ingresos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de varios inhibidores de corrosión base agua en diferentes condiciones de trabajo.

OBJETIVO ESPECIFICO

- Identificar los parámetros involucrados en los inhibidores de corrosión en aguas de formación.
- Implementar un método experimental para la comparación del efecto inhibidor entre los productos seleccionados.
- Determinar la viabilidad financiera con una mejor selección de los inhibidores de corrosión base agua.

1. GENERALIDADES

Para el desarrollo de este proyecto, es necesario conocer y definir conceptos teóricos referentes al fenómeno de la corrosión, tales como tipos de inhibidores utilizados, características físicas y químicas tomadas en cuenta, método de experimentación llevado a cabo, maneras de inhibición; todo con el propósito de evaluar los productos seleccionados.

1.1 AGUA DE FORMACIÓN

Es el agua presente en los poros de las rocas y se encuentra adjunta al petróleo, compuesta por sales de sodio, sólidos en suspensión, gases disueltos y metales pesados¹; debido a su composición el agua de formación juega un papel importante en problemáticas como la formación de medios corrosivos, constante humedad en tuberías, emulsiones, incrustaciones, incremento en la conductividad del fluido y disuelve gases corrosivos tales como CO₂ Y H₂S ² ; por esta razón la industria petrolera destina una gran parte de dinero a dicha separación mediante métodos químicos y físicos, y pone en práctica métodos como la reinyección del agua de formación en pozos petroleros a medida que el pozo es drenado, con el objetivo de aumentar la producción del pozo y ser amigable con el medio ambiente.

La presencia de una gran cantidad de agua de formación en pozos de inyección acarrea problemas en la producción como filtraciones en el revestidor y tuberías de producción, flujo canalizado detrás del revestidor, contacto agua – petróleo dinámico, capa inundada sin flujo transversal, corrosión, fracturas entre inyector y productor, fallas de una capa de agua, conificación o formación de cúspide, segregación gravitacional, entre otros.

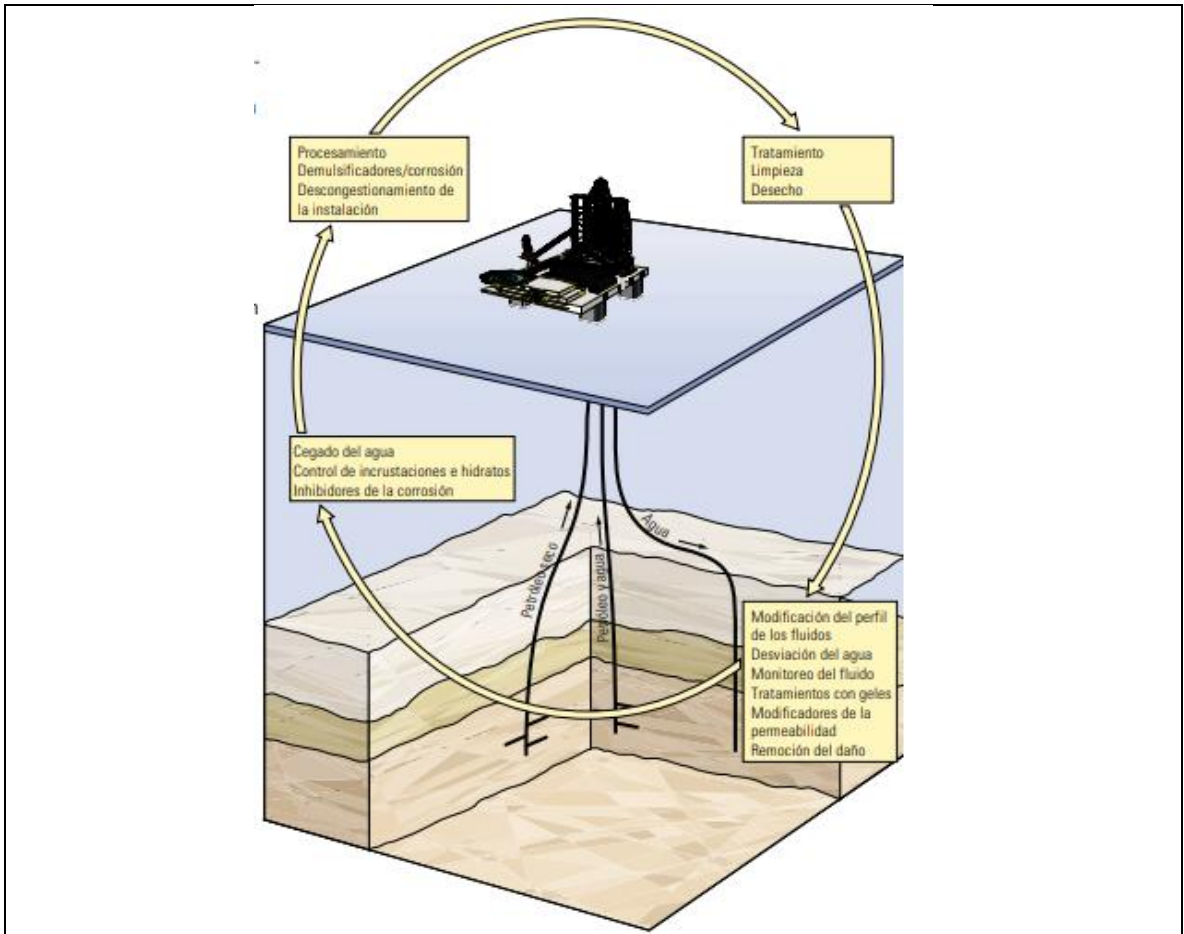
La producción de agua de formación afecta todas las etapas de obtención de petróleo, puesto que la interface agua – petróleo es definitiva para continuar con la etapa de exploración o el inminente abandono del pozo; este flujo de agua se desplaza mediante un yacimiento, que más tarde entra a la tubería de producción y a la estructura en superficie, posteriormente se extrae y se arroja al medio ambiente; sin embargo, la industria petrolera ha implementado un mecanismo de inyección para conservar la presión del yacimiento. Este método es considerado como el ciclo del agua, como se ilustra en la Figura 1: ³

¹ BOLAÑOS GAONA, LUIS GALVANY. EVALUACIÓN DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN TIPO FÍLMICO PARA AGUA DE FORMACIÓN. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA. [1]:

² PULLAS RIVERA, DIEGO FERNANDO. FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN EN LABORATORIO DE UN NUEVO INHIBIDOR DE CORROSIÓN PARA DUCTOS EN CAMPOS PETROLEROS. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA. [1]:

³ Bailey, Bill. Crabtree, Mike. Tyrie, Jeb. Elphick, Jon. Kuchuk, Fikri. Romano, Christian. Roodhart, Leo. Schlumberger. Control de agua. [1]. [Consultado el Mar 29, 2018]. Disponible en: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/sum00/p32_53.pdf.

Figura 1. El ciclo del agua.



Fuente: Schlumberger, [En línea] https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/sum00/p32_53.pdf
Consultado el Feb 8,2018

La producción mundial de agua de formación es de 210 millones de barriles por día [33,4 millones m³/d] los cuales son extraídos junto con 75 millones de barriles por día [11,9 millones m³/d] de petróleo. Por otra parte, a nivel nacional al comparar los volúmenes de aguas de producción se estima que por cada barril de crudo que se extrae, se obtiene 12,02 barriles de agua de formación, es decir, una cantidad de 1,91 m³; según el informe del desempeño ambiental del sector de hidrocarburos 2015, suministrado por la Asociación Colombiana del Petróleo.⁴

⁴ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DEL PETRÓLEO. Informe de desempeño ambiental 2015. [1]. [Consultado el Oct 19,2017]. Disponible en: https://acp.com.co/web2017/images/pdf/publicaciones_e_informes/informe_ambiental/IGA%202016_WEB.pdf

1.2 CORROSIÓN

La corrosión se considera como un fenómeno de carácter oxidativo y anódico fundamentado en el desgaste de un material metálico, este proceso se debe a una corriente de electrones, la cual se radica al existir una diferencia de potenciales entre dos zonas; cuando un elemento químico cede electrones hacia otra especie, se dice que el elemento que los emite se comporta como un ánodo y se realiza la oxidación, y aquella que los recibe se comporta como un cátodo y en ella ocurre la reducción; por esta razón se genera un alto choque o impacto electroquímico. La corrosión basa su acción en una reacción química de óxido – reducción, en la cual participan varios factores como lo son, la exposición a altas presiones, altas temperaturas, la exposición a soluciones salinizadas (conjugadas con sal), agua, productos químicos, productos biológicos y finalmente propiedades físico - químicas que posean estos agentes metálicos. ^{5 6 7}

En los metales se presentan varios tipos de corrosión debido a las diferencias presentadas en la morfología del material y en las características del ambiente en el cual se tenga expuesto el metal; por esta razón se encuentra la corrosión uniforme, corrosión localizada, corrosión por picadura, corrosión por fricción, entre otras. ⁸

La corrosión se presenta como una película delgada con una tonalidad cobre o marrón adherida a la superficie del metal en el acero y el hierro, además se manifiesta en el acero y en las aleaciones de cobre - bronce como una capa de tono verde – negro; posteriormente se presentan imperfecciones en la superficie del material, lo cual conlleva a rupturas o fracturas de este. ⁹

Los resultados de una corrosión no controlada conllevan a la degradación de cualquier material en una cierta cantidad de tiempo transcurrido, por esta razón la corrosión se considera como uno de los gastos más grandes en la industria. Debido a este fenómeno, en Vancouver, Canadá, durante la conferencia de corrosión 2016, NACE International publicó el estudio "Medidas Internacionales de Prevención, Aplicación y Economía de la Tecnología de la Corrosión (Impacto)", en donde se dan a conocer las pérdidas monetarias que ocasiona el ataque de corrosión a nivel

⁵ UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. 9. Principios de corrosión. [1]. -05-20T05:00:12+00:00. [Consultado el Oct 19,2017]. Disponible en: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/9-principios-de-corrosion/>

⁶ LOPEZ, Elia del Valle León. Medidas de Protección Contra la Corrosión. [1]. [Consultado el Oct 19,2017]. Disponible en: <http://medidasdedefensacontralacorrosion.blogspot.com.co/>

⁷ BILURBINA, Luis y Liesa, Francisco. Materiales no metálicos resistentes a la corrosión. Barcelona: Marcombo, 1990.

⁸ Morales, Carlos Daniel. Corrosión - Monografias.com. [1]. [Consultado el Feb 8,2018]. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos60/corrosion/corrosion.shtml>.

⁹ ZAPATA MINA, Juan Camilo, et al. 12. CORROSIÓN Y PROCESOS DE CORROSIÓN. [1]. -12-13T00:55:24+00:00. [Consultado el Oct 19,2017]. Disponible en: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/12-corrosion-y-procesos-de-corrosion/>

mundial; en este estudio evidencia que el costo es de US\$ 2,5 billones, es decir, 3,4% del producto interior bruto mundial (PIB).

"El estudio Impacto, refuerza lo que los últimos titulares han venido demostrando: es necesario que haya un cambio en cómo se toman las decisiones sobre la corrosión"¹⁰, dijo Bob Chalker, CEO en NACE International. Partiendo de este fundamento, dicho estudio también exhibió que el uso de las mejores técnicas de prevención de corrosión podría producir ahorros globales del 15 y 35% del costo de los daños, es decir, un ahorro aproximado de US \$375 mil y US \$875 mil millones.¹¹

Por otra parte, la Administración Federal de Autopistas de EUA, en el año 2015 dio a conocer que el costo directo anual aproximado de la corrosión para los Estados Unidos se apreció en USD 500000 millones, lo que representa alrededor de 3,1% del producto bruto interno de este país¹²; además según la revista Universia Colombia, durante el año 2013 en Colombia, las pérdidas ascienden a más 26 mil millones de pesos (4% del PIB) debido al costo del fenómeno de la corrosión en la industria.¹³

En el sector petrolero es común la presencia de corrosión en las estructuras de revestimiento, debido a la cantidad de agua coproducida que entra en contacto con la estructura. Por esta razón, el sector petroquímico opta por mejores opciones para el control de la corrosión en las instalaciones de producción como lo son inhibidores de corrosión base agua, siendo esta la una opción para mitigar el daño ambiental, puesto que los compuestos químicos utilizados y la modificación del metal a estudiar son amigables con el medio ambiente en comparación con otros tratamientos reductores de tasa de corrosión. Al igual que el uso de inyección de agua de formación es una gran alternativa puesto que se rechaza la opción de un desecho de agua al medio ambiente; sin embargo, el agua que no se reinyecta es tratada en el lugar y se usa posteriormente para riego u otras actividades, todo esto con el objetivo de conservar recursos y preservar el medio ambiente.

1.2.1 Corrosión en sectores industriales. Un daño por corrosión es el más común de las problemáticas en la industria puesto que se define como la destrucción de un metal por transcurso electroquímico al tener contacto con el medio ambiente

¹⁰ Chalker, Bob. Revelan el costo global de la corrosión. INPRA LATINA. [En línea]. [Consultado el Aug 18,2018]. Disponible en: <http://www.inpralatina.com/201606146395/noticias/empresas/revelan-el-costo-global-de-la-corrosion.html>

¹¹ CHAVERRA,Duván. Revelan el costo global de la corrosión | Pinturas y Recubrimientos. [1]. [Consultado el Feb 22,2018]. Disponible en: <http://www.inpralatina.com/201606146395/noticias/empresas/revelan-el-costo-global-de-la-corrosion.html>

¹² Asrar, Nausha; MacKay, Bruce; Birketveit, Oystein; Stipanicev Marko; Jackson, Joshua E; Jenkins, Alyn; Melot, Denis; Scheie, Jan; Vittonato, Jean. Corrosion- The longest war. Schlumberger. 2016.

¹³ Universia Colombia. Más de 26 mil millones de pesos pierde la industria colombiana debido a la corrosión de materiales. [1]. [Consultado el Feb 8,2018]. Disponible en: <http://noticias.universia.net.co/actualidad/noticia/2013/08/29/1045848/mas-26-mil-millones-pesos-pierde-industria-colombiana-debido-corrosion-materiales.html>

o algún agente corrosivo; algunas industrias en las cuales se encuentra latente este fenómeno son:

- **Industria alimentaria.** En este sector es usual el manejo de productos como vino, zumos de frutas, cerveza, soluciones de hidróxido de sodio, ácidos minerales, hipoclorito de sodio, vinagre, verduras y pescados en salmueras, productos lácteos, carne, entre otros; sustancias y alimentos que promueven la presencia de corrosión microbiológica en equipos como tuberías, pasteurizadores, tuberías, tolvas, depósitos, tanques de fermentación.¹⁴
- **Industria petrolera.** En la industria petrolera es común la presencia de corrosión dulce, corrosión ácida, microbiológica en estructuras como la tubería de revestimiento, tubería de perforación, entre otros.
- **Industria aeronáutica.** En la industria aeronáutica las cargas en la estructura metálica en relación con la atmósfera pueden originar mecanismos de degradación, ya sea sobre una superficie metálica completa, o puede ser penetrante en las aberturas de los ensamblajes, originando un ataque localizado, o bien pueden los agentes corrosivos entrar en los límites de grano e inducir un ataque intergranular; teniendo como consecuencia agrietamientos del metal por tensión y fatiga.
- **Industria geo termoeléctrica.** Se presentan distintos tipos de corrosión en las diferentes zonas de las plantas geo termoeléctricas; tales como, pozos de extracción de fluidos geotérmicos, tuberías de producción y conducción de vapor, separadores, condensadores, torres de enfriamiento y turbinas de vapor para generar electricidad.
- **Industria civil.** Puentes, muelles de puertos fluviales y marinos, carreteras, edificios públicos, chimeneas e instalaciones hidráulicas, son algunas de las estructuras cimentadas de concreto reforzado con acero, y por ende expuestas a sufrir el fenómeno de la corrosión.
- **Industrial del gas.** En esta industria es usual la corrosión de instalaciones metálicas y la obstrucción de tuberías y otros dispositivos debido a la acumulación de incrustaciones, especialmente en campos donde la fuente es de clase “Shale” gas. Se pueden hallar fenómenos de corrosión de tipo localizado como las picaduras, corrosión galvánica, corrosión microbiológica, entre otros.¹⁵

¹⁴ Lebed Lebed, Daria. Corrosión en la Industria de la Alimentación. [1]. [Consultado el Jul 17, 2018]. Disponible en: <https://prezi.com/rraeniqpodbj/corrosion-en-la-industria-de-la-alimentacion/>

¹⁵ Valdéz Salas, Benjamín; Schorr Wiener, Michael. Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. [1]: España, 2013.

1.2.2 Clasificación de los procesos de corrosión. Los procesos de corrosión se pueden clasificar en: Corrosión por forma y corrosión por medio de exposición.

• **Procesos de corrosión por forma**

- ❖ **Corrosión uniforme.** Es un tipo de corrosión en el cual el material es afectado de manera uniforme y generalizada, dejando en toda la superficie aspectos físicos tales como tonalidad y porosidad resultado del desarrollo de la corrosión. La corrosión uniforme u oxidación por altas temperaturas es habitual en superficies expuestas a altas temperaturas y altas presiones, y además se puede dar en metales expuestos a medios ácidos.¹⁶
- ❖ **Corrosión galvánica.** Se presenta cuando dos metales distintos entran en contacto, ambos poseen diferentes potenciales eléctricos, lo cual da como resultado un flujo de electrones entre ellos en medio electrolítico. Debido a que se presenta el contacto entre un metal activo y el otro noble; el metal tendente al ataque de corrosión se comporta como ánodo, mientras que el metal resistente a la corrosión se comporta como cátodo; aumentando o disminuyendo la velocidad del ataque de corrosión en comparación con el ataque de manera aislada entre los dos metales. En este tipo de corrosión la velocidad de este proceso es directamente proporcional al área de contacto entre ellos.¹⁷
- ❖ **Corrosión en placas.** En este tipo de corrosión el ataque se prolonga más en ciertas zonas, pero se expone más como un ataque general; incluyendo casos intermedios entre la corrosión uniforme y localizada.¹⁸
- ❖ **Corrosión por picadura (Pitting).** El ataque de corrosión por picadura es ocasionado por pequeños poros en la superficie del metal, los cuales se difunden hacia el interior del metal en forma de canales cilíndricos.¹⁹
- ❖ **Corrosión por fricción.** Es originada por vibraciones o movimientos entre los metales que se encuentran en contacto, obteniendo como resultados picaduras en la superficie de los metales.²⁰

¹⁶ ZAPATA MINA Juan Camilo, et al. 12. CORROSIÓN Y PROCESOS DE CORROSIÓN. [1]. -12-13T00:55:24+00:00. [Consultado el Oct 19,2017]. Disponible en: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/12-corrosion-y-procesos-de-corrosion/>

¹⁷ ZAPATA MINA Juan Camilo. Op.

¹⁸ ZAPATA MINA Juan Camilo. Op.

¹⁹ ZAPATA MINA Juan Camilo. Op.

²⁰ ZAPATA MINA Juan Camilo. Op.

- ❖ **Corrosión por cavitación.** En este tipo de corrosión se encuentra latente la formación de burbujas en la superficie del metal, ocasionado por el contacto de algún líquido con la superficie del material.²¹
- ❖ **Corrosión microbiológica.** En estos casos el ataque se produce en materiales que se encuentran sumergidos o flotando en medios acuosos, el ataque se manifiesta por medio de organismos biológicos los cuales causan la formación de grietas e interviene como como aceleradores del proceso de corrosión localizado.²²
- ❖ **Corrosión intergranular.** Este tipo de corrosión produce generalmente en aleaciones de níquel y aceros inoxidable. Se encuentra localizada en los límites del grano, generando una disminución en la resistencia que desintegran los bordes de los granos.²³
- ❖ **Corrosión por erosión.** Este ataque es acelerado por el movimiento relativo que se da entre el medio y la superficie del material; se destaca por la fricción en la superficie paralela al movimiento.²⁴
- ❖ **Corrosión selectiva o localizada.** Este proceso de corrosión se caracteriza por la eliminación de un elemento determinado en una aleación, disolviéndolo en la estructura de la aleación causado por una interacción electroquímica con el medio. Además, actúa sobre metales nobles como Plata-cobre o cobre-oro.²⁵
- ❖ **Corrosión por esfuerzo.** Este tipo de corrosión es causada por la formación de tensiones internas en el metal después de una deformación en frío.²⁶

• Procesos de corrosión según el medio

- ❖ **Corrosión química.** En este tipo de corrosión el metal reacciona con un medio no iónico, es decir, si se expone un material limpio al oxígeno, el material comenzará a reaccionar con el oxígeno y se dará la formación de óxidos.²⁷
- ❖ **Corrosión electroquímica.** Se produce cuando sucede una diferencia de potencial entre secciones próximas entre sí en la superficie del metal; en donde se desarrolla una mitigación electrónica, a partir de la sección que posee el

²¹ ZAPATA MINA Juan Camilo. Op.

²² ZAPATA MINA Juan Camilo. Op.

²³ ZAPATA MINA Juan Camilo. Op.

²⁴ ZAPATA MINA Juan Camilo. Op.

²⁵ ZAPATA MINA Juan Camilo. Op.

²⁶ ZAPATA MINA Juan Camilo. Op.

²⁷ ZAPATA MINA Juan Camilo. Op.

potencial de oxidación más elevado (área anódica) hacia la sección que posee el potencial de oxidación más bajo (área catódica).²⁸

1.2.3 Elementos en una corrosión electroquímica.

- **Ánodo.** Es el electrodo que transfiere electrones en una reacción de oxidación, por esta razón es la parte de la superficie que se corroe.²⁹
- **Cátodo.** Es el electrodo que recibe electrones en una reacción de reducción, siendo la parte de la superficie que no se disuelve.³⁰
- **Electrolito.** Es una solución electrolítica conductiva, la cual actúa conduciendo la corriente desde el ánodo hasta el cátodo, siempre y cuando los electrodos se encuentren sumergidos en ella.³¹
- **Conductor eléctrico.** Es una corriente eléctrica en la cual los electrodos (ánodo y cátodo) deben estar conectados, con el objetivo de crear una vía que permita el paso de la corriente entre los electrodos.³²

1.2.4 Factores que influyen en la corrosión. En operaciones de perforación en pozos petroleros, el uso de maquinarias como taladros, bombas, entre otros; y las condiciones físicas y geográficas del pozo, favorecen la presencia de agentes corrosivos como temperatura, presión, velocidad, y a su vez la composición química con la que llega la misma agua de formación como lo es la acidez, metales pesados y la salinidad del medio.

Estos elementos son importantes a la hora de efectuarse la acción de la corrosión, pues dichos factores son directamente proporcionales a la degradación del metal y al tiempo del ataque de este fenómeno.

- **Temperatura.** Siendo la temperatura una magnitud que mide el nivel térmico que un cuerpo adquiere. Toda sustancia en determinado estado (sólido, líquido o gaseoso), está compuesta por moléculas que se encuentran en constante movimiento. La suma de las energías de todas las moléculas del cuerpo se conoce como energía térmica; y la temperatura es la medida de esa energía promedio.³³

²⁸ ZAPATA MINA Juan Camilo. Op.

²⁹ PULLAS RIVERA, Diego Fernando. Formulación y evaluación en laboratorio de un nuevo inhibidor de corrosión para ductos en campos petroleros. universidad central del ecuador facultad de ingeniería química carrera de ingeniería química.

³⁰ PULLAS RIVERA, Diego Fernando. Op.

³¹ PULLAS RIVERA, Diego Fernando. Op.

³² PULLAS RIVERA, Diego Fernando. Op.

³³ CONCEPTODEFINICION.DE ¿Qué es Temperatura? - Su Definición, Concepto y Significado. [1]. [Consultado el Feb 9,2018]. Disponible en: <http://conceptodefinicion.de/temperatura/>.

Conociendo esta definición se pueden observar aspectos en el fenómeno de la corrosión a elevadas temperaturas como la termodinámica de la oxidación a alta temperatura, mecanismo de formación del óxido, atmósferas formadas por mezclas de gases, cinética de la corrosión por alta temperatura. Es habitual que el fenómeno de la corrosión se vea favorecido con el aumento de la temperatura, debido al contacto de las moléculas en el medio.³⁴

Para un sistema cerrado, la velocidad de corrosión incrementa junto con la temperatura, puesto que, los materiales reaccionan con el aire para conformar óxidos externos. Se puede presentar con muchas clases de gases, así como; oxígeno, CO, halógenos o el vapor, todos los metales son vulnerables de ser atacados por los gases a alta temperatura; además la alta temperatura de oxidación de las aleaciones es fundamental en el planteamiento de herramientas como equipamiento de petroquímicas.³⁵

La oxidación de detalla como la manera más usual para la corrosión a alta temperatura. A pesar de ello, la oxidación en sí mismo no es desfavorable, puesto que la mayoría de los metales inflexibles a la corrosión y al calor necesitan de la configuración de una película de óxido para suministrar resistencia a la corrosión. El óxido de cromo (Cr_2O_3) es el más usual de dichas películas. En muchas dificultades de corrosión industrial, la oxidación no sucede en hermetismo; al contrario, es una combinación de procesos de corrosión a altas temperaturas que provoca deterioro del material cuando están expuestos a la atmósfera contaminantes como azufre, cloro, vanadio, entre otros.

Los medios oxidantes hacen referencia a trabajos con un alto volumen de oxígeno. Por el contrario, los medios reductores se representan por procesos de bajo volumen de oxígeno. A elevadas temperaturas, los metales o aleaciones pueden reaccionar espontáneamente con la atmósfera gaseosa.

Las características de las películas de óxido a alta temperatura, como su morfología, estructura de defectos iónicos y estabilidad termodinámica, ejerce un trabajo crítico en la puntualización de la resistencia a la oxidación de un metal en un ambiente particular.³⁶

³⁴, RAMIREZ, YETXIBEL; BUCARITO, JESUS; PEREZ, MARIANNIS. La Tecnología Del. Tecnología del Acero: CORROSION POR ALTAS TEMPERATURAS. [1]. miércoles, 29 de junio de. [Consultado el Feb 9,2018]. Disponible en: <http://tecnologiadelacero06pm.blogspot.com.co/2011/06/corrosion-por-altas-temperaturas.html>.

³⁵. Ingeniería mecánica col. corrosión seca - ingeniería mecánica. [1]. [Consultado el Aug 15,2018]. Disponible en: <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/07/corrosion-seca.html>

³⁶ Roberge, Pierre R. Handbook of Corrosion Engineering. McGraw. United States of America. 2000. 221 p.

Para un metal, la temperatura de operación asume un aspecto primordial en la definición de la tasa de oxidación. Al momento de aumentar la temperatura, igualmente la tasa de oxidación se incrementa.³⁷

- **Velocidad.** La velocidad es una magnitud vectorial, que está asociada al desplazamiento o movimiento de un objeto en función del tiempo; por esta razón, un mayor movimiento entre la solución y el metal estimula la corrosión.³⁸
- **Acidez de la solución.** Un ácido es aquella sustancia capaz de liberar un ion de hidrogeno, por esta razón en el fenómeno de la corrosión por agua, el pH del medio es un factor importante pues con un pH fuertemente alcalino la velocidad de la corrosión disminuye, mientras que con un pH fuertemente ácido acelera la forma de acción de la corrosión.³⁹

1.2.5 Tipos de corrosión presentes en pozos petroleros.

- **Corrosión dulce.** La corrosión dulce se define como el desgaste de un metal al entrar en contacto con dióxido de carbono y ácidos orgánicos, descartando el ácido sulfhídrico. En pozos, la corrosión se presenta cuando el gas ácido entra en contacto con gotas de agua condensada; además se manifiesta en forma de picaduras profundas en el interior de las tuberías.

Se debe destacar que el CO₂ no es corrosivo a las condiciones de temperatura y presión en los sistemas de producción de petróleo y gas, sin embargo, es corrosiva al ser diluido en una fase acuosa, favoreciendo una reacción electroquímica resultante de la relación entre el metal y la fase acuosa, debido a la formación del ácido carbónico y por ende la acidificación del medio.

Además, se produce agua con un pH inferior a 7 en la cabeza del pozo y comúnmente más bajo que 4 en los fondos, esto se debe al alto contenido de CO₂ en estado gaseoso, presiones desde 1000 psi a 8000 psi, presencia de ácidos orgánicos como ácido acético y la erosión por flujo de gas a cierta velocidad.^{40 41}

³⁷.TODO PRODUCTIVIDAD: Estudiando la corrosión a altas temperaturas (1ª PARTE). [1]. 15 septiembre. [Consultado el Aug 15,2018]. Disponible en: <http://todoproductividad.blogspot.com/2011/09/estudiando-la-corrosion-altas.html>

³⁸ FERNANDEZ, JOSE. Velocidad. [1]. [Consultado el Feb 9, 2018]. Disponible en: <https://www.fisicalab.com/apartado/velocidad#contenidos>.

³⁹FUNDACION MAPFRE.ORG. GUIAS DE SEGURIDAD. Corrosión. [1]. [Consultado el Feb 9, 2018]. Disponible en: https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/es/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1030514.

⁴⁰CLIMENT OLMEDO, María José; ENCINAS PEREA, Susana and FERRER RIBERA, Belén. Química para ingeniería. Valencia: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, 2013.

⁴¹ PULLAS RIVERA, DIEGO FERNANDO. Op.

- **Corrosión agria o amarga.** La corrosión agria se define como el desgaste de un metal al estar en contacto con ácido sulfhídrico disuelto en agua, siendo origen de iones de hidrógeno convirtiéndose en un medio corrosivo, posteriormente se manifiesta la corrosión de manera uniforme, picaduras de fondo agudo y un agrietamiento por esfuerzo sulfhídrico o de fragilización por hidrógeno.⁴²

El sulfuro de hidrógeno al disolverse en fase acuosa se convierte en un ácido débil, y, por lo tanto, es una fuente de iones de hidrógeno, siendo este corrosivo. Los productos de corrosión son sulfuros de hierro (FeSx) y sulfuros de hidrógeno.

- **Corrosión por oxígeno.** La corrosión por oxígeno se define como el deterioro de un metal al estar en contacto con oxígeno disuelto en los fluidos de perforación, ya que el oxígeno promueve la corrosión que generan los gases ácidos como lo son dióxido de carbono y ácido sulfhídrico, actuando como un acelerador de la destrucción anódica del material; logrando eventualmente la presencia de corrosión uniforme y corrosión por picadura.^{43 44}

1.2.6 Formas de protección. En el sector industrial es imperativo el conocimiento sobre el ataque de la corrosión, las causas que lo generan y sobretodo las formas de protección que se manejan; tales como recubrimientos orgánicos (Pinturas, lacas y resinas), recubrimientos inorgánicos (esmaltes vítreos), recubrimientos metálicos, recubrimientos por película pasiva, inhibidores, entre otros.⁴⁵

Para fines prácticos, este proyecto se enfoca en el uso de inhibidores de corrosión base agua.

- **Inhibidores de corrosión.** Los inhibidores de corrosión son productos que adicionados en pequeñas cantidades a un material proporcionan una película protectora fija sobre una superficie metálica, la cual detiene la acción corrosiva en el metal. Durante un tiempo los inhibidores de corrosión más usados en la industria fueron los inhibidores de corrosión en base aceite, debido a su efectividad; sin embargo recientemente se han posicionado con gran éxito en la industria los inhibidores base agua, su importancia se debe a que pueden evitar efectivamente la corrosión durante largos periodos de tiempo en condiciones moderadas de almacenaje en planta y embarque protegido, al ser un producto que trabaja en concentraciones de ppm resulta ser una opción para la industria

⁴² PULLAS RIVERA, DIEGO FERNANDO. FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN EN LABORATORIO DE UN NUEVO INHIBIDOR DE CORROSIÓN PARA DUCTOS EN CAMPOS PETROLEROS. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA. [1]:

⁴³ CLIMENT OLMEDO, María José; ENCINAS PEREA, Susana and FERRER RIBERA, Belén. Op.

⁴⁴ PULLAS RIVERA, DIEGO FERNANDO. Op.

⁴⁵ Ibrahim, Publicado por Vaness zakhour. Forma de Protección contra la corrosión. [1]. [Consultado el Jul 23,2018]. Disponible en: <http://formaproteccioncontralacorrosion.blogspot.com/>

minimizando gastos de producción, además se considera como una alternativa ya que contribuye a mitigar el daño ambiental.⁴⁶

- **Inhibidores base aceite.** Los inhibidores de corrosión base aceite, consisten en la formación de películas protectoras, evitan que el agua entre en contacto con la superficie del metal; estos materiales son utilizados directamente, sin la necesidad de ser diluidos.

La película protectora que se formó varía de acuerdo con el producto específico, puede ser semidura, suave, transparente; los métodos para retirar este recubrimiento son diferentes, pues dependen del producto usado, bien podría haciendo uso de limpiador, solvente, entre otros⁴⁷. Un ejemplo de los inhibidores base aceite son:

- Imidazolina o aminas aromáticas. El efecto inhibidor de las aminas aromáticas se puede llevar a cabo por varios mecanismos de adsorción; entre los cuales sobresale la adsorción de películas del inhibidor en la superficie metálica, el cual se lleva a cabo por transferencia de carga parcial entre el material y la molécula, estableciendo un enlace covalente. En moléculas N-heterocíclicas, esta transferencia de carga es causada por el par de electrones aislados presentes en los átomos de hidrogeno de la molécula orgánica. Además, se considera otra manera de adsorción, la cual se da por medio atracción electrostática entre un átomo de hidrogeno cargado positivamente y la superficie metálica cargada negativamente. Por esta razón es común el uso de los inhibidores compuestos en su mayoría por imidazolina en la industria petrolera y petroquímica, ya que por sus mecanismos de adsorción e inhibición son considerados como uno de los inhibidores menos tóxicos en el mercado.⁴⁸
- **Inhibidores base agua.** Estos inhibidores se relacionan con especies orgánicas, y se caracterizan por su necesidad de contener grupos funcionales con altas densidades de carga negativa, tales como N, aminas, S, OH, carbonilos, anillos aromáticos, entre otros; puesto que es precisa la adsorción del inhibidor sobre la superficie del metal. Estas cualidades señalan, que poseen buenas propiedades

⁴⁶ QUIMICOS SIAMEX. Venta de Inhibidor de corrosión.[1].[Consultado el Oct 19,2017]. Disponible en: http://www.productosquimicosmexico.com.mx/inhibidor_de_corrosion.aspx

⁴⁷ ALMAGRO PONCE MIGUEL ALFONSO and PILAY DE LA A CARLOS ALBERTO. UTILIZACIÓN DE INHIBIDORES ORGÁNICOS EN OPERACIONES DE ESTIMULACIÓN DE POZO PARA EXTENDER LA VIDA ÚTIL DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO. [1]. Universidad Estatal Península de Santa Elena: La apuesta, en el agro y en ciencias del mar. En: LIDERES. Quito, Ecuador. Jul 8.

⁴⁸ Reynaud-Morales, A.G. Casales-Díaz, M. Martínez-Gomez, L. Martínez-Villafane, A. González-Rodríguez, J.G. Chacon-Nava J. G. INFLUENCIA DE LA ADICION DE IMIDAZOLINA [IM-NH17] EN EL PROCESO DE CORROSION DEL ACERO API5L-X52. [1]. [Consultado el Feb 17,2018]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/366327478/Eficiencia-de-imidazolina-como-inhibidor-de-corrosion>.

adsorptivas, y además alteran la cinética de corrosión, inhibiendo o fomentando diferentes reacciones electroquímicas.

Los inhibidores base agua pueden precaver la corrosión por amplios periodos de tiempo bajo circunstancias racionales de almacenaje y embarque. Así mismo aplican por medio de la disminución de la vulnerabilidad del metal a la oxidación, y no por medio de la eliminación por completo del agua y el aire. Estos productos tienen la capacidad de neutralizar la alcalinidad o acidez de la superficie, cubren química y/o físicamente la superficie del material y constituyen una barrera que limita la humedad y el oxígeno de la superficie.⁴⁹

El mecanismo de acción de los inhibidores base agua, consiste en modificar las características de la superficie metálica a proteger, reduciendo así su factibilidad al ataque de la corrosión; frecuentemente se encuentran concentrados, por los que hay que diluirlo con agua.

Los inhibidores de corrosión base agua, tienen muy buenas propiedades, las películas que forman estos inhibidores son delgadas, y cuando se secan son transparentes. Los métodos de aplicación para realizar el recubrimiento, incluye la aspersión o inmersión, rara vez requieren remover las películas antes de realizar una operación subsecuente, de ser necesaria la remoción de la película, se la realiza con facilidad mediante el uso de limpiadores. Al ser productos que necesitan ser diluirlos para su aplicabilidad y accesibilidad reducen su costo.⁵⁰ Entre ellos se encuentra:

- Aminas cuaternarias: Las aminas cuaternarias son usadas como inhibidores de corrosión o agentes mojantes del petróleo. Puesto que es una sal de amina catiónica en la cual el átomo de nitrógeno tiene cuatro grupos unidos a ella y lleva una carga positiva.⁵¹
- Metasilicato de sodio (Na_2SiO_3): El metasilicato de sodio se disuelve fácilmente en agua, formando una solución alcalina; además capas de protección, las cuales evitarán la oxidación en tuberías, por esta razón una opción común al buscar compuestos no tóxicos y amigables con el medio ambiente.⁵²

Para la conservación de ductos, la familia de inhibidores más empleada es la de los inhibidores que intervienen por adsorción. Este tipo de productos se adsorben

⁴⁹ Químicos Siamex. Inhibidor de corrosión (Anti-Ox).[1]. [Consultado el Feb 17,2018]. Disponible en: http://www.productosquimicosmexico.com.mx/inhibidor_de_corrosion.aspx.

⁵⁰ ALMAGRO PONCE MIGUEL ALFONSO and PILAY DE LA A CARLOS ALBERTO. Op.

⁵¹ OILFIELD GLOSSARY. Amina cuaternaria. [1]. [Consultado el Feb 17, 2018]. Disponible en: http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/q/quaternary_amine.aspx.

⁵². Pochteca. Metasilicato de soldio anhidro y metasilicato de sodio pentahidratado. [1]. [Consultado el Feb 17,2018]. Disponible en: <https://www.pochteca.com.mx/metasilicato-de-sodio-anhidro-y-metasilicato-de-sodio-pentahidratado/>

sobre la superficie del metal conformando películas delgadas que se producen por la adherencia física/química entre el compuesto y la superficie. Su escala de protección depende de su concentración, al igual que de la fuerza de cohesión entre el material y el compuesto. Este producto es apropiado para la protección de superficies metálicas en actividades de producción, como aditivo anticorrosivo y accede a ser usado en ensayos hidrostáticos.⁵³

Al ser de carácter orgánico, son compuestos del grupo de los ácidos carboxílicos, que, al ser combinadas con sales orgánicas, inhiben la migración iónica, imposibilitando que se desplace hacia el metal más débil, de esta manera retarda efectivamente la corrosión. Su objetivo es proteger al metal por la formación de una película hidrofóbica sobre él, este tipo de inhibidores trabajan a elevadas temperaturas.

Los inhibidores orgánicos están hechos comúnmente de piridinas, sulfuros, aminas y sales de aminas; consisten en moléculas carboxílicas de naturaleza polar, son atraídos hacia las zonas donde son creados los pares galvánicos de la corrosión; solamente interaccionan con las áreas positivas o anódicas, donde quedan adheridas, como resultado de esta acción puntual, son conocidas como moléculas selectivas.

La efectividad de los inhibidores orgánicos depende de la composición química, estructura molecular, afinidad por la superficie metálica, adsorción (presión y temperatura).⁵⁴

Una nueva generación de inhibidores de corrosión orgánicos base agua, suministra una alternativa; los productos tienen mínima toxicidad para el ser humano y el medio ambiente; ya que son poco tóxicos a los mamíferos, o a los invertebrados; no inhiben el desarrollo bacteriano, lo cual es de gran relevancia para el procedimiento del suelo o de aguas; no son volátiles; no se depositan en el ambiente; y no son mutágenos o cancerígenos.⁵⁵

⁵³ NIETO GARZA, MARIO. PEMEX. PROTECCION INTERIOR DE DUCTOS CON INHIBIDORES. Mexico D.F. 2000. 10-11 p.

⁵⁴ ALMAGRO PONCE, MIGUEL ALFONSO y PILAY DE LA A, CARLOS ALBERTO. UTILIZACIÓN DE INHIBIDORES ORGÁNICOS EN OPERACIONES DE ESTIMULACIÓN DE POZO PARA EXTENDER LA VIDA ÚTIL DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO. 2014, Ecuador. FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓ LEO. UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA. [1]:

⁵⁵ Dr. Adalbert Braig, et al. INHIBIDORES DE CORROSIÓN ORGÁNICOS PARA RECUBRIMIENTOS: AYUDANDO A LA INDUSTRIA A CUBRIR LAS REGULACIONES AMBIENTALES Y LABORALES DEL FUTURO. [1]:

1.2.7 Métodos de selección nivel laboratorio para inhibidores de corrosión.

- **Método de pérdida de peso.** El método de pérdida de peso consiste en la relación y exhibición de una muestra del metal de la estructura seleccionada, también llamado cupón y el medio corrosivo, por un rango determinado de tiempo. El resultado alcanzado posterior a la exposición en el medio corrosivo es cotejado con los datos obtenidos antes de ejecutado el método, y es declarado como tasa de corrosión. Por esta razón se considera como el procedimiento más sencillo en cuanto a ejecución y análisis de resultados.

Son varias las ventajas que se aprecian con el método de pérdida de peso, entre ellas se encuentran:

- Ajustable a todos los medios (líquido, sólido y gaseoso).
- Análisis factible a depósitos de incrustaciones.
- Fácil inspección visual.
- Asequible cálculo de la tasa de corrosión.
- Definición de la eficiencia de los inhibidores.
- Extenso campo de estudio en fenómenos como estrés, ataque galvánico, zonas afectadas por el calor, entre otras.

Se pueden encontrar como desventajas, la falta de capacidad de este método para determinar magnitud y durabilidad, en dado caso que la tasa de corrosión cambie durante el tiempo de exposición; adicionalmente solo una muestra puede ser analizada en cada corrida, lo cual prolonga el tiempo de ejecución del método.⁵⁶
57

- **Resistencia a la polarización lineal.** La resistencia a la polarización lineal es uno de los métodos instantáneos en cuanto al análisis de resultados; este método consiste en la aplicación de un voltaje o potencial de polarización a un electrodo que se encuentra sumergido en una solución. Al ser un método preciso para conocer las pautas de las reacciones de corrosión con respecto al electrodo, es necesario mantener una pequeña corriente que no altere el equilibrio del sistema, pues la corriente aplicada es directamente proporcional a la corrosión en la superficie del electrodo.

⁵⁶ Marroquín Raxón Walter Omar. PROTECCIÓN CATÓDICA PARA PREVENIR LA CORROSIÓN and ELECTROQUÍMICA EN ELEMENTOS METÁLICOS. Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica. [1]:

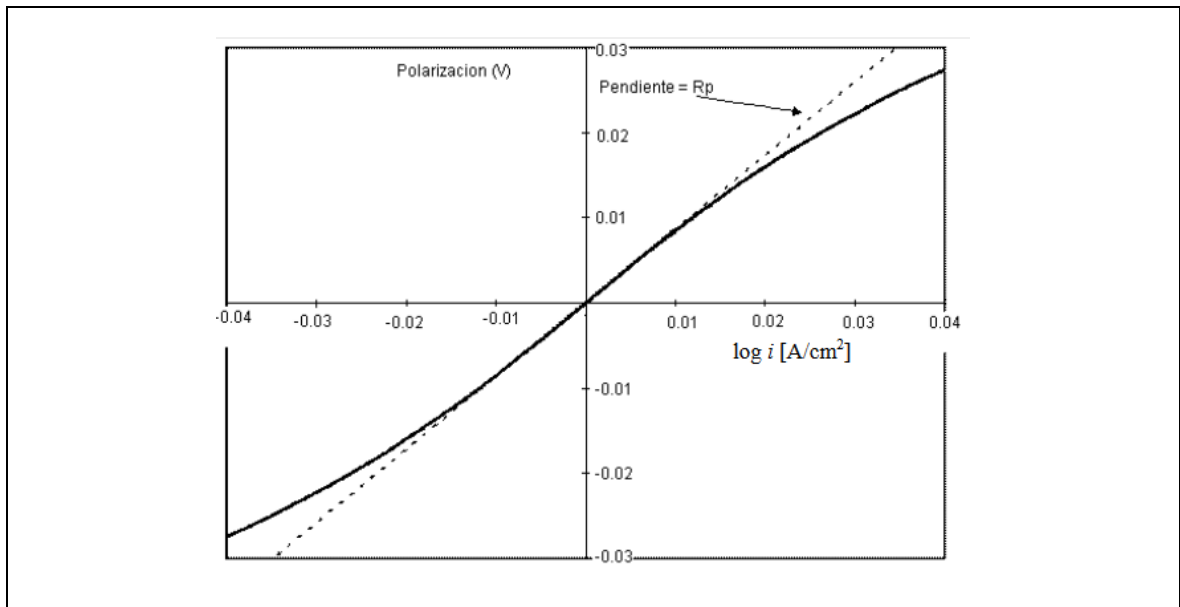
⁵⁷Universidad de las Américas Puebla. Estudio de corrosión de acero al carbón en plantas de endulzamiento de gas natural. CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE PRUEBA Y EVALUACIÓN DE CORROSIÓN. [1]:

- **Extrapolación de Tafel.** En método de resistencia a la polarización lineal se encuentra que la corrosión electroquímica actúa bajo la solución del método de Extrapolación de Tafel, en el cual se aplican curvas de polarización experimentales (estacionario).⁵⁸

Este método se lleva a cabo una vez los electrodos estén sumergidos en el medio de corrosión, donde se procede a suministrar cierta cantidad de corriente, determinando así los valores exactos de las constantes de Tafel (β_a) y (β_c); y realizando una gráfica de potencial en circuito abierto.

Es decir, en el Equipo Electrodo de cilindro giratorio se desarrollan las corridas con el medio corrosivo o caracterización de agua ya establecido, posteriormente el equipo elabora una curva entre los parámetros de potencial contra el logaritmo de la densidad de corrosión (Grafica 1), donde es necesario calcular la pendiente de dicha curva, la cual representa la resistencia a la polarización lineal, con base en esa pendiente el equipo procederá a calcular las constantes de Tafel, realizara el circuito de polarización lineal y la gráfica de la tasa de corrosión con el tiempo.

Gráfica 1 Medición LPR.



Fuente: Chemdrill s.a.s. equipo de corrosión RCE. Operaciones.

Realizando el método matemático de la siguiente manera:

⁵⁸GENESCA, J. TÉCNICA DE EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL O DE INTERSECCIÓN. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS DE CORRIENTE DIRECTA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSION. INGENIERÍA METALÚRGICA.FACULCAD QUÍMICA.UNAM. MÉXICO. [1]:

Teniendo en cuenta la ecuación de Extrapolación de Tafel, es decir, las rectas presentes en el gráfico:

Ecuación 1. Extrapolación de Tafel.

$$\begin{aligned}n &= C \pm \beta * \text{Log } |i| \\ y &= C + Bx\end{aligned}$$

Se calcula la pendiente:

Ecuación 2. Pendiente.

$$\text{Pendiente} = \frac{\Delta E}{\Delta i}$$

Encontrando de esta manera la resistencia a la polarización (Rp):

Ecuación 3. Resistencia a la polarización.

$$Rp = \frac{\Delta E}{\Delta i}$$

Según la ecuación de Stem-Geary:

Ecuación 4. Stem-Geary.

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2,3 (\beta_a + \beta_c)}$$

Relacionando la resistencia a la polarización y la ecuación de Stem-Geary:

Ecuación 5. Relación resistencia a la polarización y la ecuación de Stem-Geary.

$$Rp = \frac{B}{i_{corr}}$$

Teniendo como objetivo relacionar la resistencia a la corrosión, la corriente de corrosión y la velocidad de corrosión, se reemplaza la resistencia a la polarización en la ecuación de Stem-Geary:

Ecuación 6. Densidad de corriente de corrosión.

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{R_{p2,3}(\beta_a + \beta_c)}$$

Dónde:

- i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión.
- R_p es la resistencia a la polarización.
- β_a y β_c son constantes de Tafel para el ánodo y cátodo. Teniendo en cuenta que β_a (ánodo) toma valores entre 0,06V y 0,12V y β_c (cátodo) toma valores a partir de 0,06V.

A partir de estos resultados es posible calcular la velocidad de corrosión.

Ecuación 7. Velocidad de corrosión.

$$V_p = \frac{K_p * WE}{\rho} * i_{corr}$$

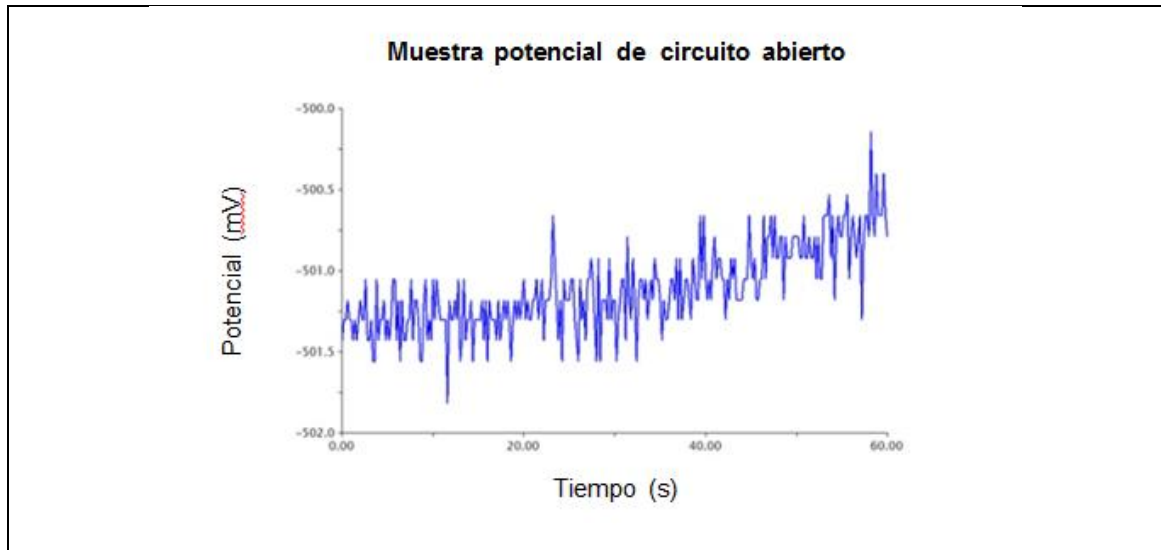
Dónde:

- WE es el peso equivalente del metal.
- ρ es la densidad del metal.
- K_p es una constante.
- i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión.

Encontrando el valor de la velocidad de corrosión, siendo esta la herramienta más importante para la evaluación de la eficiencia de los inhibidores de corrosión en base agua para la empresa CHEMDRILL S.A.S.

El equipo posee un análisis LPR el cual incorpora un análisis OCP y un barrido lineal del potencial de corrosión, el cual mide la diferencia de potencial entre el electrodo de referencia y el electrodo de trabajo (E_{corr}) sin suministrar una corriente externa, encontrando el valor del potencial de corrosión (Grafica 2), y las pendientes de la gráfica de resistencia a la polarización lineal, posteriormente se encuentra el valor de velocidad de corrosión; Además los datos se pueden analizar por medio de la regresión Aftermath definiendo los parámetros de la gráfica de resistencia lineal y posteriormente realizar el cálculo del potencial de corrosión.

Gráfica 2. Muestra circuito abierto potencial (OCP). (Potencial de corrosión [mV] Vs. Tiempo [s]).



Fuente: Chemdrill s.a.s. equipo de corrosión RCE. Operaciones.

Basados en los parámetros definidos y en los datos registrados, la regresión Aftermath arroja resultados como potencial de corrosión, resistencia lineal, densidad de corrosión y tasa de corrosión; tal como se muestra en el cuadro 1:

Cuadro 1. Datos registrados y resultados en Aftermath.

| Datos registrados | Resultados aftermath |
|--|---|
| Datos por defecto | Potencial de corrosión, resistencia lineal. |
| Área del electrodo de trabajo | Potencial de corrosión, resistencia a la polarización normalizada. |
| Densidad y peso equivalente del electrodo de trabajo + ctes de Tafel | Potencial de corrosión, resistencia a la polarización normalizada, densidad de corrosión y tasa de corrosión. |

Fuente: Chemdrill s.a.s. equipo de corrosión RCE. Operaciones.

En el equipo es importante realizar el registro de datos para cada corrida, modificando cada parámetro, o constantes por defecto; esto se desarrolla en una ventana llamada LPR PARAMETERS (0002). (Figura 2).

Figura 2. LPR Parameters (0002)

The screenshot shows the 'LPR Parameters (0002)' software interface. The window title is 'LPR Parameters (0002) Parameters for Linear Polarization Resistance'. The interface includes a toolbar with buttons for 'Audit', 'Perform', 'Create copy', and 'I Feel Lucky'. Below the toolbar are tabs for 'Basic', 'Advanced', 'Ranges', 'Filters', and 'Post Experiment Conditions'. The 'Basic' tab is active, displaying several parameter groups: 'Basic Parameters' with fields for OCP Period (200 s), Initial Potential (-10 mV vs OCP), Final Potential (10 mV vs OCP), and Sweep Rate (200 µV/s); 'Linear Region Detection' with a checked 'Detect Automatically' option and fields for Minimum and Maximum potential; 'Electrode range' with 'Initial Range' set to 'Default' and 'Aurorange' set to 'A' and 'Up'; 'Time Series' with 'LPR Series Iterations' set to 1, 'Time Between Iterations' set to s, 'OCP Mode' set to 'Every Time', and 'Iterations between OCP Measurements' set to an empty field; and 'Corrosion Rate Parameters' with 'Normalize By Area' checked, 'Sample Area' set to 0.2 cm², 'Automatically Find Corrosion Rate' unchecked, 'Sample Density' set to kg/m³, 'Sample Equivalent Weight' set to g, and 'B (Anodic)' and 'B (Cathodic)' both set to V.

Fuente: Chemdrill s.a.s. equipo de corrosión RCE. Operaciones.

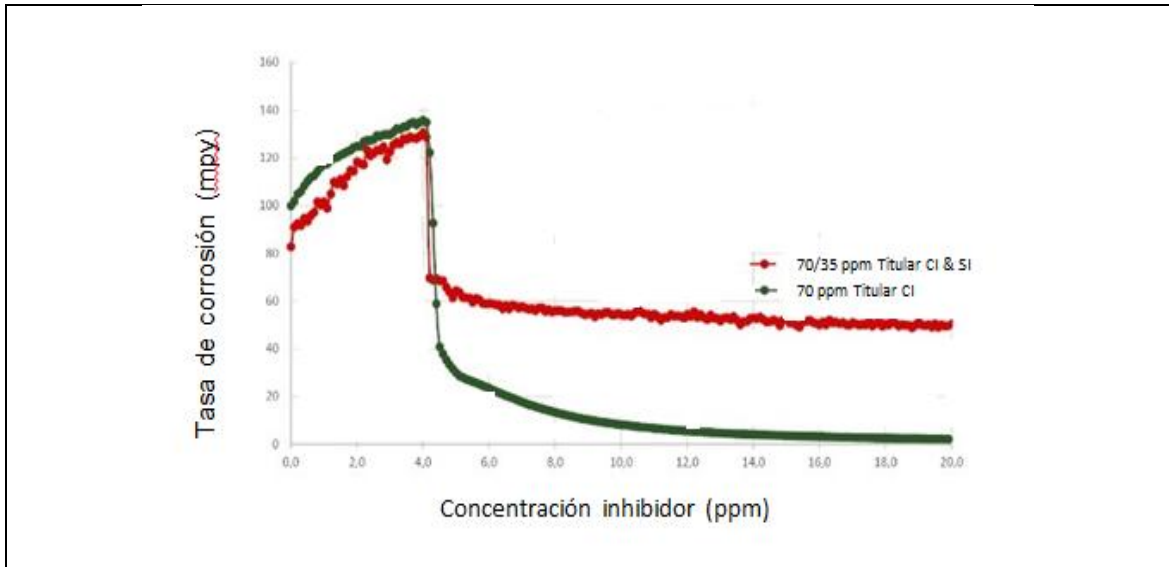
El ingreso de los datos registrados debe realizarse teniendo en cuenta ciertos estándares de típicos de trabajo para el análisis LPR, tales como:

- El período OCP va desde unas decenas de segundos hasta comúnmente cientos de segundos.
- El potencial inicial va desde -10 mV hasta -20 mV.
- El potencial final va desde +10 mV hasta +20 mV.
- La tasa de barrido debe ser lo suficientemente lenta como para omitir cualquier corriente de la resistencia de la solución. Un valor común es de 200 µV/s o menor.
- La detección de la región lineal se ajusta típicamente con la opción “detectar automáticamente”.
- El panel “time series” es utilizado para realizar LPR’s automáticos con el paso del tiempo. Por defecto, el equipo realiza una sola medición LPR.

Al registrar parámetros y realizar las debidas corridas de los inhibidores, se obtiene una gráfica final, en la cual se expone la velocidad de corrosión vs la concentración del inhibidor utilizado (Grafica 3), la cual posteriormente será interpretada con el objetivo de desarrollar e implementar las correspondientes recomendaciones.⁵⁹

⁵⁹ CHEMDRILL S.A.S. EQUIPO DE CORROSIÓN RCE. OPERACIONES.

Gráfica 3. Gráfica Velocidad de corrosión [mpy] Vs. Ppm del inhibidor.



Fuente. Chemdrill s.a.s. equipo de corrosión RCE. Operaciones.

- **Espectroscopia por impedancia electroquímica.** La espectroscopia por impedancia electroquímica (EIS) consiste en el empleo de una señal de corriente alterna e independiente al sistema, sin afectar los fenómenos de materia del sistema, posteriormente se analiza una solución electroquímica emitida por el sistema en respuesta a la perturbación aplicada.

La propiedad de este método radica en la relación existente entre la resistencia, la resistencia del electrolito y la resistencia a la transferencia de electrones, las cuales afectan de manera directa las reacciones electroquímicas de corrosión.

Es importante resaltar el sin número de ventajas presentadas con este método de análisis, entre ellas se encuentran:

- Brinda resultados en cuanto a la caracterización de la superficie del material.
- Ofrece información sobre propiedades específicas del sistema, entre ellas la difusión electrónica, la formación de productos, mecanismos de corrosión y la formación de películas de corrosión.
- Facilita el estudio de la cinética en el desarrollo de los fenómenos de transferencia de masa (difusión) y procesos del electrodo.
- Proporciona información sobre la interfase metal – medio corrosivo.
- Uso de señales de pequeña amplitud, es decir, el uso de un voltaje de +10mV y un rango de frecuencia de 0.01Hz a 10 KHz.

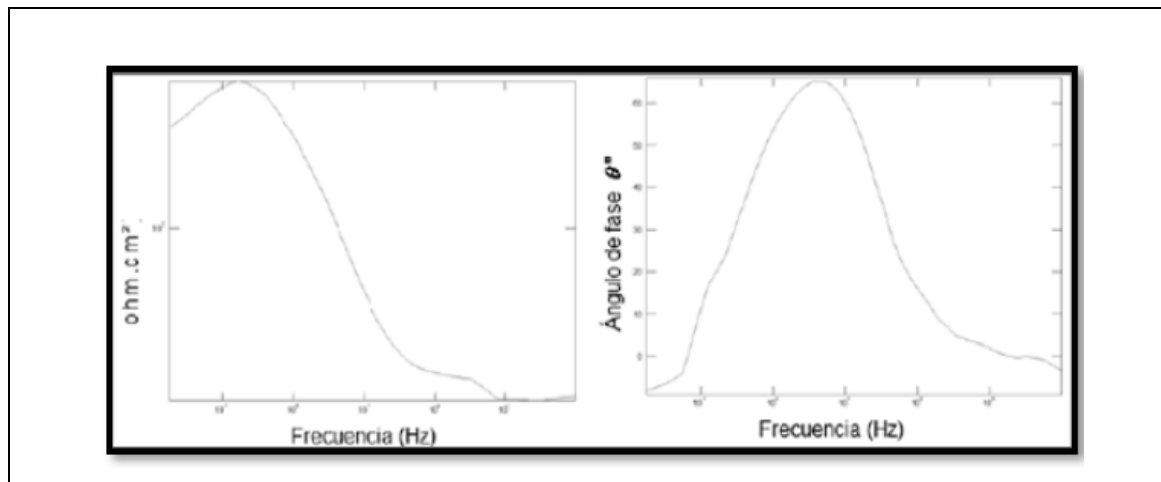
Se presentan dos maneras gráficas para interpretar un sistema lineal:

- Diagrama de Bode.
- Diagrama de Nyquist.⁶⁰
- **Diagrama de Nyquist.** La impedancia electroquímica es una medida de resistencia que presenta un circuito a una corriente, la cual complementa información sobre magnitud y fase del proceso. La impedancia de un circuito puede depender de la frecuencia (f) de una señal usada, dada en Hertz siendo el número de ciclos por segundo (s^{-1}).

La corriente implica tener en cuenta la ley de ohm, ya que relaciona el voltaje y la corriente.

- **Diagrama de Bode.** Los diagramas de Bode consisten en la ilustración los parámetros de la impedancia contra la frecuencia; es decir, se presenta en diferentes maneras de comportamiento. El diagrama más usual es el diagrama de $\log|Z|$ y ángulo de fase versus $\log f$. Tal como se muestra en la Gráfica 4.

Gráfica 4. Diagrama de Bode $|Z|$ y diagrama de ángulo de fase para circuitos. (Circuito de Randles).



Fuente: García Inzunza, Ramses. Inhibidores de corrosión de acero en medios ácidos a partir de extractos naturales. Instituto de ingeniería and maestría y doctorado en ciencias e ingeniería. Universidad autónoma de baja california.

⁶⁰ GARCIA INZUNZA, RAMSES. INHIBIDORES DE CORROSIÓN DE ACERO EN MEDIOS ÁCIDOS A PARTIR DE EXTRACTOS NATURALES. INSTITUTO DE INGENIERÍA and MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA. [1]:

Son varias las ventajas que se aprecian en los diagramas de Bode, entre ellas se encuentran:

- Incorpora toda la información adquirida desde las frecuencias registradas.
- Representan el cambio de la impedancia real contra la frecuencia en escala log-log.
- La presencia de resistencias en el circuito ocasiona mesetas horizontales, los capacitores entregan pendientes negativas y los inductores exponen pendientes positivas.
- Posibilita la apreciación del cambio en la impedancia en función de la frecuencia.⁶¹

En el sector petrolero es usual el uso de métodos como empuje hidráulico y levantamiento artificial, estas operaciones de extracción adicionadas a las operaciones de perforación son actividades que implican el uso de bombas, taladros, entre otros; estas herramientas aumentan las condiciones físicas del pozo, es decir, temperatura, velocidad, acidez del medio. Factores que influyen en el fenómeno de la corrosión y aumentan su acción de manera directa; por esta razón, la empresa CHEMDRILL S.A.S amplía su portafolio de productos hacia los inhibidores de corrosión base agua siendo esta la mejor opción en cuanto a eficiencia y ecología, con el objetivo de mitigar el daño en las diferentes formaciones y herramientas aplicadas al sector petrolero.

⁶¹ Garcia Inzunza, Ramses.Op.p. 44-49.

2. EVALUACIÓN EN LABORATORIO PARA SELECCIÓN DE INHIBIDORES DE CORROSION BASE AGUA

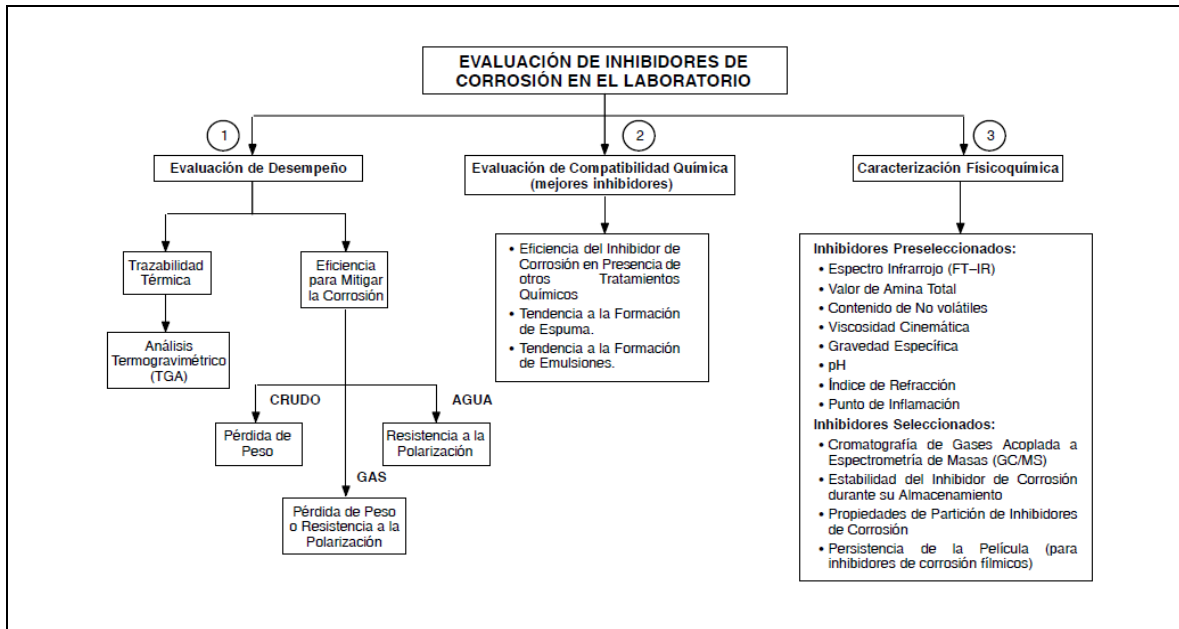
La evaluación de los inhibidores de corrosión en laboratorio consta de tres fases:

- **Evaluación de desempeño**, el cual consta de una trazabilidad térmica que se realiza por medio de un análisis termo gravimétrico (TAG), de igual manera se realiza la eficiencia para mitigar la corrosión a través de pruebas de pérdida de peso y resistencia a la polarización para elementos como el crudo.
- **Evaluación la compatibilidad química a los mejores inhibidores**, a través de pruebas como la eficiencia del inhibidor de corrosión frente a la aplicación de otros tratamientos químicos, propensión a la formación de espuma y emulsiones; con el fin de especificar algún tipo de influencia en la eficiencia del inhibidor o alguna reacción adversa.
- **Caracterización fisicoquímica** a inhibidores de preselección con ayuda de técnicas como el espectro infrarrojo (FT-IR), valor de amina total, contenido de no volátiles, viscosidad cinemática, gravedad específica, pH, índice de refracción y punto de inflamación; con el propósito de seguir un control de calidad de los inhibidores a lo largo de su evaluación en campo. De igual forma se realiza a inhibidores seleccionados mediante pruebas de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS), estabilidad del inhibidor de corrosión durante su almacenamiento, propiedades de partición de inhibidores de corrosión y persistencia de la película para inhibidores de corrosión tipo fílmico.

Para proceder a la admisión de la muestra de los inhibidores en el laboratorio, éstos deben estar correctamente identificados, indicando el tipo de producto, código que le identifica, los datos de quien lo provee; adicionalmente es indispensable el uso de la hoja técnica del producto, la hoja de datos de seguridad de materiales (MSDS) y el certificado de calidad.

En la Figura 3 se observa un esquema general de la evaluación en laboratorio de los inhibidores de corrosión. En donde se muestran las pruebas de interés a realizar con el objetivo de cumplir cada parámetro, las cuales en conjunto concluyen con éxito la evaluación de inhibidores de corrosión.

Figura 3. Esquema general de la evaluación en laboratorio de los inhibidores de corrosión.



Fuente: Naar, lucia. Tovar, Luis. Ipdvsa. Evaluación en laboratorio y campo para seleccionar técnicamente los inhibidores de corrosión.

2.1 EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

Se realiza una evaluación de desempeño de inhibidores de corrosión base agua por medio de una prueba de estabilidad térmica, con el objetivo de efectuar una preselección de los productos en estudio.

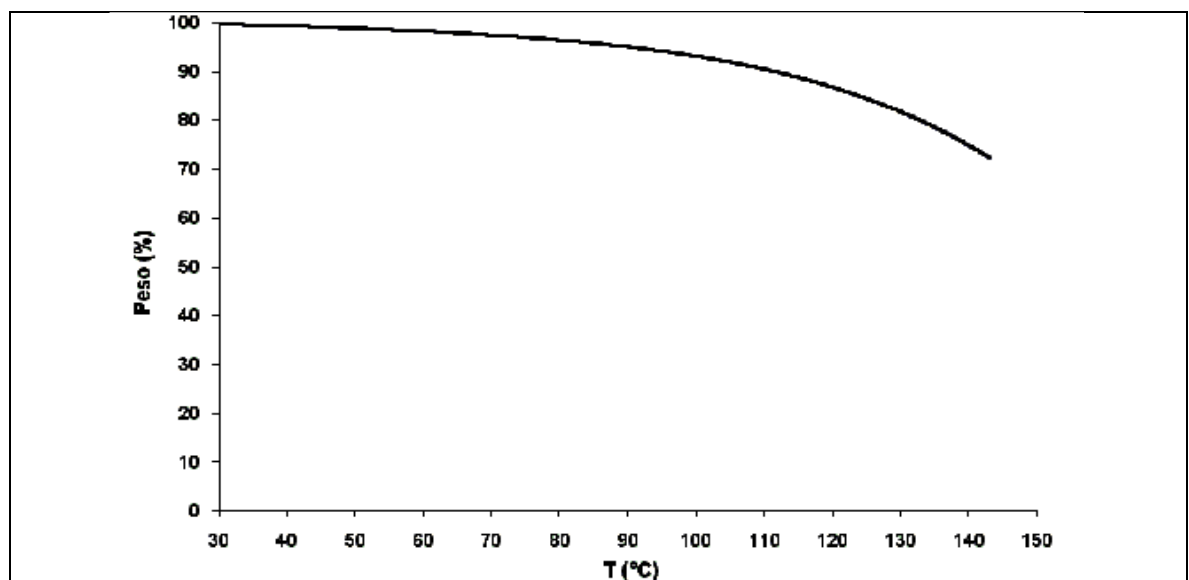
2.1.1 Estabilidad térmica. Esta característica se determina en el laboratorio por medio de un análisis termo gravimétrico (ATG), la cual es una técnica en la que la masa de la muestra es medida en función de la temperatura (experimento dinámico) o el tiempo (experimento isotérmico). La prueba se realiza usando un analizador que permite inspeccionar algún cambio de manera prolongada y bajo atmosfera de nitrógeno.

En el experimento dinámico, la temperatura se incrementa de forma supervisada hasta una temperatura de 50°C superior a la temperatura de operación, siendo esta temperatura dependiente del proceso ejecutado. Usualmente, para una muestra de 10 mg se usa una velocidad de calentamiento de 10°C/minuto. La conclusión de este experimento es una curva de descomposición térmica tal como se aprecia en la Gráfica 5, el cual, es un gráfico en el que se representa el porcentaje de la masa perdida de la muestra en el rango de temperatura determinado, donde se observa una disminución del porcentaje de masa a medida que aumenta la temperatura,

mostrando su punto máximo en la temperatura de 140°C y un porcentaje de peso de 74% aproximadamente.

En cambio, en el experimento isotérmico, la temperatura se encuentra de manera constante durante el tiempo de análisis instaurado según las condiciones de operación del proceso en el cual se desea aplicar el inhibidor, en la Gráfica 6 se muestra un ejemplo de este tipo de curva de descomposición térmica, donde se aprecia una ligera disminución de peso, puesto que el porcentaje de peso llega alrededor de 87% durante un lapso de 143 minutos, expuesto a una temperatura de 65°C.⁶²

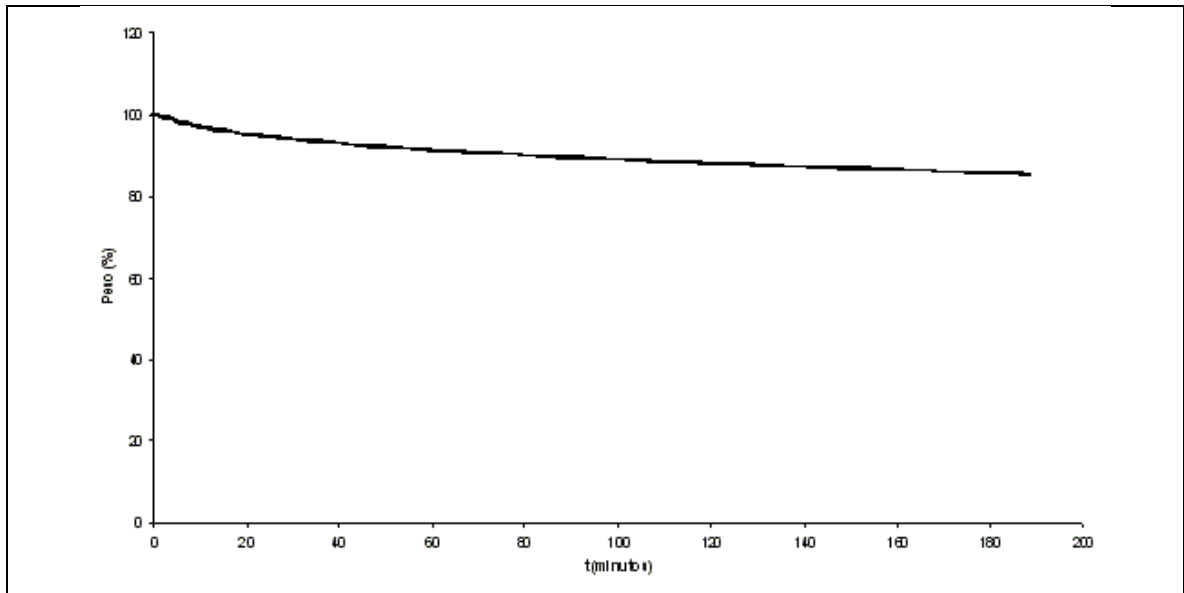
Gráfica 5. Curva de descomposición térmica dinámico obtenido durante el análisis de un inhibidor de corrosión, a velocidad de calentamiento de 10 °C/min y bajo atmósfera inerte de N₂.



Fuente: Naar, Lucia. Tovar, Luis. Ipdvsa. Evaluación en laboratorio y campo para seleccionar técnicamente los inhibidores de corrosión.

⁶² Naar, Lucia. Tovar, Luis. Ipdvsa. Evaluación en laboratorio y campo para seleccionar técnicamente los inhibidores de corrosión.

Gráfica 6. Curva de descomposición térmica isotérmico obtenido para un inhibidor de corrosión, evaluado a 65 °C bajo atmósfera inerte de N₂.



Fuente: Naar, Lucia. Tovar, Luis. Ipdvsa. Evaluación en laboratorio y campo para seleccionar técnicamente los inhibidores de corrosión.

2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Por lo anterior este proyecto realiza un experimento isotérmico, en el cual se evalúan 12 inhibidores de corrosión en base agua (C178, C304, C367, C524, C525, C527, C750, C754, C756, C907, C909, IC 5480) siendo estos todos los productos de esta línea manejados por la empresa CHEMDRILL S.A.S.

La temperatura de operación en el pozo es 140°C; sin embargo, al ser un ensayo isotérmico en el cual existe una pérdida de temperatura por el medio ambiente, es necesario aumentar la temperatura de experimentación 50°C, con respecto a su temperatura de producción, por ende, se dispone la el termo agitador a una temperatura de 190 °C; esto sin asegurar que la temperatura de la experimentación sea cercana a 190 °C.

Por otra parte, se utilizan concentraciones al 100% de cada inhibidor, con el objetivo de evaluar las bases de cada uno. Por medio de varios ensayos con intervalos de tiempos amplios se logró determinar que después de 10 minutos de prueba el remanente de peso se estabiliza; instaurando entre 0 y 10 minutos un rango clave para evidenciar el comportamiento del inhibidor de corrosión en base agua.

2.2.1 Materiales y métodos. Para esta operación se hace uso de una balanza analítica, en primera instancia es fundamental conocer el peso de los vidrios de reloj en su estado inicial y de manera independiente, los cuales serán empleados en cada prueba ejecutada (Imagen 1). En seguida se suministra en estado líquido la muestra de cada inhibidor con concentraciones al 100% en los vidrios de reloj y nuevamente se registra el peso en gramos (Imagen 1).

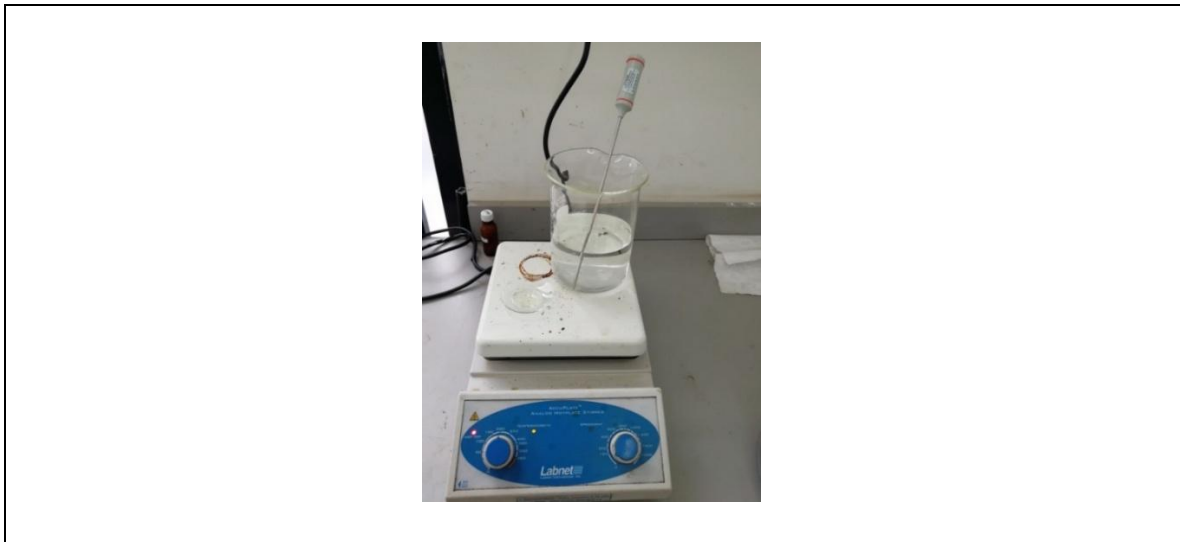
Imagen 1. *Pesaje del vidrio de reloj.*



Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se dispone de un termo agitador, el cual trabaja a una temperatura de 190 °C; y se instaura al equipo un Beaker PYREX de 800 ml con una cierta cantidad de agua irrelevante en el ensayo y un termómetro digital, puesto que se desea corroborar la temperatura que sugiere el termo agitador con la temperatura a la que se está desarrollando la prueba. Después de manera individual, se adjuntan al termo agitador los vidrios de reloj anteriormente pesados con las muestras de los 12 inhibidores en estudio, modificando el tiempo de manera secuencial entre un rango de 0 a 10 minutos (Imagen 2).






Imagen 2. Prueba de estabilidad térmica.



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, al transcurrir el tiempo establecido, el vidrio de reloj son retirados del termo agitador y son pesados nuevamente, con el propósito de determinar el porcentaje de pérdida de peso y seleccionar los productos que presenten el mejor comportamiento hacia la prueba de estabilidad térmica, esta práctica se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 4. Teniendo en cuenta las indicaciones presentadas en el Cuadro

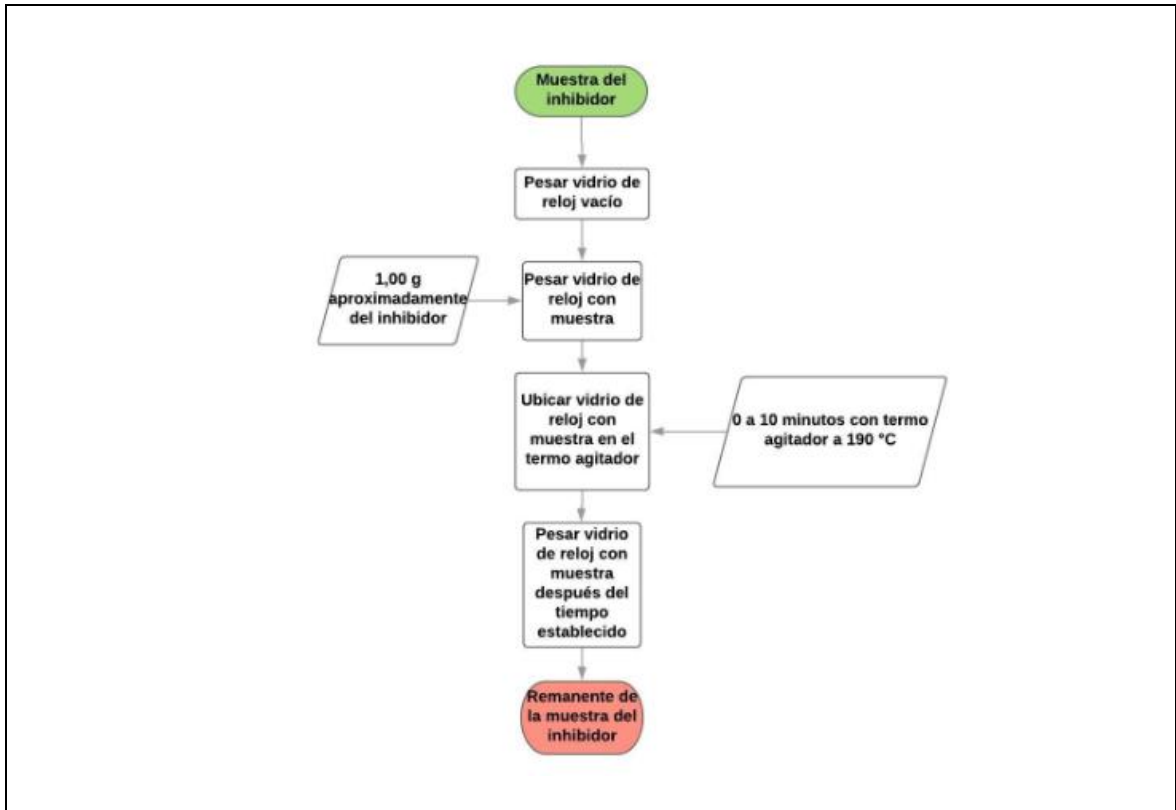
Cuadro 2. Símbolos básicos de diagrama de flujo.

| Símbolo | Nombre | Función |
|---|------------------|--|
|  | Inicio / Final | Representa el inicio y el final de un proceso |
|  | Línea de Flujo | Indica el orden de la ejecución de las operaciones. La flecha indica la siguiente instrucción. |
|  | Entrada / Salida | Representa la lectura de datos en la entrada y la impresión de datos en la salida |
|  | Proceso | Representa cualquier tipo de operación |
|  | Decisión | Nos permite analizar una situación, con base en los valores verdadero y falso |

Fuente: Smartdraw, [En línea] <https://www.smartdraw.com/flowchart/flowchart-symbols.htm>.⁶³

⁶³ Smartdraw, [1]. [Consultado el Mar 30,2018]. Disponible en: <https://www.smartdraw.com/flowchart/flowchart-symbols.htm>

Figura 4. Diagrama de flujo prueba de estabilidad térmica.



Fuente: elaboración propia.

2.2.2 Resultados y análisis. La prueba de estabilidad térmica tiene el propósito de facilitar la selección de los mejores productos a una condición de temperatura similar a la trabajada en campo, ya que evalúa las propiedades fisicoquímicas de cada producto y establece el mejor comportamiento en temperaturas elevadas. En la Tabla 1, se puede evidenciar los diferentes resultados en cuanto a porcentaje de peso perdido con una temperatura de 190 °C del termo agitador más no de la muestra, concentraciones del 100% y tiempo variable en minutos.

Tabla 1. Resultados de la prueba de estabilidad térmica.

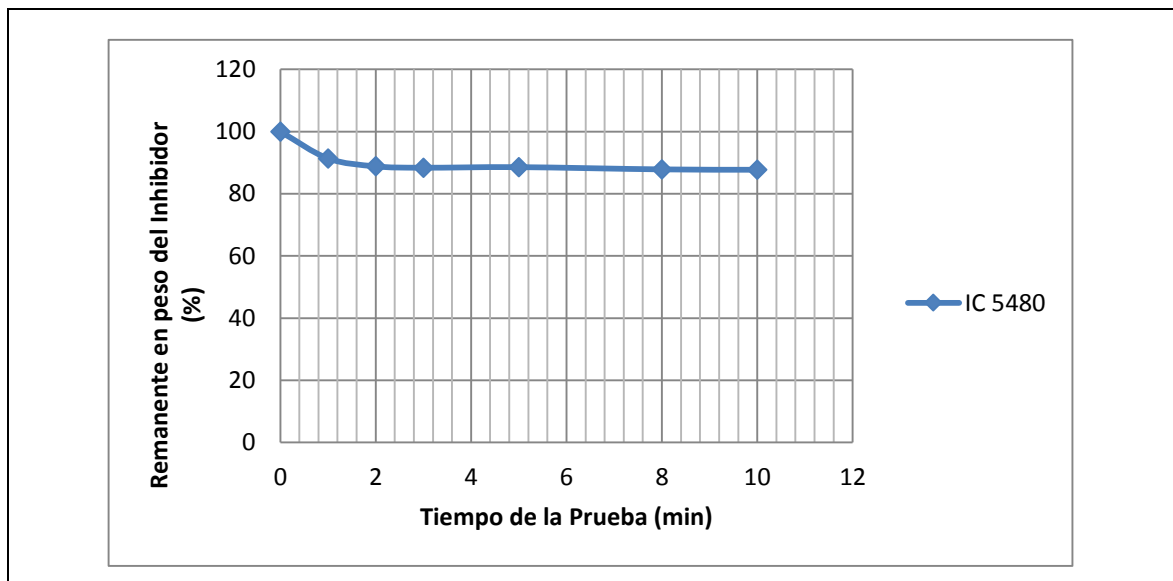
| Producto | Concentración (%) | T del termo agitador (°C) | Tiempo máximo de prueba (min) | Peso vidrio seco (g) | Peso vidrio + muestra (g) | Peso vidrio + muestra t _{prueba} (g) | Peso muestra (g) | Pérdida de peso t _{prueba} (%) |
|----------|-------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------|---|------------------|---|
| C 178 | 100 | 190 | 10 | 12,5386 | 13,8413 | 13,0827 | 1,3027 | 58,2 |
| C 304 | 100 | 190 | 10 | 12,5381 | 13,7605 | 12,7747 | 1,2224 | 80,6 |
| C 367 | 100 | 190 | 10 | 12,538 | 13,9122 | 12,788 | 1,3742 | 81,8 |
| C 524 | 100 | 190 | 10 | 12,5381 | 13,6667 | 13,2061 | 1,1286 | 40,8 |
| C 525 | 100 | 190 | 10 | 12,5375 | 13,6007 | 13,0108 | 1,0632 | 55,5 |
| C 527 | 100 | 190 | 10 | 12,5535 | 13,6187 | 13,0976 | 1,0652 | 48,9 |
| C 750 | 100 | 190 | 10 | 12,5374 | 13,7323 | 13,248 | 1,1949 | 40,5 |
| C 754 | 100 | 190 | 10 | 12,5531 | 13,6852 | 13,414 | 1,1321 | 24,0 |
| C 756 | 100 | 190 | 10 | 12,5376 | 13,6024 | 13,1175 | 1,0648 | 45,5 |
| C 907 | 100 | 190 | 10 | 12,5386 | 13,6898 | 13,4921 | 1,1512 | 17,2 |
| C 909 | 100 | 190 | 10 | 12,5384 | 13,5937 | 13,3485 | 1,0553 | 23,2 |
| IC 5480 | 100 | 190 | 10 | 13,51 | 14,5102 | 14,3874 | 1,0022 | 12,3 |

Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en la Tabla 1 se presenta una gran dispersión de datos en cuanto al porcentaje de masa perdido, aunque los inhibidores de corrosión se encuentran a las mismas condiciones de operación es factible que la diferencia en el registro sea atribuido a las familias químicas presentes en cada inhibidor de corrosión en base agua; a pesar de ello, se seleccionan los dos mejores inhibidores de corrosión (C 907 y IC 5480), puesto que fueron los dos inhibidores que presentaron una pérdida de masa mínima con respecto a los demás, es decir, presentan un alto valor de remanente en peso de producto; teniendo en cuenta las mismas condiciones de tiempo y temperatura.

Tal como se puede demostrar en la Gráfica 7 con respecto al inhibidor IC 5480.

Gráfica 7. *Remanente en peso del inhibidor de corrosión IC 5480 puro.*

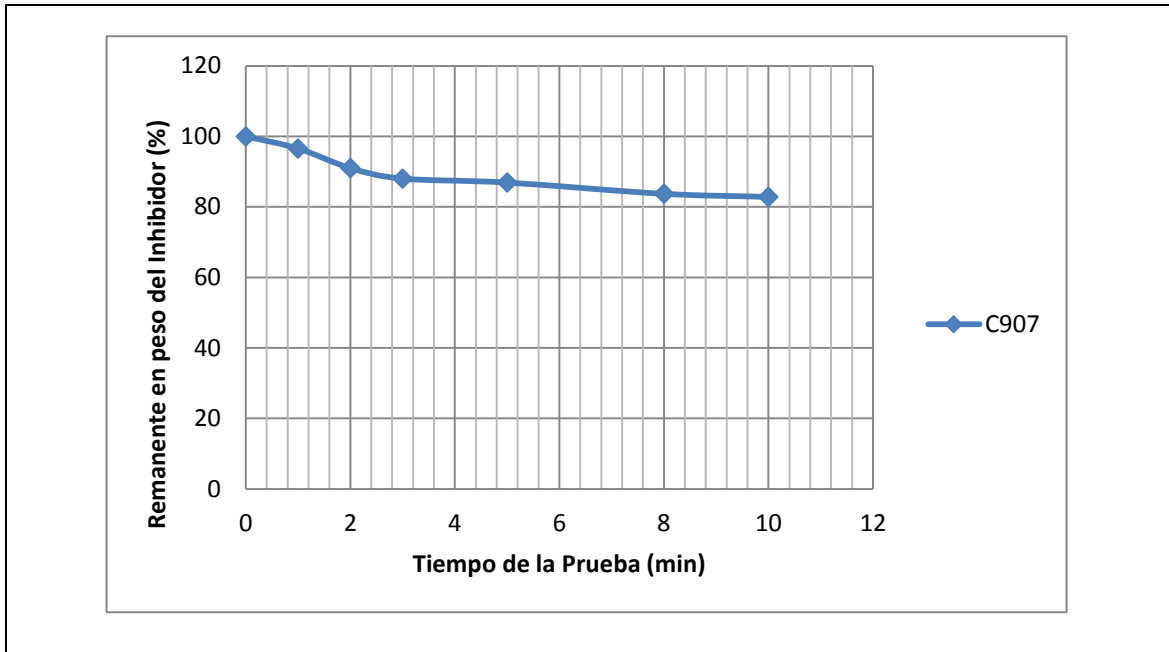


Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 7 se puede apreciar una pérdida de peso insignificante en el transcurso del tiempo, pues en un tiempo de 3 minutos se obtuvo un remanente en peso del 88,4%, seguido de un tiempo de 5 minutos en donde alcanza un remanente de peso del 88,6%, y finalmente se observa un remanente de 87,7 % en un tiempo máximo de 10 minutos tomando como punto de partida un tiempo de 0 minutos y un remante en peso del 100%.

Por otra parte, en la gráfica 8 se logra observar el comportamiento del inhibidor C 907.

Gráfica 8. Remanente en peso de inhibidor de corrosión C 907 puro.



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 8 se puede apreciar una pérdida de peso mínima con el paso del tiempo, dado que en un tiempo de 3 minutos se adquiere un remanente de peso del 88%, después en un tiempo de 5 minutos se alcanza un remanente de peso del 86,9%, finalmente se estima un remanente 82,8% en un tiempo máximo de 10 minutos, tomando como punto de partida un tiempo de 0 minutos y un remante en peso del 100%.

De esta manera se realiza la selección de inhibidores de corrosión en base agua, teniendo como objetivo las opciones para trabajar en campo, puesto que gracias a esta elección se establecerán los productos con mejor eficiencia basándose en la relación entre la pérdida de peso del producto y tiempo de protección.

3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACION DE EFICIENCIA DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN EN AGUA

En los pozos petroleros el agua de formación se presenta en grandes cantidades, además es importante aclarar que el agua de cada pozo es distinta en cuanto a las sustancias disueltas en ella, debido a lo anterior se pueden presentar distintos tipos de aguas de formación tales como aguas corrosivas, es decir, con inclinación a degradar metales y por otra parte se encuentra el agua incrustante, en este caso se forman precipitados insolubles que se asocian a las paredes internas de la instalación.

Las aguas incrustantes originan precipitados que se asocian a las paredes de las tuberías con el efecto de que terminen limitando el paso de fluidos. La alta concentración de sales de calcio, selenio o magnesio y la temperatura de operación del agua en la formación, son importantes al considerar problemas en el interior de equipos. Además, el pH en estas aguas es alcalino, es decir, sobre 7 debido a la alta concentración de sales; por otra parte, la dureza al ser una medida de la concentración de calcio y magnesio disuelto en el agua señala que, a mayor dureza, mayor incrustación; adicionalmente la alcalinidad total es una medida de la concentración de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos en el agua, lo que indica que a mayor alcalinidad mayor tendencia incrustante.⁶⁴

Por el contrario, las aguas corrosivas tienden a la degradación del metal generando inconvenientes como la fractura de metales en las instalaciones por picaduras, o erosión. Así mismo el pH en estas aguas es ácido, es decir, menor a 7; igualmente entre menor sea la dureza y alcalinidad, mayor será el comportamiento corrosivo.

Con base en lo anterior es trascendental reconocer el tipo de agua que se maneja en cada campo petrolero, una herramienta esencial para dicha identificación es el índice de Langelier, el cual hace referencia a la indicación del grado de saturación del carbonato de calcio en el agua, el cual es soportado en la alcalinidad, el pH y la dureza.

El índice de Langelier es utilizado para diagnosticar si se dispone de un agua de carácter corrosivo o incrustante y en qué grado se encuentra; esta valoración se lleva a cabo por medio de un rango entre -0.5 y 0.5, donde cifras positivas y superiores a 0.5 señalan presencia de agua incrustante, es decir, el carbonato de calcio tiende a precipitar y conformar placas calcáreas. Si la cifra es negativa e inferior a -0.5 apunta que el agua es de carácter corrosivo; una vez identificada se

⁶⁴ Carbotecnia. El Agua de su casa o empresa puede ser Corrosiva o Incrustante. [1]. -03-14T11:17:11-05:00. [Consultado el Aug 14,2018]. Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/agua-casa-empresa-puede-corrosiva-incrustante/>

procede a adecuar un tratamiento químico y mantenimiento de instalaciones correcto.⁶⁵

Para medios prácticos de este proyecto, se enfoca en el uso de agua de formación corrosiva.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE AGUA

La corrosión se encuentra estrechamente relacionada con el medio de exposición, puesto que la acidez del medio influye de manera directa en el fenómeno, por esta razón es importante exponer en este proyecto una caracterización del agua de formación usada como base en la experimentación, dicha agua de formación es de tipo sintético, es decir, es reproducida a nivel laboratorio, sin ser extraída del pozo en estudio. Se reproduce siguiendo la norma ASTM D1141-98 del 2013, además se encuentra basada en un estudio químico entregado por la empresa CHEMDRILL S.A.S. referente a un pozo petrolero ubicado en los Llanos Orientales de Colombia; en la Tabla 2 se observan las cantidades en gramos de cada compuesto necesario para elaborar el agua de formación.

Tabla 2. Caracterización de agua de formación.

| Parámetro | Unidades | Masa (mg) por corrida | Masa (mg) 10 corridas |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| DIOXIDO DE CARBONO | mg/L | 8 | 0,08 |
| ACIDO SULFHIDRICO | mg/L H ₂ S | 1 | 0,01 |
| BICARBONATOS DE SODIO | mg/L CaCO ₃ | 250 | 2,5 |
| CARBONATOS | mg/L CaCO ₃ | 2 | 0,02 |
| CLORURO DE SODIO | mg/L Cl- | 3000 | 30 |
| BARIO | mg/L | 5,32 | 0,0532 |
| CALCIO | mg/L | 429 | 4,29 |
| ESTRONCIO | mg/L | 58,1 | 0,581 |
| HIERRO | mg/L | 2,62 | 0,0262 |
| MAGNESIO | mg/L | 72,3 | 0,723 |
| POTASIO | mg/L | 124 | 1,24 |
| SODIO | mg/L | 1490 | 14,9 |
| SILICE | mg/L | 6,73 | 0,0673 |
| HIDROXIDO DE SODIO | mg/L | 2 | 0,02 |

⁶⁵ LabTec. Aguas corrosivas o incrustantes. Índice de Langelier [1]. [Consultado el Jul 15,2018]. Disponible en: <https://www.labotec.es/aguas-corrosivas-o-incrustantes-indice-de-langelier>.

Tabla 2. (Continuación).

| Parámetro | Unidades | Masa (mg) por corrida | Masa (mg) 10 corridas |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| FENOL | mg/L | 8,04 | 0,1206 |
| SULFATO DE CALCIO DIHIDRATADO | mg/L SO ₄ -2 | 8,15 | 0,0815 |

Fuente: elaboración propia.

Es necesario aclarar que el agua utilizada en este proyecto no contiene todos los componentes sugeridos en la Tabla 2, al presentarse problemas de disponibilidad; por esta razón, se realiza el debido pesaje de las cantidades de cada compuesto como carbonato de sodio, sulfato de potasio, sulfato de sodio, carbonato de calcio, soda cáustica y cloruro de sodio, siendo este último un componente de gran importancia al presentar cantidades superiores con respecto a los demás compuestos; dichos químicos suministrados por la empresa CHEMDRILL S.A.S. (Imagen 3).

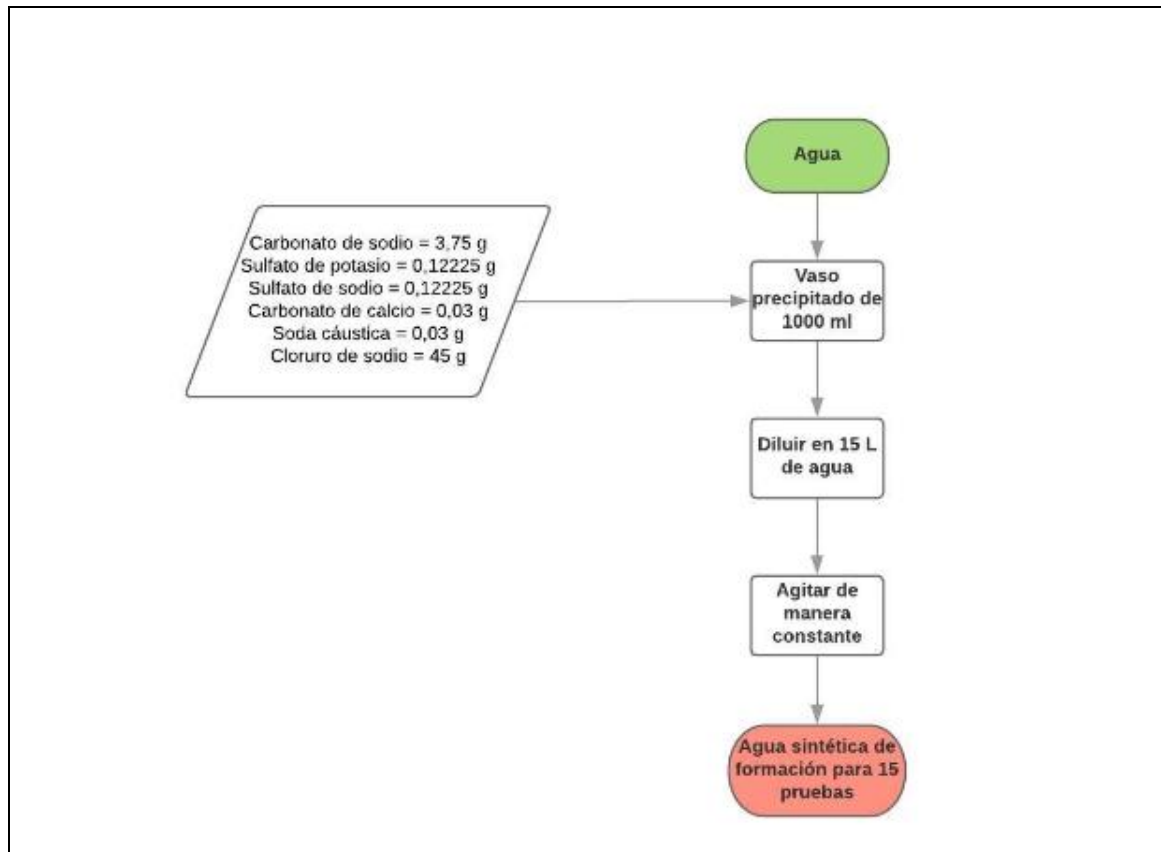
Imagen 3. *Pesaje de componentes.*



Fuente: elaboración propia.

Posteriormente el agua es preparada en un recipiente con agitación constante con el objetivo de lograr la homogenización del sistema, este procedimiento se observa en el diagrama de flujo de la Figura 5.

Figura 5. Diagrama de flujo preparación del agua sintética en laboratorio.



Fuente: elaboración propia.

3.2 CUPONES

Los cupones son instrumentos fabricados para suministrar valores cuantitativos de la velocidad de corrosión, y así mismo es prueba física del tipo de corrosión que ocurre en el medio de exposición. Los cupones seleccionados deben tener un tamaño igual, forma, área de superficie y acabado de la superficie; además deben corresponder a una aleación que sea semejante a la composición del metal del equipo de interés.

En este proyecto se hará uso de cupones PINE research Instrumentation, son fabricados en acero al carbón 1020 con una composición química en porcentaje de C (0,18 a 0,23%), Mn (0,3 a 0,6%), P max (0,04%), S max (0,05%) y Si max (0,15 a 0,3%)⁶⁶, poseen forma cilíndrica hueca, y un área superficial de 3 cm² en su estado inicial (Imagen 13); este tipo de instrumentos provee datos reproducibles, y en virtud

⁶⁶ Cía. General de Aceros S.A. Aceros ingeniería al carbono. SAE 1020 Y SAE 1045. [1]:

de ello son utilizados en pruebas de pérdida de peso y resistencia de polarización lineal.⁶⁷

Imagen 4. *Cupones de corrosión acero al carbón 1020.*

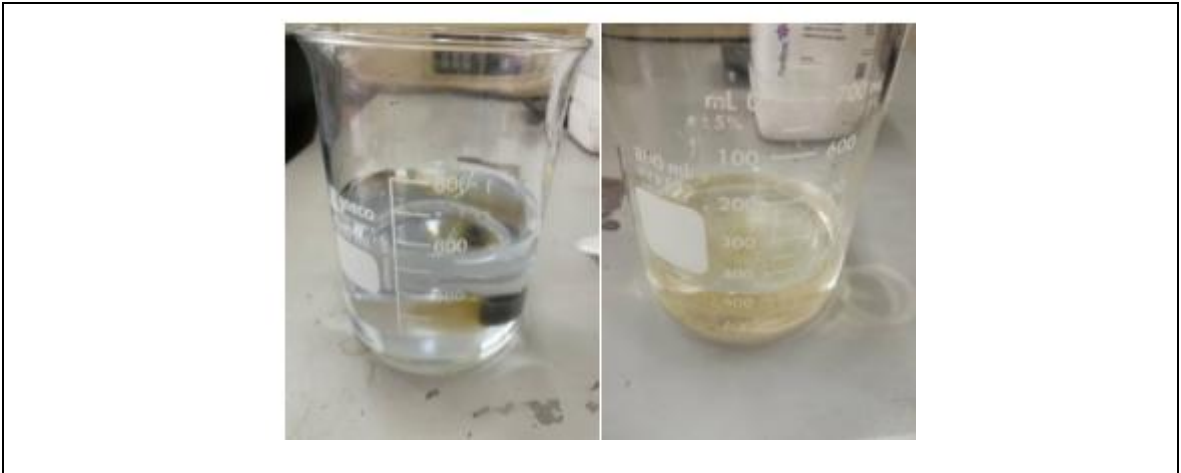


Fuente: elaboración propia.

3.2.1 Limpieza de cupones. En esta experimentación es vital el uso de cupones de corrosión en cada corrida de la experimentación, por esta razón es esencial realizar una limpieza de estos entre cada ensayo, dicha limpieza se realiza principalmente lijando la pieza de metal con una lija para metales, después la pieza es sumergida en ácido clorhídrico durante 7 min, con el propósito de retirar todas las impurezas resultantes de la corrosión y finalmente es sumergida en una solución de bicarbonato de sodio y agua durante 5 min, con el objetivo de nivelar el pH de la pieza después de su exposición al ácido clorhídrico (Imagen 5).

⁶⁷ Pine research. Electrochemistry Research Equipment and Accessories. [1]. [Consultado el Jul 15,2018]. Disponible en: <https://www.pineresearch.com/>

Imagen 5. Limpieza de cupones.



Fuente: elaboración propia.

Este proceso se observa en el diagrama de flujo de la Figura 6.

Figura 6. Diagrama de flujo proceso de limpieza de cupones.



Fuente: elaboración propia.

3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

La corrosión es un proceso que puede acelerarse al tener contacto con factores críticos como altas presiones, altas temperaturas y flujo de fluido turbulento; por esta razón para solucionar un problema de corrosión en campo petrolero, se deben realizar pruebas a nivel laboratorio representando las condiciones desfavorables en un ambiente controlado. Con este objetivo trazado se hace uso del Electrodo de Cilindro Giratorio (RCE), siendo este el equipo adecuado para realizar los ensayos necesarios de manera confiable; puesto que posee un rotador de electrodo, un eje de electrodo RCE y accesorios idóneos para adaptar con exactitud la velocidad de rotación de un eje orientado verticalmente.

Además, cuenta con una punta constituida de materiales químicamente inertes y eléctricamente aislantes como PTFE, PCTFE o PEEK; así mismo en el interior de la punta se encuentra un mango de metal que provee estabilidad mecánica y contacto eléctrico, apta para mantener un fragmento de metal en forma cilíndrica, también conocido como cupón, el cual se encuentra montada en el extremo inferior del eje.

Cuando se hunde y gira en una solución de prueba, las condiciones hidrodinámicas generadas por el RCE, incluso a bajas velocidades de rotación, son generalmente bastante turbulentas. Acoplado la velocidad de rotación RCE entre un rango de 200 a 4000 rpm, es posible adaptar las condiciones hidrodinámicas próximas a la muestra del metal.

El propósito es adaptar la velocidad de rotación para que las condiciones y características de flujo del fluido del laboratorio correspondan a las encontradas en el campo petrolero. Al ajustar velocidades de rotación bajas, la disolución próxima a un cilindro giratorio circula con un movimiento regular llamado flujo laminar. A medida que se eleva la velocidad de rotación, el flujo de la disolución se vuelve más complejo. Mientras que la capa de disolución en contacto directo con el cilindro metálico permanece adherido a la superficie, el esfuerzo cortante entre esta capa y las capas más alejadas del cilindro comienza a desatar vórtices. A partir de este momento, el flujo de la disolución pasa de régimen laminar a régimen turbulento, dicho cambio está representado por el número de Reynolds, con el propósito de cuantificar la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en una solución; a medida que aumenta la velocidad de rotación, los vórtices originan más vórtices.

Posteriormente, el proceso de corrosión puede ser monitoreado por métodos de pérdida de masa o por métodos electroquímicos como la Resistencia a la Polarización Lineal (LPR) o la Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

Para todas las velocidades de rotación, excluyendo las más lentas, se aspira alcanzar un régimen de flujo turbulento. Por esta razón, para el equipo RCE, las

tasas de rotación entre 5 y 4000 RPM pertenecen a un rango de números de Reynolds que comprende varios órdenes de magnitud (Tabla 3). La transición del flujo laminar al turbulento ocurre justo por encima de 200 RPM, en el punto que el número de Reynolds excede 2000. Cabe resaltar que esta transición se produce a una velocidad de rotación relativamente pequeña, por lo tanto, el equipo RCE es un instrumento ejemplar para estudiar el régimen turbulento a baja velocidad, siendo esta una usual situación que se presenta en las tuberías de formación. Las velocidades turbulentas más altas igualmente son fácilmente alcanzables a velocidades de rotación más altas.

Tabla 3. Cálculos hidrodinámicos para un típico * 15 mm OD Pine Research Electrodo de cilindro giratorio en agua.

| Tasa de rotación F (RPM) | Tasa de rotación ω (rad/s) | Velocidad superficial v_{el} (cm/s) | Tensión de la pared τ_{cil} (g/cm s ²) | Número de Reynolds Re (sin unidad) |
|--------------------------------|--------------------------------------|---|---|--|
| 5 | 0,524 | 0,39 | 0,0035 | 66 |
| 10 | 1,047 | 0,79 | 0,0113 | 131 |
| 20 | 2,094 | 1,57 | 0,0366 | 263 |
| 50 | 5,236 | 3,93 | 0,1737 | 657 |
| 100 | 10,47 | 7,85 | 0,5642 | 1315 |
| 200 | 20,94 | 15,7 | 1,8332 | 2629 |
| 250 | 26,18 | 19,6 | 2,6789 | 3287 |
| 500 | 52,36 | 39,3 | 8,7039 | 6573 |
| 1000 | 104,7 | 78,5 | 28,279 | 13146 |
| 2000 | 209, | 157 | 91,879 | 26293 |
| 3000 | 314,2 | 236 | 183,05 | 39439 |
| 4000 | 418,9 | 314 | 298,52 | 52586 |

Fuente: HWANG, Jong-Yeon, et al. Flow field characterization of a rotating cylinder. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND FLUID FLOW. vol. 29, no. 5, p. 1268-1278. Modificado por el autor.

El régimen turbulento en el RCE tiene la capacidad de llevar material de la solución a la superficie del metal, de igual manera puede transportar material lejos de la superficie. Por esta razón la tasa de transporte de masa hacia y desde el área exterior del metal comúnmente es el factor que dirige la tasa de corrosión. En consecuencia, es importante tener en cuenta la concentración de inhibidor que se aplica a la pieza metálica, ya que juega un papel importante en el contacto medio-superficie. ⁶⁸

⁶⁸ HWANG, Jong-Yeon, et al. Flow field characterization of a rotating cylinder. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND FLUID FLOW. vol. 29, no. 5, p. 1268-1278

A partir de todos estos factores que se deben tener en cuenta, se realiza un diseño de experimentos el cual se desarrolla con el objetivo de determinar el efecto en la tasa de corrosión con relación a la velocidad de rotación y concentración del inhibidor tipo fílmico.

3.3.1 Selección de diseños factoriales. El método elegido para el desarrollo experimental es un diseño completamente aleatorizado de dos factores, realizando el estudio de la varianza con el propósito de hallar una relación entre la variable respuesta y los factores o variables cuantitativas. Teniendo en cuenta lo anterior, el número de variables son 2, con tres niveles para un diseño factorial de 3^k , siendo un diseño factorial de 3^2 , es decir, nueve (9) con el objetivo de obtener un patrón de comportamiento, teniendo como resultado final un total de dieciocho (18) experimentos; sin embargo, es innecesario la realización de un blanco por inhibidor al ser un referente, por lo cual se reduce a un total de quince (15) experimentos.

En esta oportunidad se evaluarán los inhibidores de corrosión IC 5480 y C 907, siendo estos los inhibidores de corrosión que presentaron el mejor comportamiento en un ensayo de estabilidad térmica; para cada inhibidor seleccionado se asignaran dos factores, uno de ellos es velocidad de rotación en donde se establecerán tres niveles (200 RPM, 2000 RPM y 4000 RPM), de igual manera se tendrá en cuenta el factor de concentración del inhibidor, aplicando tres niveles (0 ppm, 250 ppm y 500 ppm).

Con base en lo anterior se opta por un rango entre 200 y 4000 RPM en cuanto a velocidad de rotación, puesto que a partir de 200 RPM se aprecia la transición de régimen laminar a régimen turbulento, siendo el régimen turbulento el estado de interés en esta experimentación como se aclaró anteriormente; llegando a un alcance de 4000 RPM siendo esta la máxima velocidad alcanzada por el equipo RCE y así mismo reproducir las condiciones hidrodinámicas en el pozo.

De igual manera se prefiere elegir un rango entre 0 y 500 ppm en cuanto a concentración del inhibidor, ya que al tener conocimiento de las características del agua de formación se estima que 250 y 500 ppm son las concentraciones claves para evidenciar la transferencia de masa y la tasa de corrosión; sin embargo es necesario el uso de un blanco, es decir, la ausencia del inhibidor de corrosión en el sistema (0 ppm), con el propósito de evidenciar el proceso de corrosión durante un lapso de tiempo máximo de 24 horas; el cual es el tiempo requerido por el equipo RCE para alcanzar resultados certeros y evidenciar el ataque físico-químico en las piezas metálicas.

Cuadro 3. *Hipótesis alternas y nulas con base en las variables de velocidad de rotación y concentración del inhibidor.*

| Hipótesis | Velocidad de rotación (RPM) | Concentración del inhibidor (ppm) |
|------------------------|---|---|
| Hi (Hipótesis alterna) | La velocidad de corrosión se ve directamente afectada por la velocidad de rotación del equipo RCE. | La velocidad de corrosión se ve directamente afectada por la concentración del inhibidor base agua. |
| Ho (Hipótesis nula) | La velocidad de corrosión no se ve directamente afectada por la velocidad de rotación del equipo RCE. | La velocidad de corrosión no se ve afectada por la concentración del inhibidor en base agua. |

Fuente: elaboración propia.

3.4 MÉTODO EXPERIMENTAL

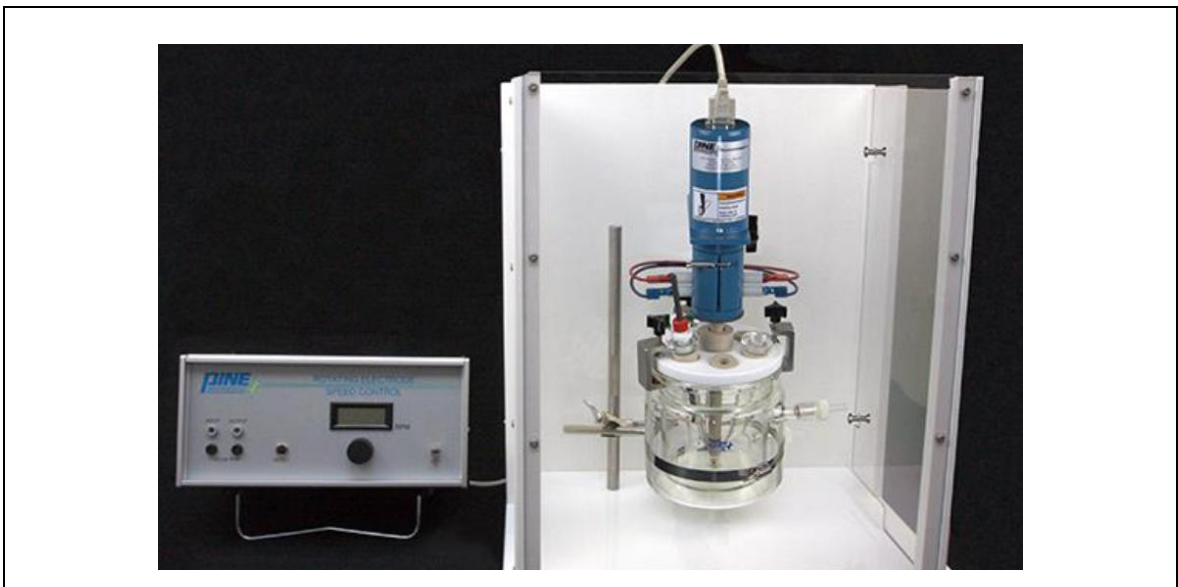
En este proyecto se hace uso de un medio corrosivo o electrolito como lo es el agua de formación anteriormente descrita, al igual que el acero 1020 el cual hace referencia al electrodo de trabajo; esta relación es fundamental para la comprobación del fenómeno de la corrosión, puesto que el acero 1020 será el elemento que sufre el ataque de manera directa; dicho ataque es generado por el medio corrosivo e impulsado por las rotaciones.

Se hace uso del equipo Rotating Cylinder Electrodes (RCE) el cual es un equipo apropiado para mover de manera acelerada una muestra de metal con respecto a un fluido. Este equipo comprende un rotador de electrodo, un eje de electrodo RCE y accesorios capaces de acoplar la velocidad de rotación de un eje en sentido vertical. Posee una punta especial capaz de sostener una pieza de metal con forma cilíndrica está montada en el extremo inferior del eje. La punta está formada principalmente por materiales químicamente inertes y eléctricamente aislantes como poliéter-éter-cetona (PEEK), pero en el interior de la punta hay un tornillo metálico que facilita la estabilidad mecánica y contacto eléctrico con el cupón. Como se aprecia en la Figura 7, los componentes de un sistema RCE contienen los siguientes elementos:

- Un rotador de electrodo analítico. El rotador fija la velocidad de rotación del cupón.
- Un eje para soportar cupón y conectarse eléctricamente por medio del rotador al potencióstato donde se puede obtener la velocidad de corrosión.
- Inserciones de cupón que tienen un área superficial de 3 cm² y están hechas del metal específico de interés.

- Electrodo inerte de grafito.
- Electrodo de referencia (Ag / AgCl, Pseudo).
- Una celda de vidrio OpenTop que incorpora fácil acceso para el control del gas de purga, la inserción y el posicionamiento de otros electrodos, como el mostrador y otros accesorios de referencia.
- Una camisa de agua cerca de la celda electroquímica de vidrio o directamente por medio de una placa debajo de la celda de vidrio, siendo esta una manera de controlar la temperatura.
- Un potenciostato para medir y registrar corriente de corrosión.⁶⁹

Figura 7. Componentes de un sistema RCE.



Fuente: PINE RESEARCH INSTRUMENTATION. Tools for the Study of Flow Based Corrosion by Rotating Cylinder Electrodes.

Este equipo es capaz de realizar representaciones gráficas sobre los diferentes fenómenos involucrados en los procesos establecidos, dichas representaciones se llevan a cabo por medio de un software llamado Aftermath, esta herramienta recibe las señales de corriente emitidas por el equipo y las diferencias de potencial, y las sintetiza de manera gráfica, con el objetivo de proporcionar un análisis más objetivo y exacto en cuanto a la acción de la corrosión.

Al iniciar el sistema es necesario empezar con una fase OCP, es decir, el potencial de circuito abierto, potencial libre, potencial de equilibrio o potencial de corrosión, E_{corr} ; el cual registra la diferencia de potencial libre entre los electrodos de trabajo y de referencia en el tiempo que no circula corriente externa en la celda.

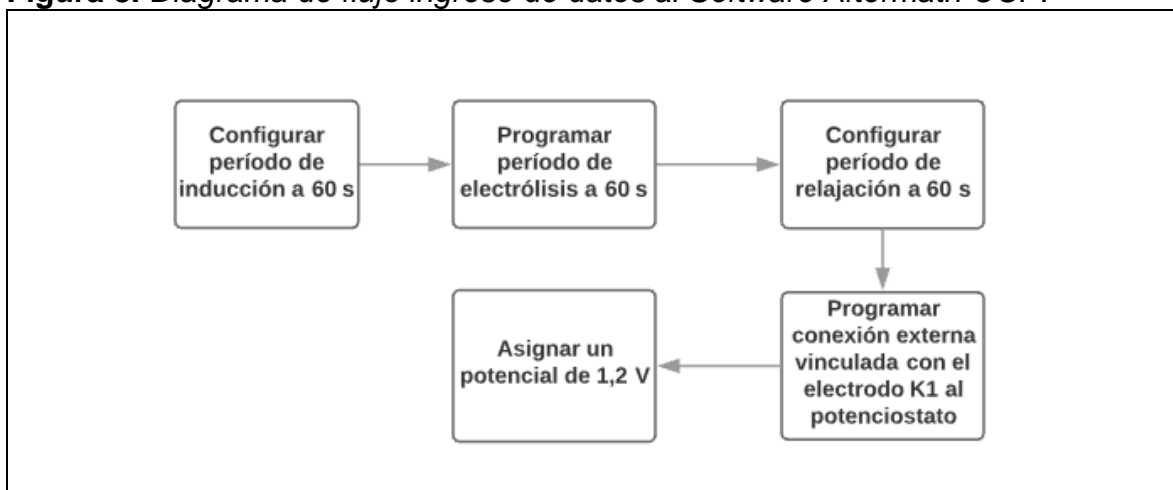
⁶⁹ PINE RESEARCH INSTRUMENTATION. Tools for the Study of Flow Based Corrosion by Rotating Cylinder Electrodes. [1]:2014.

Las mediciones de OCP pueden realizarse en AfterMath para definir el potencial de corrosión, la ejecución de un OCP antes de iniciar las mediciones de LPR proporciona información sobre el equilibrio del sistema y el valor de su potencial de corrosión.

Para la medición de OCP en AfterMath se debe ejecutar la medición durante un lapso de tiempo amplio con el fin de hallar un potencial estable, el cual depende del sistema electroquímico. La pendiente del gráfico OCP frente al tiempo será cercana a cero (unidades de mV / s).

Se realiza la configuración de una medición de potencial de circuito abierto por medio de los parámetros del periodo de inducción, periodo de electrólisis y periodo de relajación. Además, se configura en parámetros de post experimentación conexión externa vinculada con el electrodo K1 al potencióstato con un potencial de 1,2 V, siendo este valor el sugerido por el proveedor. Esta metodología se observa en el diagrama de flujo de la Figura 8.⁷⁰

Figura 8. Diagrama de flujo ingreso de datos al Software Aftermath OCP.

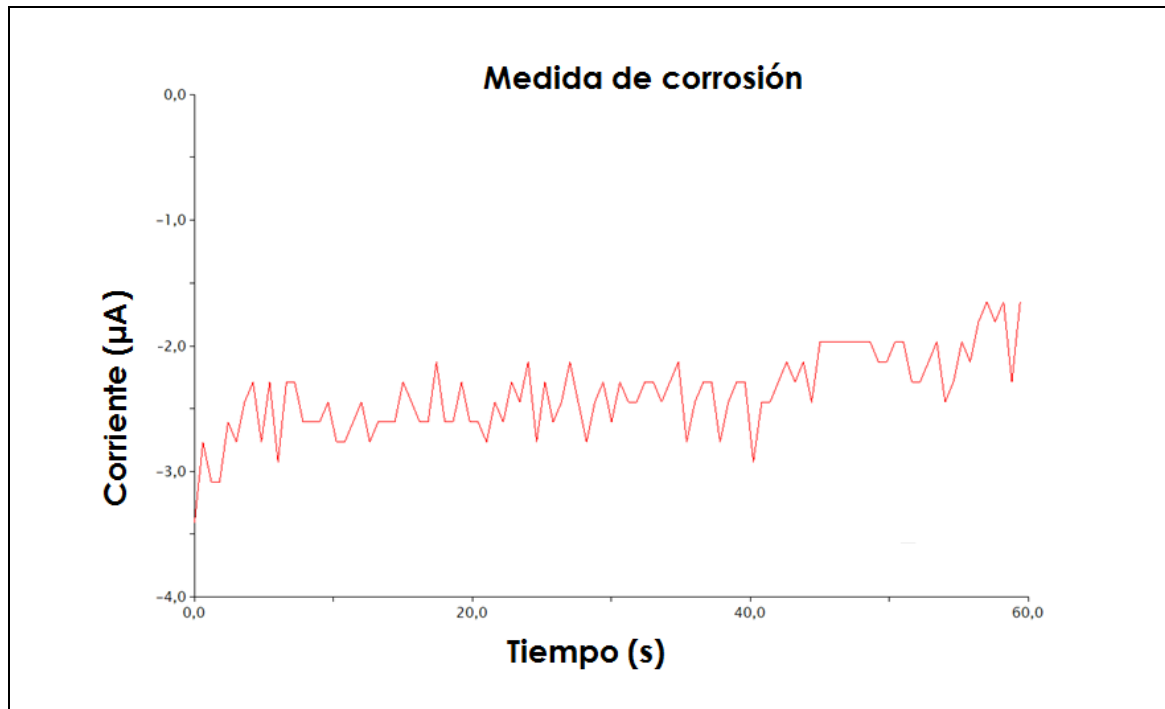


Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se obtienen gráficos de medida de corriente, en donde se encuentran variables de corriente en microamperios (μA) Vs tiempo en segundos (s) (Gráfica 9).

⁷⁰ PINE RESEARCH. MANUAL PARA EL USUARIO. [1]. [Consultado el May 30,2018]. Disponible en: <https://www.pineresearch.com/>.

Gráfica 9. *Potencial de circuito abierto medida de corriente.*

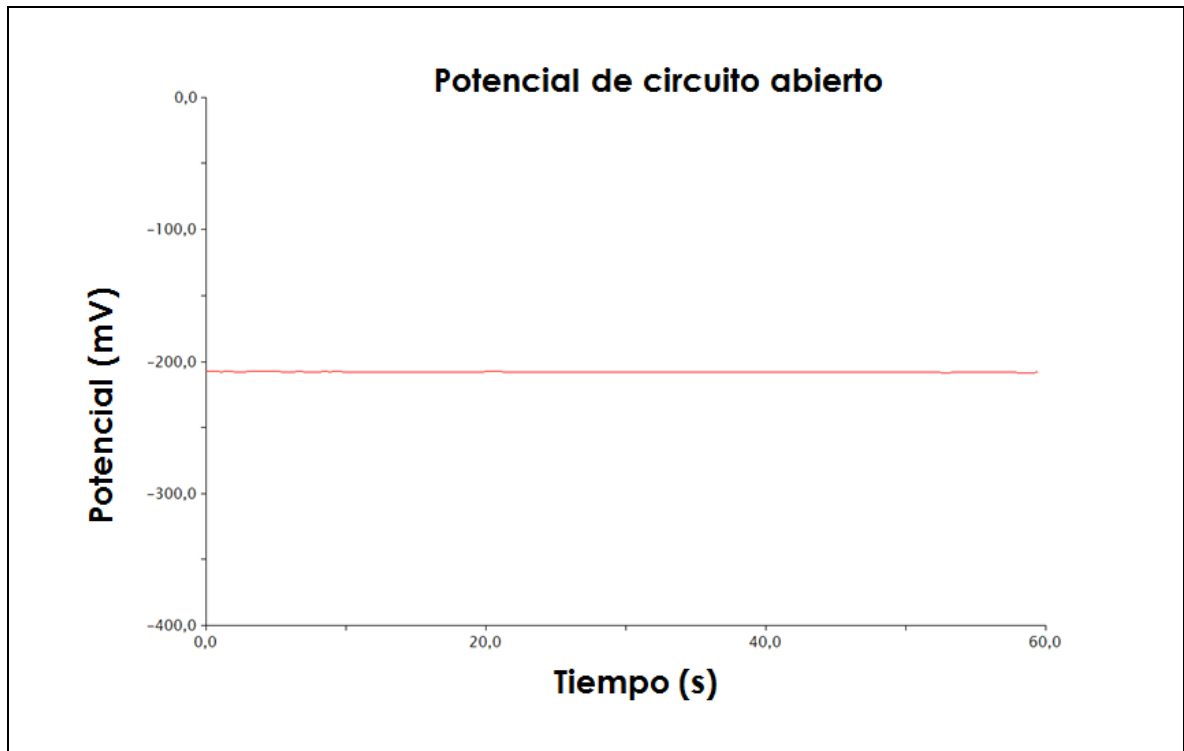


Fuente: Software Aftermath.

Siendo la corriente el movimiento de carga eléctrica que recorre un metal debido al movimiento de los electrones o cargas presentes en él; se realiza una medición de circuito abierto con el objetivo de estabilizar el sistema, puesto que en un sistema de corrosión se presenta un pequeño cambio de polaridad representado por máximos o mínimos muy pequeños, siendo el mismo medio o sistema el que genera una corriente muy baja.

Además, se puede dar con una gráfica de potencial de circuito abierto (OCP), el cual hace referencia a la diferencia en el potencial eléctrico, donde el potencial en un electrodo de trabajo contrastado con el electrodo de referencia en el tiempo que no se presenta corriente o potencial en la celda. Al momento que un potencial correspondiente al circuito abierto hace efecto, el sistema total mide el potencial del circuito abierto antes de prender la celda. (Gráfica 10)

Gráfica 10. Medida de circuito abierto.



Fuente: Software Aftermath.

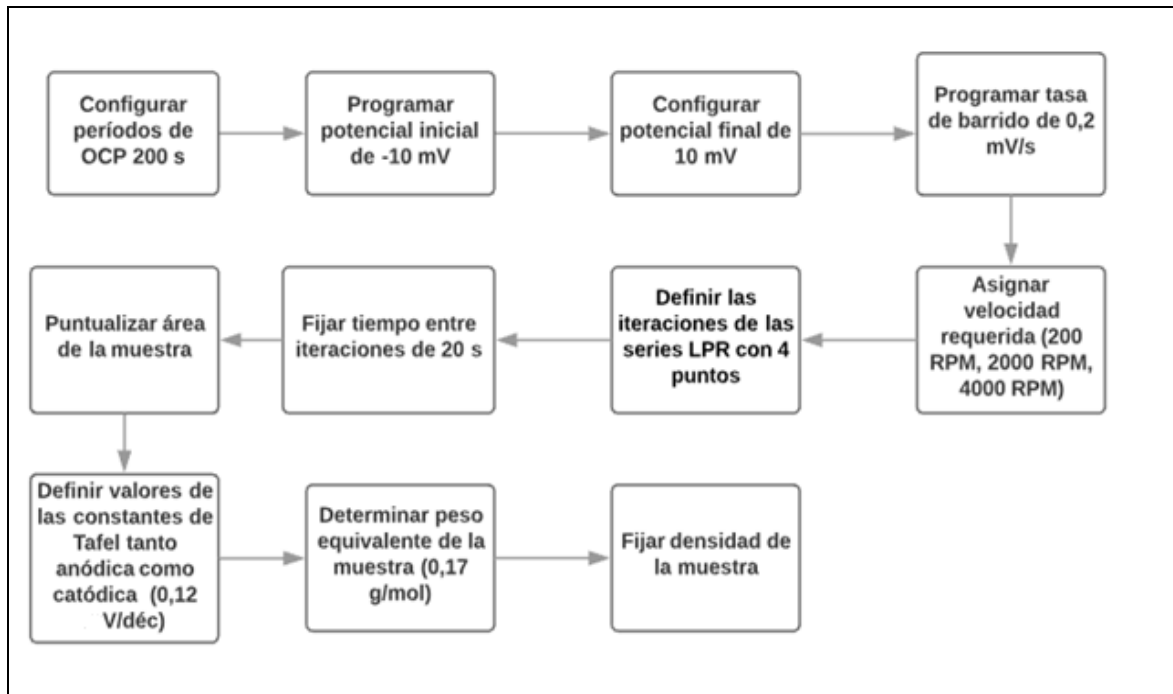
Idealmente, la medida de potencial que se obtiene debe acercarse a una pendiente cero para medir eficientemente E_{corr} .

Como una medición de OCP localiza cambios mínimos en el potencial con el transcurso del tiempo, al emplear una escala automática normalmente manifiesta una ventana de potencial mínimo, que destaca el ruido en los datos alcanzados. Después se realiza la programación de las especificaciones en parámetros de resistencia a la polarización lineal del cilindro giratorio para la prueba de corrosión con el método LPR-RCE, donde se encuentran parámetros básicos y se establecen periodos de OCP de 200 s, potencial inicial de -10 mV, potencial final de 10 mV y tasa de barrido de 0,2 mV/s; dichos valores son los sugeridos por el proveedor. De igual forma se especifican los parámetros del rotador con la velocidad requerida (200 RPM, 2000 RPM Y 4000 RPM); por otra parte se definen las iteraciones de las series LPR con 4 puntos, tiempo entre iteraciones de 20 s, así mismo se configuran los parámetros de la tasa de corrosión como área de la muestra, valores de la constante de Tafel tanto para ánodo como para cátodo (0,12 V/déc)⁷¹, peso equivalente de la muestra, en este caso se utiliza 0,17 g/mol debido a la

⁷¹ Naar, lucia. Tovar, Luis. Ipdvsa. Evaluación en laboratorio y campo para seleccionar técnicamente los inhibidores de corrosión.

composición del acero al carbón 1020 y densidad de la muestra. Esta metodología se observa en el diagrama de flujo de la Figura 9.

Figura 9. Diagrama de flujo ingreso de datos al Software Aftermath OCP.



Fuente: elaboración propia.

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El método utilizado en el laboratorio para definir la eficiencia de los inhibidores de corrosión depende del medio en el cual se vaya a emplear. En el proceso de sistemas multifásicos como agua, crudo y gas, en los cuales la conductividad del ambiente es baja; la eficiencia de los inhibidores de corrosión se determina por medio de la técnica de pérdida de peso, entre tanto, en los sistemas acuosos, en los cuales la conductividad del medio es alta; la eficiencia de los inhibidores de corrosión se define por la técnica de resistencia a la polarización. Es necesario aclarar que esta experimentación se realiza con un parámetro de 1 L de agua de formación sintética por corrida, sin tener en estudio la cantidad de inhibidor con respecto a la cantidad de agua; puesto que se desarrolla la evaluación del efecto inhibidor de los productos de manera independiente a los volúmenes de producción.

Además, la información se complementa con el cálculo del porcentaje de eficiencia, por medio de la ecuación 8:

Ecuación 8. *Porcentaje de eficiencia.*

$$\text{Porcentaje de eficiencia (\%)} = \frac{\text{VelCorr } s/i - \text{VelCorr } c/i}{\text{VelCorr } s/i} * 100$$

Por lo anterior, en este proyecto se analizan las gráficas resultantes del software Aftermath bajo los parámetros establecidos en la Norma NACE RP-775 (2005). Con el objetivo de comprender los fenómenos involucrados en la corrosión que se presenta en sistemas de conductividad alta.

- 1) Se procede a analizar las gráficas resultantes para un sistema a 200 RPM evaluando el comportamiento del blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.
- Partiendo del estudio de la resistencia de polarización de un sistema a 200 RPM evaluando el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.

La resistencia de polarización lineal es una técnica que posibilita estimar la resistencia que tiene un metal a la transferencia de carga en el medio de estudio, es decir, es la barrera que se forma en un metal debido a las variables eléctricas, estabilizando la capacidad de un material de conducir o impedir la transmisión de corriente.

En la Tabla 4 se observa como el sistema inicia su actividad en un tiempo de 0 minutos con una resistencia de 575,6578 $\Omega \text{ cm}^2$, donde se revela una disminución

en la resistencia de polarización al cabo de un tiempo de 15,5046 minutos con valor de 418,5389 $\Omega \text{ cm}^2$, este comportamiento se debe al choque que tiene el metal con respecto al medio, ya que es sometido a una velocidad de 200 RPM y a un medio acuoso corrosivo.

Sin embargo, en un tiempo de 29,6224 minutos se registra un aumento en la resistencia hasta 594,7543 $\Omega \text{ cm}^2$ lo cual hace referencia a una etapa de pasivación donde se manifiesta una capa de óxido de hierro que actúa como capa protectora de la aleación, es decir, el metal aumenta su resistencia hacia el medio y es aquí donde empieza su proceso de adecuación.

Tabla 4. Datos Resistencia a la polarización del blanco a 200 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 575,6578 |
| 2 | 7,7896 | 475,4467 |
| 3 | 15,5046 | 418,5389 |
| 4 | 29,6224 | 594,7543 |

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 5, este sistema bajo condiciones de velocidad de 200 RPM y concentración de 250 ppm del inhibidor en base agua IC 5480 empieza el proceso de corrosión en un tiempo de 0 minutos con un valor de resistencia de 2765,676 $\Omega \text{ cm}^2$ y presenta un crecimiento al cabo de 16,1088 minutos con un 2884,8765 $\Omega \text{ cm}^2$, siendo este un comportamiento esperado por el efecto inhibidor del producto.

Tabla 5. Datos Resistencia a la polarización con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 200 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 2765,676 |
| 2 | 7,7878 | 2875,8678 |
| 3 | 16,1088 | 2884,8765 |
| 4 | 24,0094 | 2845,5794 |

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 6, el inhibidor de corrosión C 907 presenta un comportamiento ascendente durante un transcurso de 23,3309 minutos, al término de este tiempo se da un incremento de 864,7654 $\Omega \text{ cm}^2$ a 986,5675 $\Omega \text{ cm}^2$, lo cual hace referencia a un comportamiento usual en el proceso de corrosión, puesto que al producirse el efecto del inhibidor en el medio se espera el aumento de la resistencia a la polarización.

Tabla 6. Datos Resistencia a la polarización con 250 ppm del inhibidor C 907 a 200 RPM.

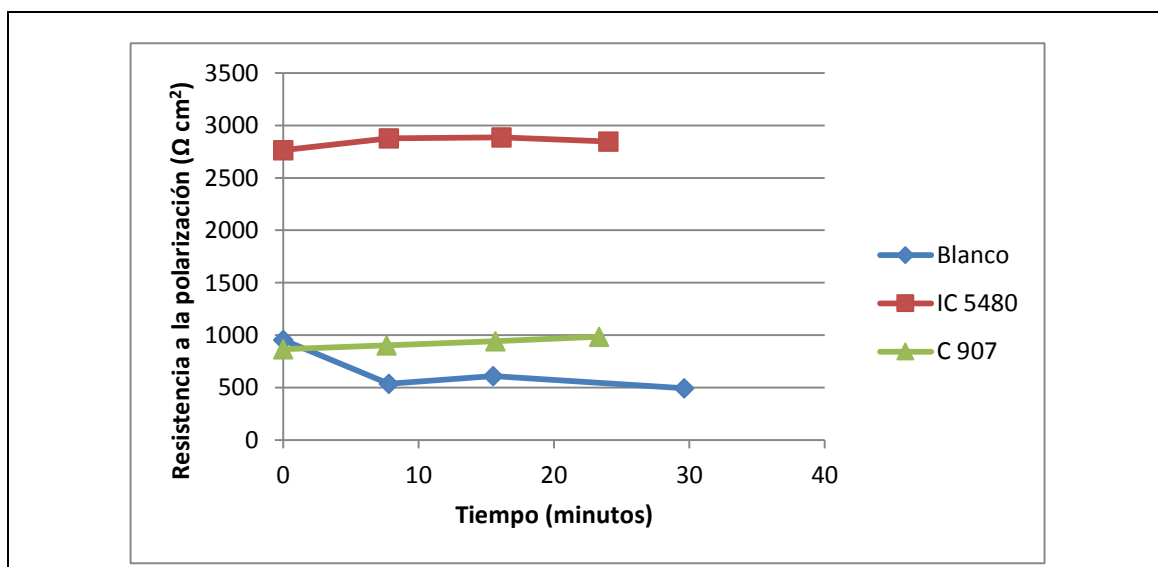
| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 864,7654 |
| 2 | 7,6222 | 904,3683 |
| 3 | 15,6596 | 943,7548 |
| 4 | 23,3309 | 986,5675 |

Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 11 se compara de manera simultánea la acción de los dos productos ensayados bajo las mismas condiciones de operación, es necesario resaltar que entre más altos sean los valores de resistencia a la polarización menor será la velocidad de corrosión; en primera instancia con cifras entre 2500 $\Omega \text{ cm}^2$ y 3000 $\Omega \text{ cm}^2$ se encuentra la curva correspondiente al inhibidor de corrosión IC 5480, siendo este el producto con la mayor resistencia a la polarización con respecto al blanco.

Por otra parte, aunque el inhibidor C 907 presenta una tendencia persistente los valores que toma no son tan altos con respecto al blanco, es decir, este producto no es óptimo para este tipo de agua de formación. La diferencia que se observa entre la respuesta de los dos productos oscila entre los 1800 $\Omega \text{ cm}^2$ y 1900 $\Omega \text{ cm}^2$, desigualdad considerable al instante de interpretar la resistencia que presenta el metal hacia el medio corrosivo.

Gráfica 11. Resistencia a la polarización para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.



Fuente: elaboración propia.

- De manera paralela se analiza la tasa de pérdida de masa para un sistema a 200 RPM evaluando del comportamiento del blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.

En la Tabla 7 se exponen los valores obtenidos para la tasa de pérdida de masa con respecto al tiempo, donde se evidencia un incremento en la tasa de pérdida de masa de 0,007254 mdd en un tiempo de 7,7896 minutos con respecto al valor de 0,006713 mdd en 0 minutos, pues durante la interacción que tiene el metal con el medio se presenta un ataque electroquímico, es decir, se manifiestan secciones en las que el metal se disuelve (zonas anódicas) y secciones que no sufren alteración alguna (zonas catódicas).

Siendo este proceso el producto de la unión de dos reacciones (oxidación y reducción) donde existe un intercambio de electrones en la superficie del material, de esta manera se origina la oxidación (ánodo) degradando el metal y liberando electrones que se mueven por medio del metal hacia la otra sección (cátodo) en la que reaccionan con oxígeno y agua del medio para su reducción; teniendo como consecuencia la mayor pérdida de cantidad de material y el aumento de la tasa de penetración.

No obstante se registra una reducción en la tasa de pérdida de masa hasta el valor de 0,006815 mdd en un tiempo de 29,6224 minutos debido a que el metal entra en una etapa de pasivación, en la cual se forma una capa compacta de óxidos de hierro (Hematita), adherente y de baja porosidad actuando como un recubrimiento protector y aislando la superficie metálica del medio corrosivo, además la cantidad de material remanente impide la pérdida considerable de metal y a su vez dificulta la penetración del metal.

Además, el metal busca su adecuación al medio tomando como acción la nivelación tanto de su resistencia como de la tasa de pérdida de masa.

Tabla 7. Datos Tasa pérdida de masa para el blanco a 200 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa pérdida de masa (mdd) |
|-----------|------------------|----------------------------|
| 1 | 0 | 0,006713 |
| 2 | 7,7896 | 0,007254 |
| 3 | 15,5046 | 0,006877 |
| 4 | 29,6224 | 0,006815 |

Fuente: elaboración propia.

De igual manera se estudia el comportamiento del inhibidor IC 5480 con el soporte numérico de la Tabla 8, la cual presenta un incremento en la tasa de pérdida de masa, desde un punto inicial de 0,000537 mdd hasta 0,0007265 mdd al cabo de

un periodo de tiempo de 16,1088 minutos, encontrando un comportamiento habitual debido a las perturbaciones que se introducen al sistema.

No obstante, cambia su orientación debido al efecto del inhibidor y a la presencia de una capa protectora de pasivación hasta un punto de 0,000612 mdd.

Tabla 8. Datos Tasa pérdida de masa con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 200 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa pérdida de masa (mdd) | % Eficiencia IC 5480 | Promedio % |
|-----------|------------------|----------------------------|----------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,000537 | 92,00059586 | |
| 2 | 7,7878 | 0,0006391 | 91,18968845 | |
| 3 | 16,1088 | 0,0007265 | 89,43580049 | |
| 4 | 24,0094 | 0,000612 | 91,01980924 | 90,911473 |

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 9 se exponen los datos obtenidos de la relación entre tiempo y tasa de pérdida de masa; en la cual se evidencia una tendencia constante en la tasa de pérdida de masa, a pesar de ello, sobre el minuto 15,6596 se presenta una mínima disminución de 0,006443 mdd a 0,006128 mdd, siendo una tendencia conveniente en el curso de la corrosión.

Tabla 9. Datos Tasa pérdida de masa con 250 ppm del inhibidor C 907 a 200 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa pérdida de masa (mdd) | % Eficiencia C 907 | Promedio % |
|-----------|------------------|----------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,006441 | 4,051839714 | |
| 2 | 7,6222 | 0,006565 | 9,498207885 | |
| 3 | 15,6596 | 0,006443 | 6,310891377 | |
| 4 | 23,3309 | 0,006128 | 10,08070433 | 7,4854108 |

Fuente: elaboración propia.

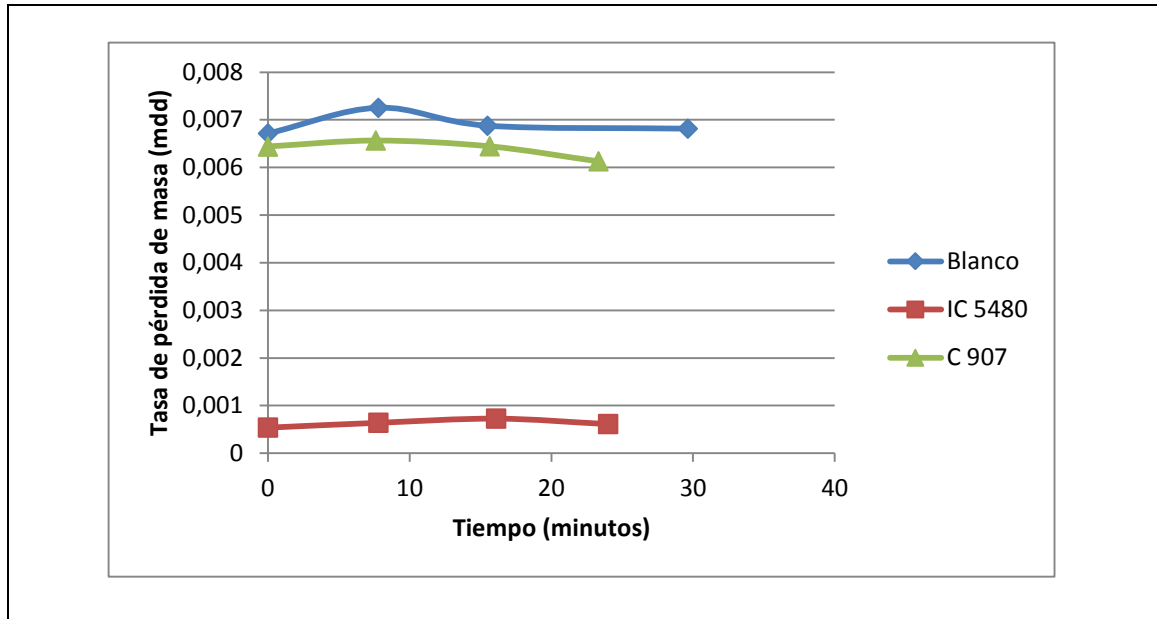
En la Gráfica 12 se relaciona el comportamiento de los dos inhibidores de corrosión base agua, es importante destacar que entre más altos sean los valores de tasa de pérdida de masa más elevada será la velocidad de corrosión.

Para comenzar, en la parte inferior de la gráfica se encuentra el producto IC 5480 con valores entre 0 mdd y 0,001 mdd, cifras que representan una pérdida de masa mínima con respecto al blanco; considerando un promedio de porcentaje de eficiencia del 90,9114 %. Por otro lado, el producto C 907 disminuye su tasa de

pérdida de masa, sin embargo, presenta datos muy cercanos al blanco; resultados soportados por un porcentaje de eficiencia del 7,4854 %.

La diferencia entre la respuesta oscila entre 0,0055 mdd y 0,006 mdd, siendo una discrepancia alta en cuanto a la tasa de pérdida de masa.

Gráfica 12. Tasa pérdida de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 200 RPM.



Fuente: elaboración propia.

- Así mismo se interpreta la tasa de penetración de un sistema a 200 RPM evaluando el comportamiento del blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.

En la Tabla 10 se especifican los valores de cada punto de iteración, se observa un incremento en la tasa de penetración de 15,7898 mpy a 23,678 mpy en un tiempo de 7,7896 minutos debido al ataque electroquímico que se presenta entre el medio y el metal; sin embargo, presenta un descenso hasta 16,3764 mpy, puesto que entra en una etapa de pasivación, la cual actúa como capa protectora y a su vez busca el acondicionamiento al medio, este comportamiento se refleja en la disminución de la tasa de penetración.

Tabla 10. Datos Tasa de penetración para el blanco a 200 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) |
|-----------|------------------|---------------------------|
| 1 | 0 | 15,7898 |
| 2 | 7,7896 | 23,678 |
| 3 | 15,5046 | 13,5945 |
| 4 | 29,6224 | 16,3764 |

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, se analiza la tasa de penetración en el sistema con ayuda de la Tabla 11, la cual se comporta de manera descendente hasta 1,0076 mpy teniendo en cuenta el efecto inhibitor del producto.

Tabla 11. Datos Tasa de penetración con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 200 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) | % Eficiencia IC 5480 | Promedio % |
|-----------|------------------|---------------------------|----------------------|------------|
| 1 | 0 | 1,3916 | 91,18671547 | |
| 2 | 7,7878 | 1,387 | 94,14224174 | |
| 3 | 16,1088 | 1,1521 | 91,52524918 | |
| 4 | 24,0094 | 1,0076 | 93,84724359 | 92,67536 |

Fuente: elaboración propia.

Es importante resaltar que el registro numérico de la tasa de penetración contra tiempo en la Tabla 12; presenta un aumento durante el proceso de corrosión, desde 5,7204 mpy hasta 6,9938 mpy, a pesar de ser un pequeño aumento no es la acción esperada por parte del producto en este tipo de agua de formación.

Tabla 12. Datos Tasa de penetración con 250 ppm del inhibidor C 907 a 200 RPM.

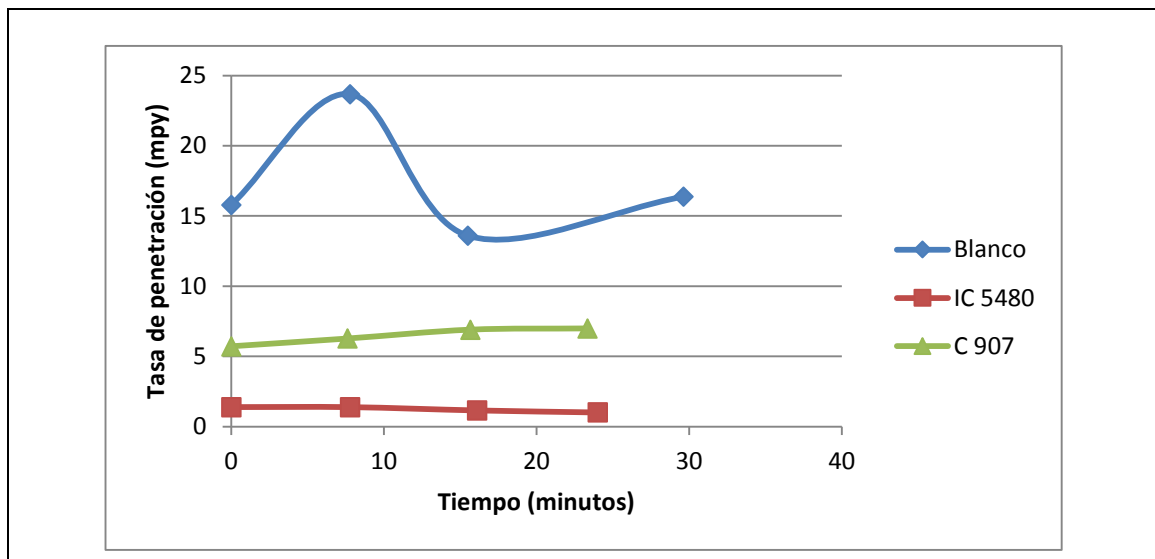
| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) | % Eficiencia C 907 | Promedio % |
|-----------|------------------|---------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 0 | 5,7204 | 63,77154872 | |
| 2 | 7,6222 | 6,2753 | 73,4973393 | |
| 3 | 15,6596 | 6,9059 | 49,20077973 | |
| 4 | 23,3309 | 6,9938 | 57,29342224 | 60,940772 |

Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 13 se aprecia la tasa de penetración o velocidad de corrosión en un sistema de 200 RPM, donde el inhibidor de corrosión IC 5480 presenta los valores más bajos con respecto al blanco, siendo este comportamiento el deseado por el producto con un porcentaje de eficiencia de 92,6753 %.

En contraste, para el producto C 907 ilustra valores entre 5 mpy y 10 mpy, haciendo referencia a un criterio de velocidad de corrosión moderado; además se sustenta su actividad con un porcentaje de eficiencia de 60,9407 %. La diferencia es notable entre la acción de los dos inhibidores, la cual fluctúa entre 5,98 mpy y 4,32 mpy.

Gráfica 13. Tasa de penetración para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.



Fuente: elaboración propia.

- 2) Se ejecuta el análisis de la gráfica resultante de un sistema a 200 RPM evaluando la acción del blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.
- A partir del análisis de la resistencia a la polarización de un sistema a 200 RPM evaluando el comportamiento del blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.

Como se explica anteriormente, el blanco a 200 RPM manifiesta valores entre 500 $\Omega \text{ cm}^2$ y 1000 $\Omega \text{ cm}^2$ aproximadamente, a causa de la interacción con el medio.

En la Tabla 13, el inhibidor de corrosión IC 5480 con 500 ppm a 200 RPM inicia su proceso de corrosión con un aumento en la resistencia a la polarización comprendida entre 1632,2743 $\Omega \text{ cm}^2$ y 1990,5378 $\Omega \text{ cm}^2$, durante un periodo de 23,9915 minutos, como consecuencia de la protección del inhibidor y de la capa pasiva.

Tabla 13. Datos Resistencia a la polarización con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 200 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 1632,2743 |
| 2 | 7,7896 | 1745,3872 |
| 3 | 16,0015 | 1743,5354 |
| 4 | 23,9915 | 1990,5378 |

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 14 se expresa la relación entre tiempo y resistencia a la polarización del sistema, con 500 ppm del inhibidor de corrosión base agua C 907 a 200 RPM y muestra un comportamiento descendente desde 485,3727 $\Omega \text{ cm}^2$ en 0 minutos hasta un registro de 406,6367 $\Omega \text{ cm}^2$ en 14,7241 minutos. Aunque la diferencia es tenue, no es el efecto que se desea por parte del inhibidor.

Tabla 14. Datos Resistencia a la polarización con 500 ppm del inhibidor C 907 a 200 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 485,3727 |
| 2 | 7,4711 | 474,6577 |
| 3 | 14,7241 | 406,6367 |
| 4 | 29,5553 | 574,7465 |

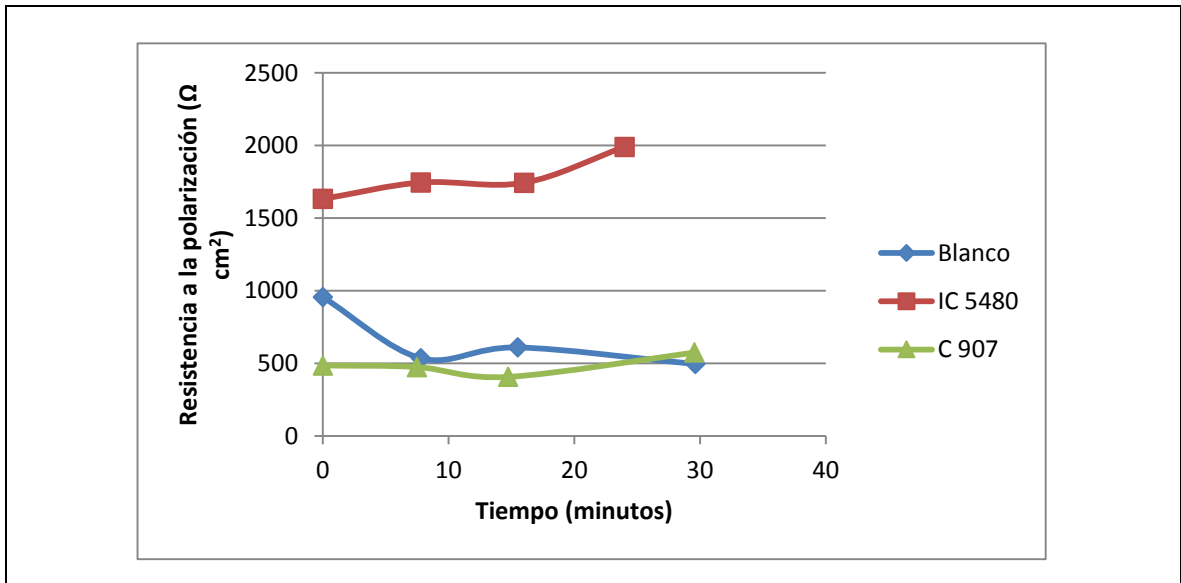
Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 14 se confronta el desempeño de los dos productos a 200 RPM, para iniciar se observa la curva del inhibidor IC 5480 en un rango de 1500 $\Omega \text{ cm}^2$ a 2000 cm^2 , controlando las condiciones del sistema y sobresaliendo como el producto con mayor resistencia a la polarización con respecto al blanco.

Por el contrario, el inhibidor C 907 se representa bajo la curva del blanco, es decir, la resistencia a la polarización del producto es menor a la del blanco, por lo cual su efecto de protección para la aleación en este medio es nulo.

La desemejanza entre el comportamiento de los dos productos supera los 1000 $\Omega \text{ cm}^2$, dando respuesta a la selección del inhibidor IC 5480.

Gráfica 14. Resistencia a la polarización para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.



Fuente: elaboración propia.

- De igual forma se analiza la tasa de pérdida de masa de un sistema a 200 RPM evaluando la tendencia del blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.

Como se explica anteriormente, el blanco a 200 RPM refleja valores alrededor de 0,006 mdd y 0,007 mdd, por consecuencia de la interacción entre el tiempo, el metal y el medio corrosivo.

Por lo contrario, la tasa de pérdida de masa en la Tabla 15 expone una disminución entre 0,0006553 mdd y 0,0005571 mdd en un lapso de 23,9915 minutos, siendo un comportamiento esperado gracias a la implementación del producto IC 5480.

Tabla 15. Datos Tasa pérdida de masa con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 200 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa pérdida de masa (mdd) | % Eficiencia IC 5480 | Promedio % |
|-----------|------------------|----------------------------|----------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,0006553 | 90,23834351 | |
| 2 | 7,7896 | 0,0005836 | 91,95478357 | |
| 3 | 16,0015 | 0,0005747 | 92,20957029 | |
| 4 | 23,9915 | 0,0005571 | 92,17006325 | 91,643190 |

Fuente: elaboración propia.

De manera paralela se analiza la tasa de pérdida de masa expresada en la Tabla 16, la cual expone una tendencia de altos y bajos entre los valores de 0,005279 mdd y 0,005341 mdd.

Tabla 16. Datos Tasa pérdida de masa con 500 ppm del inhibidor C 907 a 200 RPM.

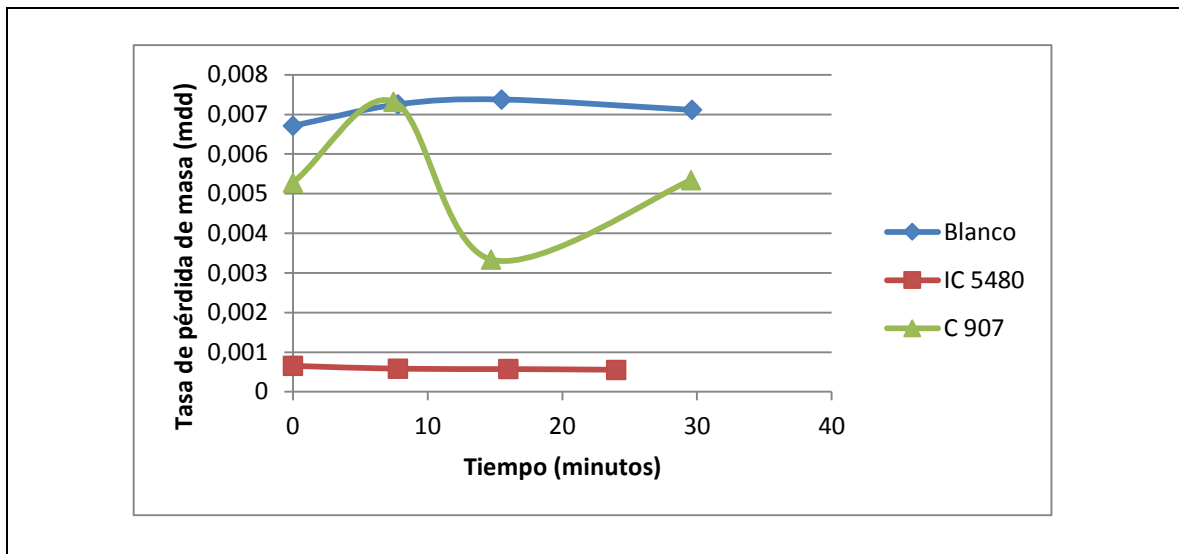
| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa pérdida de masa (mdd) | % Eficiencia C 907 | Promedio % |
|-----------|------------------|----------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,005279 | 21,36153732 | |
| 2 | 7,4711 | 0,007323 | 0,951199338 | |
| 3 | 14,7241 | 0,003337 | 54,76480954 | |
| 4 | 29,5553 | 0,005341 | 24,93323963 | 25,027096 |

Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 15 se vincula el comportamiento de los dos inhibidores de corrosión base agua, donde en la parte inferior de la gráfica se posiciona el producto IC 5480 con valores entre 0 mdd y 0,001 mdd, cifras que representan una pérdida de masa mínima con respecto al blanco; fundamentado con un promedio de porcentaje de eficiencia del 91,6431 %.

En contraste, el producto C 907 refleja altibajos muy cercanos al blanco; resultados sustentados por un porcentaje de eficiencia del 25,0270 %. Además, la desigualdad entre la acción de los dos inhibidores se encuentra entre los valores 0,006739 mdd y 0,002762 mdd; teniendo en cuenta los altibajos presentes en la tendencia del inhibidor C 907 y atribuidos al estado del cupón después de ser sometido a varias corridas y sesiones de limpieza anteriormente descritas; afectando el tiempo de respuesta.

Gráfica 15. Tasa pérdida de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.



Fuente: elaboración propia.

- De igual modo se estudia la tasa de penetración de un sistema a 200 RPM evaluando el comportamiento del blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.

Como se explica anteriormente, el blanco a 200 RPM manifiesta valores entre 10 mpy y 16 mpy aproximadamente, a causa de la interacción entre el medio, el material, tiempo.

De igual manera en la Tabla 17 se observa una disminución de la tasa de penetración entre un intervalo 1,1745 mpy y 0,9528 mpy. Siendo este un comportamiento esperado por el inhibidor IC 5480.

Tabla 17. Datos Tasa de penetración con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 200 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) | % Eficiencia IC 5480 | Promedio % |
|-----------|------------------|---------------------------|----------------------|------------|
| 1 | 0 | 1,1745 | 92,56165373 | |
| 2 | 7,7896 | 1,1113 | 95,30661373 | |
| 3 | 16,0015 | 0,9715 | 92,85372761 | |
| 4 | 23,9915 | 0,9528 | 94,18187147 | 93,725966 |

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 18 registran los datos de Tasa de penetración; la orientación generada por parte del inhibidor C 907 se encuentra marcada por altos y bajos entre 6,9842 mpy y 7,3713 mpy; reflejando que este producto no es el adecuado para este tipo de agua.

Tabla 18. Datos tasa de penetración con 500 ppm del inhibidor C 907 a 200 RPM.

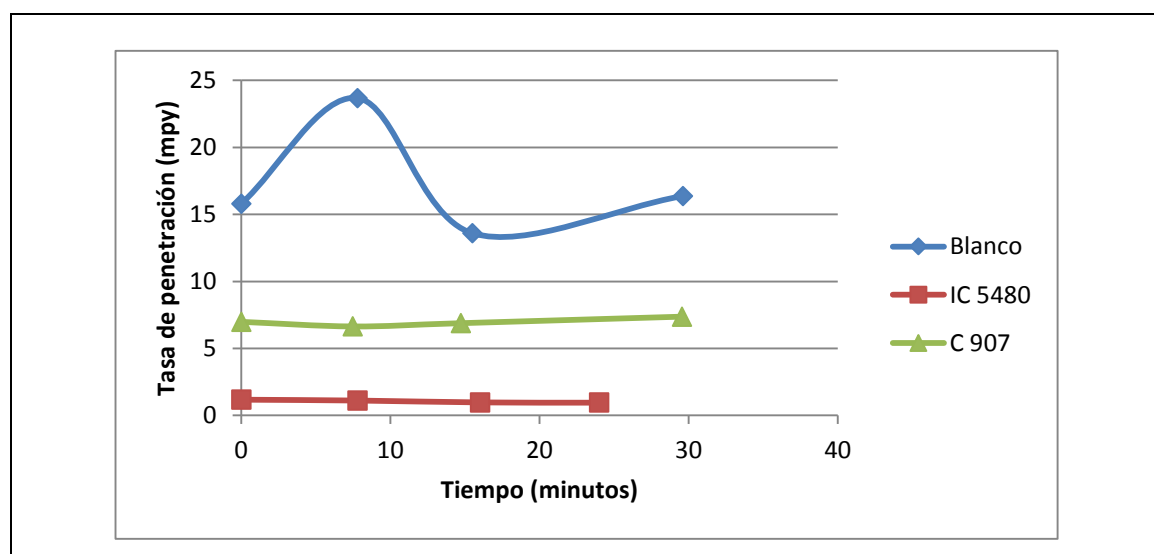
| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) | % Eficiencia C 907 | Promedio % |
|-----------|------------------|---------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 0 | 6,9842 | 55,76764747 | |
| 2 | 7,4711 | 6,6404 | 71,95540164 | |
| 3 | 14,7241 | 6,8843 | 49,35966751 | |
| 5 | 29,5553 | 7,3713 | 54,98827581 | 58,017748 |

Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 16 se observa la velocidad de corrosión en un sistema a 200 RPM, donde el inhibidor de corrosión IC 5480 representa los valores más bajos con respecto al blanco, siendo este el comportamiento deseado por el producto con un porcentaje de eficiencia de 93,7259 %.

En cambio, para el producto C 907 ilustra valores entre 5 mpy y 10 mpy, haciendo referencia a un criterio de velocidad de corrosión moderado; además se fundamenta su actividad con un porcentaje de eficiencia de 58,0177 %. La diferencia entre la respuesta de los inhibidores presenta valores entre 6,42 mpy y 5,80 mpy, siendo un aspecto en la selección del producto.

Gráfica 16. Tasa de penetración de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.



Fuente: elaboración propia.

- 3) Se desarrolla el estudio de la gráfica resultante de un sistema a 2000 RPM evaluando la tendencia del blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.
- Partiendo del análisis de resistencia a la polarización de un sistema a 2000 RPM evaluando el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.

En la Tabla 19 se particularizan los valores de cada iteración; esta tabla expone la disminución de resistencia a la polarización en un tiempo de 7,7896 minutos, teniendo en cuenta que el metal es enfrentado a un cambio brusco al momento de ser sometido a una velocidad tan elevada como 2000 RPM y a las concentraciones presentadas en el medio corrosivo.

Ahora bien, pasado este tiempo la orientación aumenta, tal como se refleja en un tiempo de 19,1300 minutos donde se presenta un valor de 596,0214 $\Omega \text{ cm}^2$ y en un tiempo de 27,6076 minutos con un valor de resistencia a la polarización de 943,3686 $\Omega \text{ cm}^2$. En otras palabras, aunque el encuentro entre el cupón y el medio tenga un impacto fuerte, el sistema tiende a buscar su estabilidad.

Tabla 19. Datos Resistencia a la polarización para el blanco a 2000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 763,3141 |
| 2 | 7,7896 | 123,114 |
| 3 | 19,13 | 596,0214 |
| 4 | 27,6076 | 943,3686 |

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 20 se establece la relación entre tiempo y resistencia a la polarización para el inhibidor IC 5480 con 250 ppm a 2000 RPM; la cual presenta un aumento en la resistencia a la polarización de 2476,4280 $\Omega \text{ cm}^2$ hasta 2749,1545 $\Omega \text{ cm}^2$ durante un tiempo de 25,5112 minutos, es decir, aunque el impacto de la aleación con el medio y la velocidad son fuertes, se tiene en cuenta la acción del inhibidor.

Tabla 20. Datos Resistencia a la polarización con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 2000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 2476,428 |
| 2 | 7,7881 | 2396,5893 |
| 3 | 16,9772 | 2909,722 |
| 4 | 25,5112 | 2749,1545 |

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 21, se presentan variaciones en la tendencia referentes a la alta velocidad a la que se somete el metal, al tipo de inhibidor y a lo sensible que puede ser el sistema al aumento de la concentración, variación que se aprecia al transcurso de 5,9696 minutos.

Tabla 21. Datos Resistencia a la polarización con 250 ppm del inhibidor C 907 a 2000 RPM.

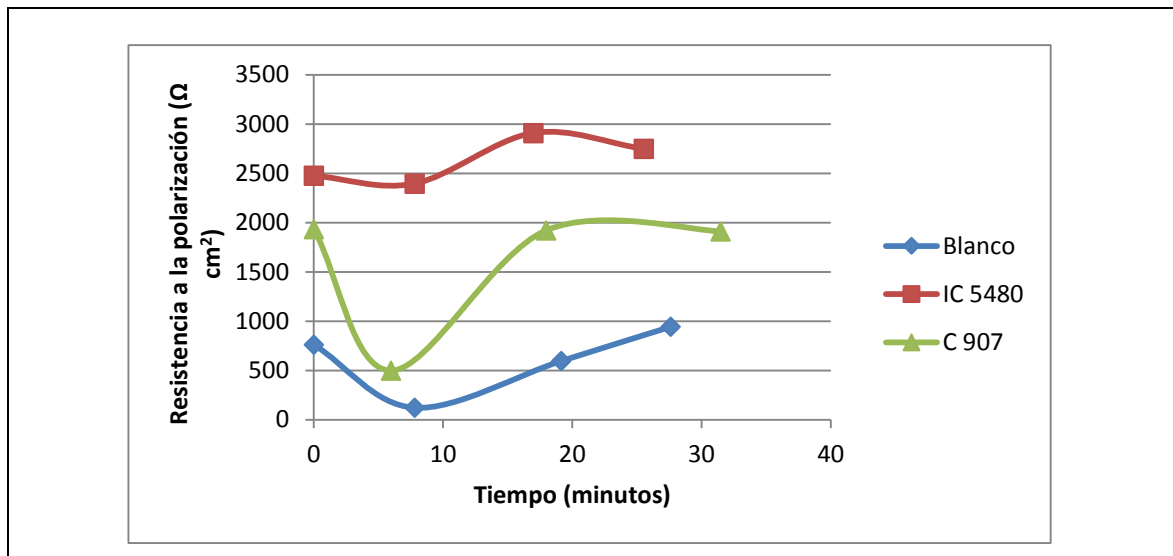
| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 1935,7902 |
| 2 | 5,9696 | 499,5671 |
| 3 | 17,978 | 1921,9212 |
| 4 | 31,4642 | 1912,8979 |

Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 17 se destaca la curva del inhibidor de corrosión IC 5480 en la parte superior, tomando valores entre $2400 \Omega \text{ cm}^2$ y $3000 \Omega \text{ cm}^2$; siendo entonces el producto destacado en esta comparación con respecto al blanco, puesto que al aumentar la resistencia a la polarización aumenta la protección del metal al medio. Aunque el producto C 907 representa una resistencia superior a la del blanco, su rango es muy amplio, y su desempeño es menor al del producto anteriormente mencionado.

Además, se observan variaciones en cuanto a la tendencia de los dos inhibidores, estos altibajos se asignan al desgaste del cupón usado en esta prueba afectando el tiempo de respuesta; en cuanto a la disimilitud entre los dos inhibidores, esta diferencia toma valores entre $1897,02 \Omega \text{ cm}^2$ y $540,63 \Omega \text{ cm}^2$.

Gráfica 17. Resistencia a la polarización para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 2000 RPM.



Fuente: elaboración propia.

- Igualmente se analiza la tasa de pérdida de masa de un sistema a 2000 RPM evaluando la tendencia del blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.

En cuanto a la tasa de pérdida de masa contra tiempo la Tabla 22 expone los datos precisos de los puntos de iteración, donde se aprecia un cambio leve en la tendencia, tal es el caso de la 0,006271 mdd en un tiempo de 7,7896 minutos hasta una tasa de 0,006544 mdd en un tiempo de 19,1300 minutos, donde se estiman pequeñas pérdidas de masa en consecuencia al impacto termodinámico que se desarrolla.

Tabla 22. Datos Tasa pérdida de masa para el blanco a 2000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa pérdida de masa (mdd) |
|-----------|------------------|----------------------------|
| 1 | 0 | 0,007436 |
| 2 | 7,7896 | 0,006271 |
| 3 | 19,13 | 0,006544 |
| 4 | 27,6076 | 0,006349 |

Fuente: elaboración propia.

De igual forma en la Tabla 23 se especifica el comportamiento del inhibidor IC 5480, en el cual se da un aumento en la tasa de pérdida de masa desde 0,0001602 mdd hasta 0,0002210 mdd, reflejando bajas pérdidas del material.

Tabla 23. Datos Tasa pérdida de masa con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 2000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa pérdida de masa (mdd) | % Eficiencia IC 5480 | Promedio % |
|-----------|------------------|----------------------------|----------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,0001602 | 97,84561592 | |
| 2 | 7,7881 | 0,0001655 | 97,36086749 | |
| 3 | 16,9772 | 0,0002085 | 96,81387531 | |
| 4 | 25,5112 | 0,000221 | 96,51913687 | 97,134873 |

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, en la Tabla 24 las tasas de pérdida de masa aumentan con el transcurso del tiempo, pues asciende su orientación en un rango de 0,0001400 mdd hasta 0,002402 mdd.

Tabla 24. Datos Tasa pérdida de masa con 250 ppm del inhibidor C 907 a 2000 RPM.

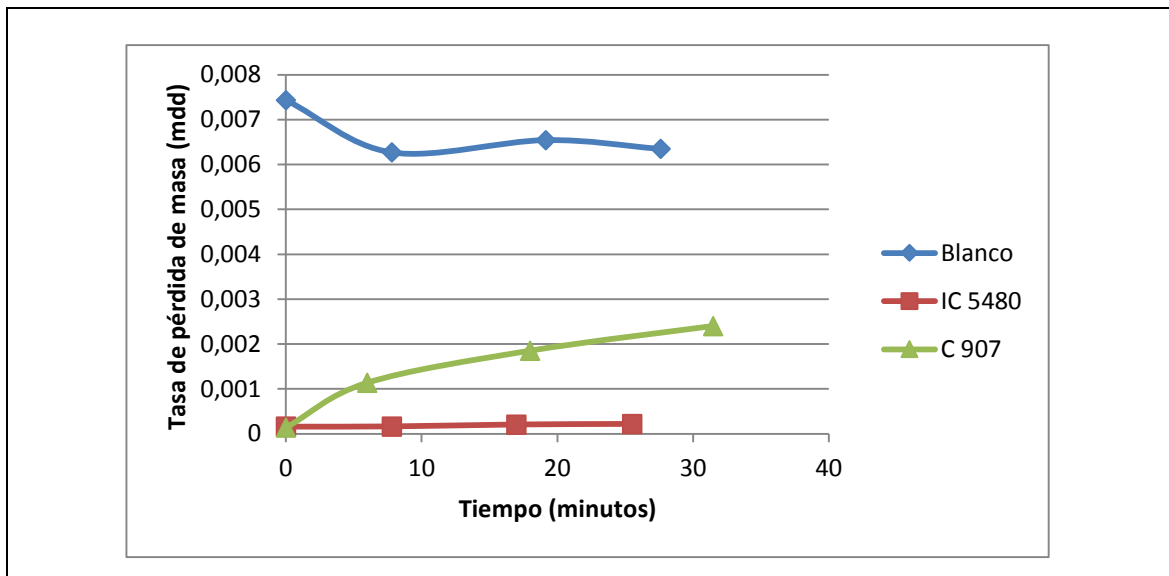
| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa pérdida de masa (mdd) | % Eficiencia C 907 | Promedio % |
|-----------|------------------|----------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,00014 | 98,11726735 | |
| 2 | 5,9696 | 0,001136 | 81,88486685 | |
| 3 | 17,978 | 0,001852 | 71,6992665 | |
| 5 | 31,4642 | 0,002402 | 62,16727044 | 78,467167 |

Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 18 se observan las mayores tasas de pérdida de masa para el blanco, tomando datos entre 0,0074 mdd hasta 0,006 aproximadamente. A partir de esta referencia el producto C 907 se posiciona en un rango menor, pero presenta un aumento en la tendencia.

Sin embargo, el inhibidor de corrosión IC 5480, además de tener un comportamiento constante, cuenta con un soporte en el porcentaje de eficiencia de 97,1348 %. Además, la discrepancia entre la respuesta de los dos productos se aproxima a 0,0021 mdd, percibiendo una mejor actividad por parte del producto IC 5480.

Gráfica 18. Tasa pérdida de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 2000 RPM.



Fuente: elaboración propia.

- También se estudia la tasa de penetración de un sistema a 2000 RPM evaluando el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.

De igual manera en la Tabla 25, la tasa de penetración presenta una tasa desde 9,6395 mpy en un tiempo de 0 minutos hasta 9,2064 mpy en un tiempo de 27,6076 minutos, donde se reflejan variaciones debido al impacto termodinámico que presenta el metal con respecto al medio corrosivo.

Tabla 25. Datos Tasa de penetración para blanco a 2000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) |
|-----------|------------------|---------------------------|
| 1 | 0 | 9,6395 |
| 2 | 7,7896 | 15,5937 |
| 3 | 19,13 | 10,3257 |
| 4 | 27,6076 | 9,2064 |

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la Tabla 26 expone valores comprendidos entre 1,201 mpy hasta 0,8524 mpy, evidenciando variaciones en su tasa de penetración gracias al efecto inhibidor del producto IC 5480.

Tabla 26. Datos Tasa de penetración con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 2000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) | % Eficiencia IC 5480 | Promedio % |
|-----------|------------------|---------------------------|----------------------|------------|
| 1 | 0 | 1,201 | 87,54084755 | |
| 2 | 7,7881 | 1,0063 | 93,54675286 | |
| 3 | 16,9772 | 0,9972 | 90,34254336 | |
| 4 | 25,5112 | 0,8524 | 90,7412235 | 90,542841 |

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 27 se obtiene el registro numérico resultante de la relación entre tiempo y tasa de penetración en presencia del producto C 907, la cual maneja un intervalo entre 3,8276 mpy y 5,7344 mpy, al optar por una tendencia casi lineal expresa una dificultad para ejecutar el ataque de la corrosión, debido al efecto del inhibidor de corrosión base agua.

Tabla 27. Datos Tasa de penetración con 250 ppm del inhibidor C 907 a 2000 RPM.

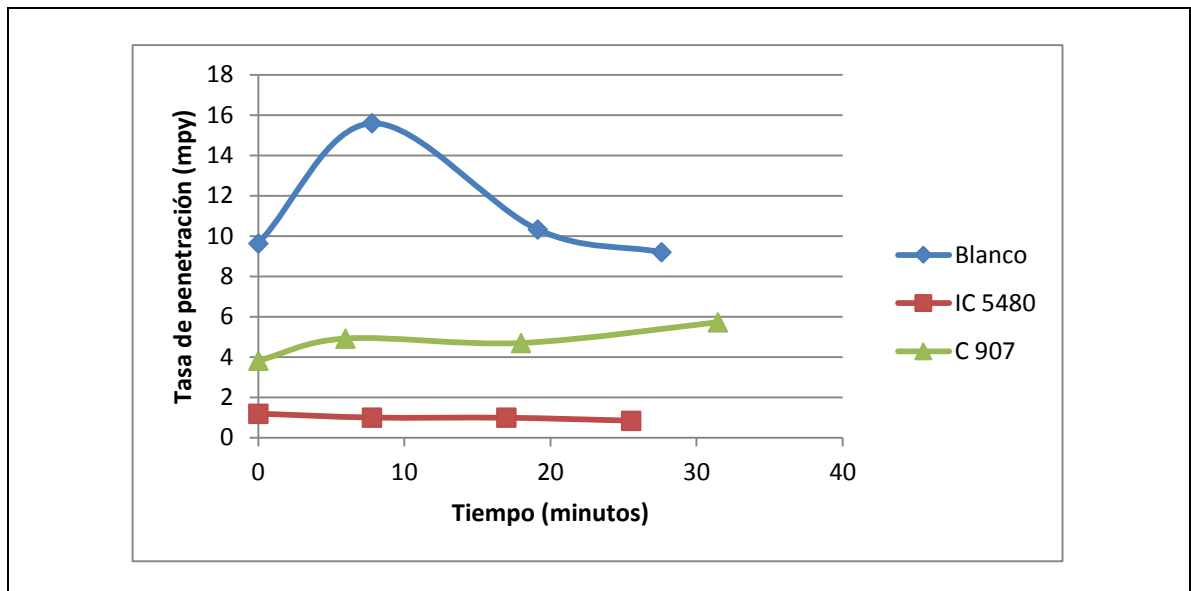
| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) | % Eficiencia C 907 | Promedio % |
|-----------|------------------|---------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 0 | 3,8276 | 60,29254629 | |
| 2 | 5,9696 | 4,9254 | 68,41416726 | |
| 3 | 17,978 | 4,7027 | 54,45635647 | |
| 5 | 31,4642 | 5,7344 | 37,71289538 | 55,218991 |

Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 19 se muestra una tasa de penetración severa con valores superiores a 10 mpy a 2000 RPM, donde el inhibidor de corrosión IC 5480 representa los valores más bajos con respecto al blanco, siendo este el comportamiento deseado por el producto aplicado con un porcentaje de eficiencia de 90,5428 %.

Por otra parte, para el producto C 907 ilustra valores entre 4 mpy y 6 mpy, haciendo referencia a un criterio de velocidad de corrosión leve; además se fundamenta su actividad con un porcentaje de eficiencia de 55,2189 %. La desigualdad entre los dos productos es considerable, al comparar valores por el orden de 0,8524 mpy y 5,7344 mpy, contribuyendo a la selección del producto.

Gráfica 19. Tasa de penetración para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 2000 RPM.



Fuente: elaboración propia.

- 4) Se realiza el análisis de la gráfica resultante de un sistema a 2000 RPM evaluando el comportamiento del blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.
- Partiendo del análisis de la resistencia a la polarización de un sistema a 2000 RPM evaluando el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.

Como se menciona anteriormente, el blanco a 2000 RPM presenta datos cercanos a $700 \Omega \text{ cm}^2$ y $1000 \Omega \text{ cm}^2$.

En la Tabla 28 se revela el comportamiento del proceso gracias al efecto inhibidor del producto IC 5480, allí se observa un incremento en la resistencia de la polarización, tomando valores de $2127,6701 \Omega \text{ cm}^2$ a $2268,7893 \Omega \text{ cm}^2$ siendo cifras esperadas por parte del producto a pesar del impacto termodinámico que altera el sistema.

Tabla 28. Datos Resistencia a la polarización con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 2000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 2127,6701 |
| 2 | 7,6222 | 2636,4567 |
| 3 | 15,976 | 2153,6241 |
| 4 | 24,1551 | 2268,7893 |

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 29, el inhibidor de corrosión en base agua C 907 con 500 ppm a 2000 RPM, presenta una tendencia de incremento entre los valores 1298,0241 $\Omega \text{ cm}^2$ y 1366,1347 $\Omega \text{ cm}^2$ debido al aumento de la concentración del inhibidor y a su compatibilidad con el sistema.

Tabla 29. Datos Resistencia a la polarización con 500 ppm del inhibidor C 907 a 2000 RPM.

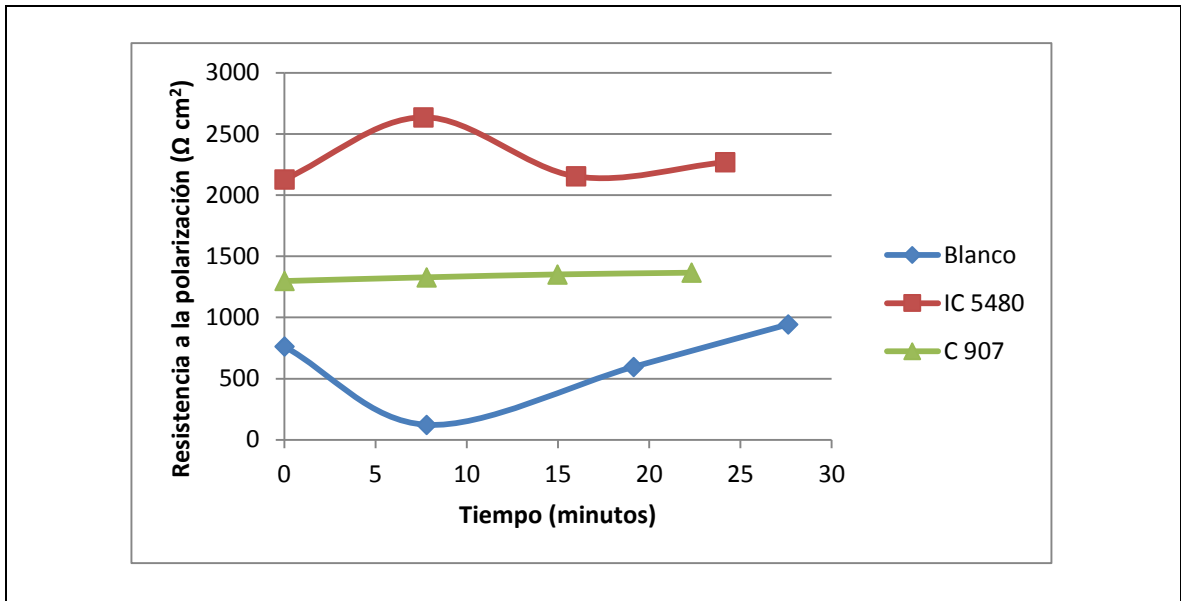
| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 1298,0241 |
| 2 | 7,7881 | 1328,3456 |
| 3 | 14,9573 | 1352,0694 |
| 4 | 22,3119 | 1366,1347 |

Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 20 se compara de manera simultánea la acción de los dos productos ensayados; en primera instancia con cifras entre 2000 $\Omega \text{ cm}^2$ y 2700 $\Omega \text{ cm}^2$ se encuentra la curva correspondiente al inhibidor de corrosión base agua IC 5480, siendo este el producto con la mayor resistencia a la polarización con respecto al blanco.

Además, aunque el inhibidor C 907 presenta un comportamiento constante los valores que toma no son tan separados del blanco, es decir, este producto no es conveniente para esta clase de agua de formación. Los valores de resistencia a la polarización del producto IC 5480, supera por más de 800 $\Omega \text{ cm}^2$ al inhibidor C 907, interpretación que contribuye a la selección realizada.

Gráfica 20. Resistencia a la polarización para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm a 2000 RPM.



Fuente: elaboración propia.

- Además, se estudia la tasa de pérdida de masa de un sistema a 2000 RPM evaluando la tendencia del blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.

Como se ha mencionado anteriormente, el blanco se mantiene en un rango de 0,6 mdd y 0,75 mdd en cuanto a la tasa de pérdida de masa.

De forma semejante se aprecia en la Tabla 30 la reducción en la tasa de pérdida de masa con valores de 0,0003107 mdd a 0,0002350 mdd, siendo estos los resultados esperados por parte del producto aplicado al campo.

Tabla 30. Datos Tasa pérdida de masa con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 2000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa pérdida de masa (mdd) | % Eficiencia IC 5480 | Promedio % |
|-----------|------------------|----------------------------|----------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,0003107 | 95,82167832 | |
| 2 | 7,6222 | 0,0002907 | 95,3643757 | |
| 3 | 15,976 | 0,0002582 | 96,05440098 | |
| 4 | 24,1551 | 0,000235 | 96,29862971 | 95,884771 |

Fuente: elaboración propia.

Agregando a lo anterior, en la Tabla 31 se establece una tasa de pérdida de masa de manera constante, soportado por el registro de datos que se inicia en 0,004331 mdd y finaliza en 0,004083 mdd.

Tabla 31. Datos Tasa pérdida de masa con 500 ppm del inhibidor C 907 a 2000 RPM.

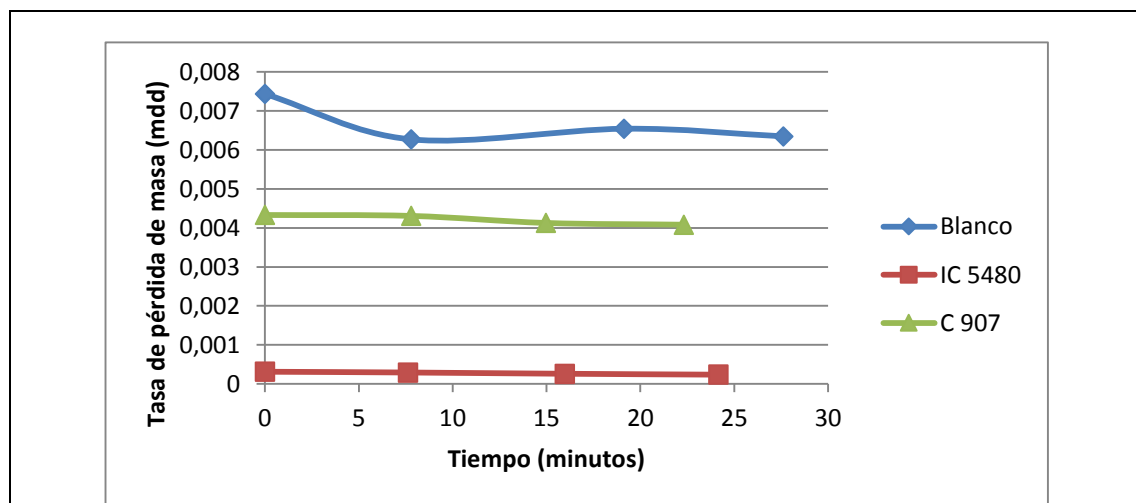
| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de pérdida de masa (mdd) | % Eficiencia C 907 | Promedio % |
|-----------|------------------|-------------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,004331 | 41,7563206 | |
| 2 | 7,7881 | 0,004308 | 31,30282252 | |
| 3 | 14,9573 | 0,004127 | 36,93459658 | |
| 4 | 22,3119 | 0,004083 | 35,69065995 | 36,421099 |

Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 21 se diferencia el comportamiento de los dos inhibidores de corrosión base agua. Para iniciar, se encuentra el producto IC 5480 con valores entre 0 mdd y 0,001 mdd, datos que representan una pérdida de masa mínima con respecto al blanco; considerando un promedio de porcentaje de eficiencia del 95,8847 %.

En cambio, el producto C 907 a pesar de disminuir la tasa de pérdida de masa, sin embargo, presenta datos cercanos al blanco; resultados soportados por un porcentaje de eficiencia del 36,4210 %. La desigualdad establecida por los productos evidencia la mayor pérdida de masa al utilizar el inhibidor C 907, reflejando que dicho producto no es apto para este tipo de medio corrosivo.

Gráfica 21. Tasa pérdida de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm a 2000 RPM.



Fuente: elaboración propia.

- Incluso se analiza la tasa de penetración de un sistema a 2000 RPM evaluando la tendencia del blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.

Como se ha nombrado anteriormente para el blanco se presenta una velocidad de corrosión severa, con un rango entre 9 mpy y 16 mpy aproximadamente.

Así mismo en la Tabla 32 se plantean los valores de la tasa de penetración, en ella se observa tendencia a la baja con datos de 0,9537 mpy a 0,8225 mpy en cuanto a tasa de penetración; valores correspondientes a un efecto protector del inhibidor.

Tabla 32. Datos Tasa de penetración con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 2000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) | % Eficiencia IC 5480 | Promedio % |
|-----------|------------------|---------------------------|----------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,9537 | 90,10633332 | |
| 2 | 7,6222 | 0,9276 | 94,05144385 | |
| 3 | 15,976 | 0,9373 | 90,92264931 | |
| 4 | 24,1551 | 0,8225 | 91,06599757 | 91,536606 |

Fuente: elaboración propia.

Del mismo modo la tasa de penetración explicada en la Tabla 33 aumenta, comprobando la baja funcionalidad del inhibidor de corrosión base agua en esta clase de agua al tomar valores de 4,5782 mpy a 7,9632 mpy.

Tabla 33. Datos Tasa de penetración con 500 ppm del inhibidor C 907 a 2000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) | % Eficiencia C 907 | Promedio % |
|-----------|------------------|---------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 0 | 4,5782 | 52,50583536 | |
| 2 | 7,7881 | 5,6745 | 63,61030416 | |
| 3 | 14,9573 | 7,865 | 23,83082987 | |
| 4 | 22,3119 | 7,9632 | 13,50364964 | 38,362654 |

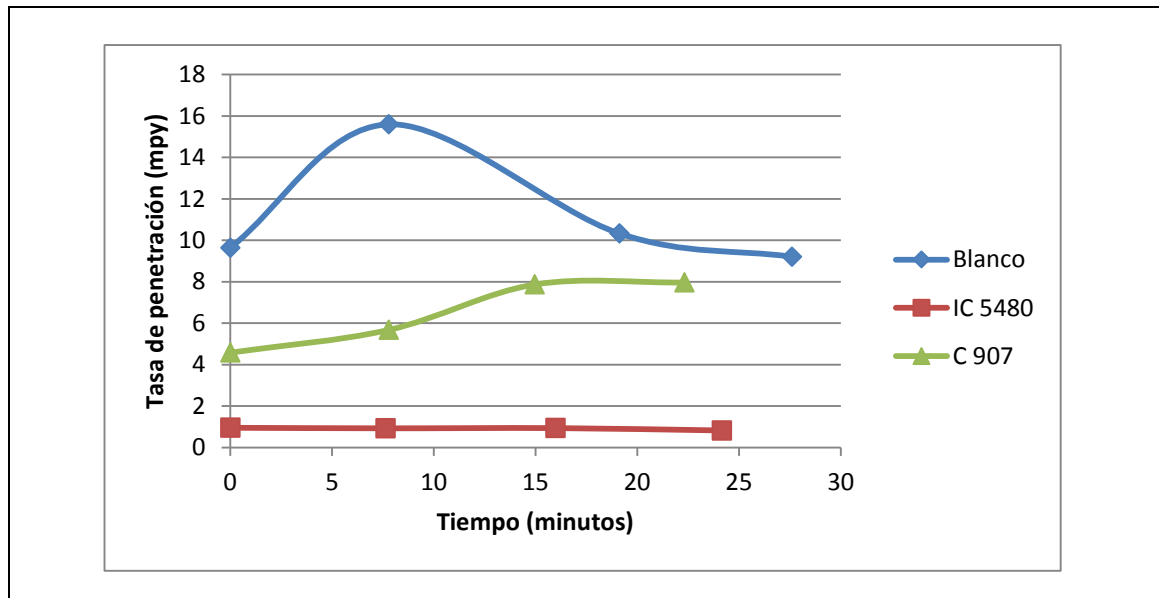
Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la Gráfica 22 el inhibidor de corrosión C 907 aumenta la tasa de penetración, y con un porcentaje de eficiencia de 38,3626 % con respecto al blanco, se queda sin cumplir con las expectativas de actividad.

Como producto adecuado para este tipo de agua de formación, el inhibidor IC 5480 se caracteriza en esta prueba por adquirir valores bajos en la velocidad de corrosión y conformar una tendencia lineal, valores totalmente sustentados por un

porcentaje de eficiencia de 91,5366 %. Con una desemejanza alrededor de 7 mpy entre los productos, se establece el inhibidor IC 5480 como el producto sobresaliente en esta prueba.

Gráfica 22. Tasa de penetración para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm a 2000 RPM.



Fuente: elaboración propia.

- 5) Se realiza el análisis de la gráfica resultante de un sistema a 4000 RPM evaluando el comportamiento del blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.

 - Se desarrolla el análisis las gráficas resultantes de un sistema a 4000 RPM evaluando el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.

En el registro de la Tabla 34 se inicia el proceso con una caída en la resistencia, indicado en un cambio de $629,8790 \Omega \text{ cm}^2$ a $542,9005 \Omega \text{ cm}^2$ durante un lapso de tiempo de 7,7844 minutos, lo cual es normal debido al choque termodinámico presente entre el metal y el medio corrosivo.

Tabla 34. *Datos Resistencia a la polarización para el blanco a 4000 RPM.*

| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 629,879 |
| 2 | 7,7844 | 542,9005 |
| 3 | 15,8634 | 566,0554 |
| 4 | 23,8192 | 541,7815 |

Fuente: elaboración propia.

La resistencia por polarización a 4000 RPM por parte del inhibidor IC 5480 con 250 ppm mostrada en la Tabla 35, presenta al inicio del proceso una caída entendible por las condiciones del sistema, sustentado por los valores registrados de 2879,6326 $\Omega \text{ cm}^2$ en un tiempo de 0 minutos a 2511,8949 $\Omega \text{ cm}^2$ en 7,7860 minutos; sin embargo, el sistema busca su etapa de acondicionamiento y por ende un aumento de resistencia hasta 2646,1007 $\Omega \text{ cm}^2$.

Tabla 35. *Datos Resistencia a la polarización con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 4000 RPM.*

| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 2879,6326 |
| 2 | 7,786 | 2511,8949 |
| 3 | 20,7647 | 2521,4784 |
| 4 | 29,0257 | 2646,1007 |

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 36 se muestra de manera detallada el comportamiento del inhibidor C 907 a lo largo del procedimiento, allí la resistencia a la polarización a 4000 RPM presenta una disminución, puesto que en un tiempo de 22,0623 minutos el sistema sufre un cambio de 1255,6081 $\Omega \text{ cm}^2$ a 1194,9016 $\Omega \text{ cm}^2$, esto se debe a las altas condiciones de operación a las cuales está sometida la aleación.

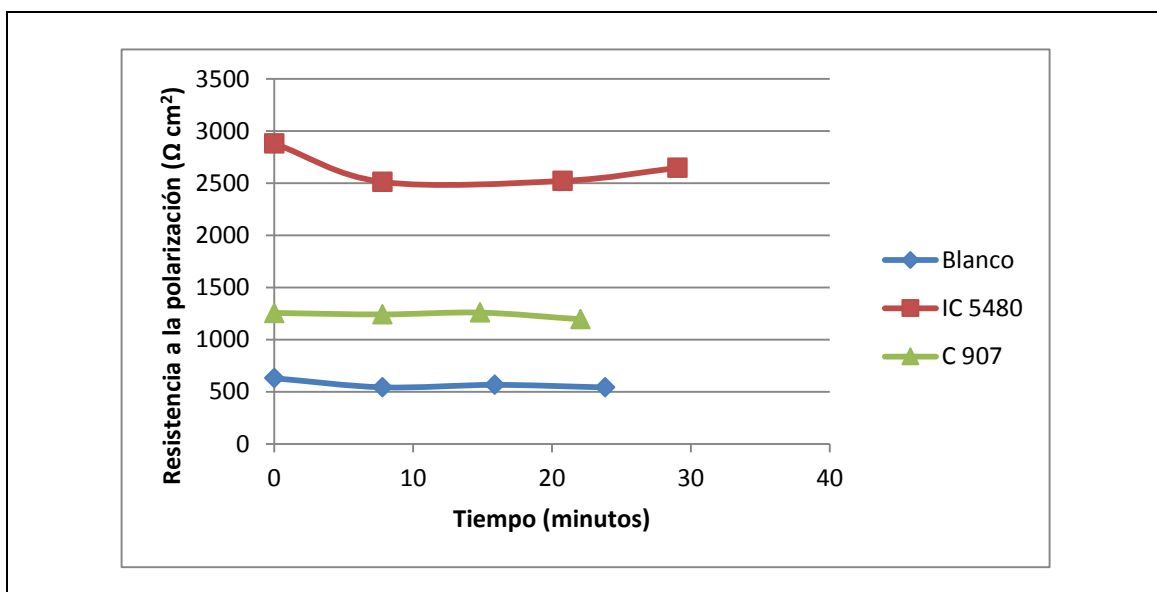
Tabla 36. *Datos Resistencia a la polarización con 250 ppm del inhibidor C 907 a 4000 RPM.*

| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 1255,6081 |
| 2 | 7,786 | 1241,5368 |
| 3 | 14,813 | 1259,0712 |
| 4 | 22,0623 | 1194,9016 |

Fuente: elaboración propia.

Aunque el producto C 907 en la Gráfica 23 se representa sobre la curva del blanco, mostrando una resistencia a la polarización mayor a esta; es sobrepasado por el producto IC 5480 que adquiere valores entre 2500 Ω cm² y 3000 Ω cm² aproximadamente, sobresaliendo por su actividad en esta prueba. Al percatarse por parte de los dos productos una actividad de protección se establece una diferencia de respuesta entre los productos hasta un valor de 1624,02 Ω cm².

Gráfica 23. Resistencia a la polarización para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 4000 RPM.



Fuente: elaboración propia.

- Igualmente se analiza la tasa de pérdida de masa de un sistema a 4000 RPM evaluando el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.

En la Tabla 37 refleja un aumento de la tasa de pérdida de masa desde 0,006298 mdd hasta 0,007322 mdd, debido a la falta de protección de la aleación en el medio corrosivo.

Tabla 37. Datos Tasa pérdida de masa para el blanco a 4000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de pérdida de masa (mdd) |
|-----------|------------------|-------------------------------|
| 1 | 0 | 0,006298 |
| 2 | 7,7844 | 0,007307 |
| 3 | 15,8634 | 0,007008 |
| 4 | 23,8192 | 0,007322 |

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la Tabla 38, revela un aumento en la tasa de pérdida de masa de 0,0000192 mdd durante un lapso 7,7860 minutos, siendo un comportamiento normal debido al impacto termodinámico bajo condiciones de 4000 RPM a pesar de ello no es una pérdida significativa de material.

Tabla 38. Datos Tasa pérdida de masa con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 4000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa pérdida de masa (mdd) | % Eficiencia IC 5480 | Promedio % |
|-----------|------------------|----------------------------|----------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,0001387 | 97,79771356 | |
| 2 | 7,786 | 0,0001579 | 97,83905844 | |
| 3 | 20,7647 | 0,0001585 | 97,73829909 | |
| 4 | 29,0257 | 0,0001523 | 97,91996722 | 97,823759 |

Fuente: elaboración propia.

De igual forma se estudia la Tabla 39 referente a la tasa de pérdida de masa, que muestra una variación de 0,001531 mdd a 0,002035 mdd en un intervalo de 14,8130 minutos a 22,0623 minutos, aunque es un aumento en la tasa de pérdida los valores numéricos no expresan una alteración considerable, pues el medio ha entrado en contacto con el inhibidor base agua.

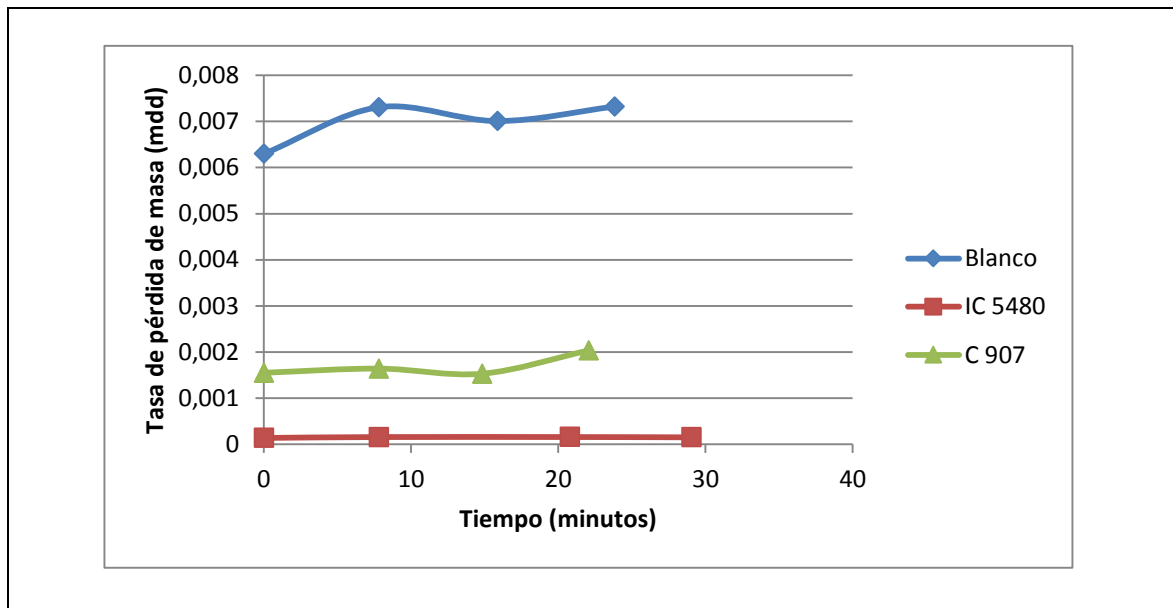
Tabla 39. Datos Tasa pérdida de masa para el inhibidor C 907 con 250 ppm a 4000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de pérdida de masa (mdd) | % Eficiencia C 907 | Promedio % |
|-----------|------------------|-------------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,001552 | 75,35725627 | |
| 2 | 7,786 | 0,001642 | 77,52839743 | |
| 3 | 14,813 | 0,001531 | 78,15353881 | |
| 4 | 22,0623 | 0,002035 | 72,20704725 | 75,811559 |

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la Gráfica 24 el inhibidor de corrosión base agua con un menor índice de pérdida de masa es el IC 5480, fundamentado con una eficiencia del 97,8237 %, caso contrario, es el del producto C 907 que a pesar de manejar un rango entre 0,001 mdd y 0,002 mdd presenta una eficiencia de 75,8115 %. La diferencia de respuesta entre los inhibidores es notable al oscilar valores entre 0,0018 mdd y 0,0014 mdd aproximadamente.

Gráfica 24. Tasa pérdida de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 4000 RPM.



Fuente: elaboración propia.

- Además, se estudia la tasa de penetración de un sistema a 4000 RPM evaluando el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm.

En la Tabla 40 se observa la mayor tasa de penetración con un punto básico de 11,9426 mpy a 23,6437 mpy en un periodo de 7,7844 minutos; sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, el sistema busca su estabilidad.

Tabla 40. Datos Tasa de penetración para el blanco a 4000 RPM.

| Sección Blanco | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) |
|----------------|------------------|---------------------------|
| 1 | 0 | 11,9426 |
| 2 | 7,7844 | 23,6437 |
| 3 | 15,8634 | 10,3795 |
| 4 | 23,8192 | 9,2647 |

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la tasa de penetración descrita en la Tabla 41, se estima una disminución de 0,0586 mpy en 7,7860 minutos, es decir, se evidencia una alta dificultad para la acción de la corrosión, en consecuencia, del efecto protector del producto.

Tabla 41. Datos Tasa de penetración con 250 ppm del inhibidor IC 5480 a 4000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) | % Eficiencia IC 5480 | Promedio % |
|-----------|------------------|---------------------------|----------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,5479 | 95,41222179 | |
| 2 | 7,786 | 0,4893 | 97,93052695 | |
| 3 | 20,7647 | 0,4824 | 95,35237728 | |
| 4 | 29,0257 | 0,479 | 94,82983799 | 95,881241 |

Fuente: elaboración propia.

Así mismo en la Tabla 42 se aprecia un aumento de 3,1807 mpy en un lapso 0 minutos a 22,0623 minutos, verificando la baja acción del producto C 907 en esta agua de formación.

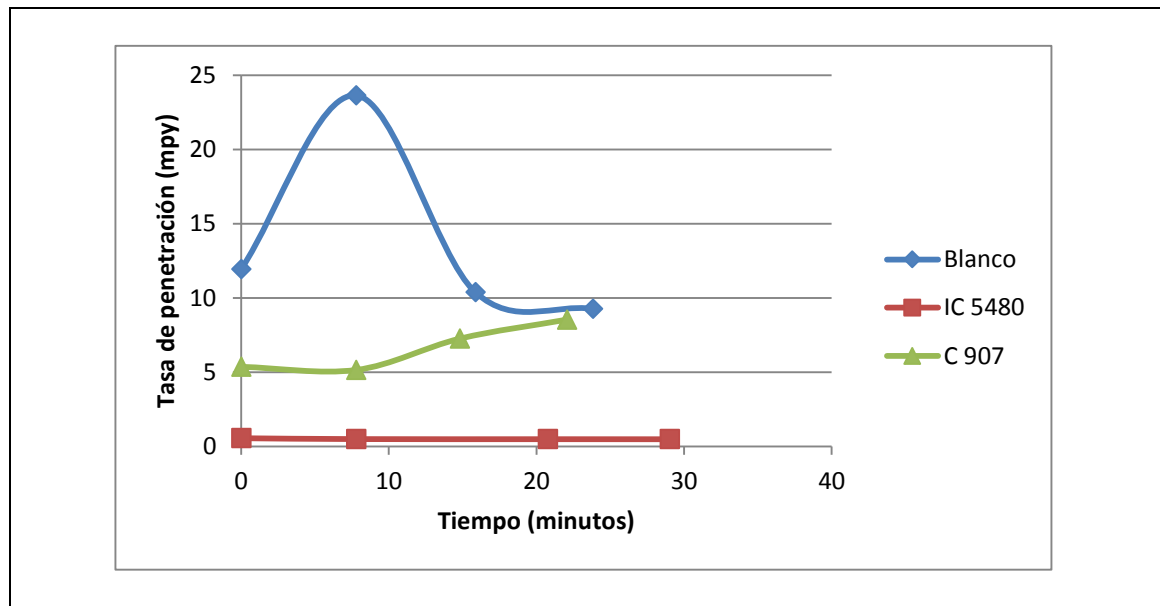
Tabla 42. Datos Tasa de penetración con 250 ppm del inhibidor C 907 a 4000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) | % Eficiencia C 907 | Promedio % |
|-----------|------------------|---------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 0 | 5,3574 | 55,14042168 | |
| 2 | 7,786 | 5,1468 | 78,23183343 | |
| 3 | 14,813 | 7,2579 | 30,07466641 | |
| 4 | 22,0623 | 8,5381 | 7,842671646 | 42,822398 |

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la velocidad de corrosión descrita en la Gráfica 25, el inhibidor C 907 conserva valores cercanos al blanco con una eficiencia de 42,8223 %, y el producto IC 5480 conserva una tasa de penetración baja soportada por una eficiencia de 95,8812 %. Con un valor máximo de 8 mpy aproximadamente, se establece la diferencia de respuesta entre los dos productos evaluados.

Gráfica 25. Tasa de penetración para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 250 ppm y el inhibidor C 907 con 250 ppm a 4000 RPM.



Fuente: elaboración propia.

- 6) Se desarrolla el estudio de la gráfica resultante de un sistema a 4000 RPM evaluando el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.

 - Se lleva a cabo el análisis de los resultados relacionados a la resistencia a la polarización de un sistema a 4000 RPM evaluando el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.

Como se ha hecho referencia anteriormente, el blanco proporciona valores alrededor a $600 \Omega \text{ cm}^2$ y $700 \Omega \text{ cm}^2$ para el aspecto de resistencia a la polarización.

De acuerdo con la Tabla 43, se presenta una tendencia ascendente desde $2260,1304 \Omega \text{ cm}^2$ a $2321,9809 \Omega \text{ cm}^2$ en 22,397 minutos, siendo este un comportamiento deseado con la aplicación del producto IC 5480 en campo petrolero.

Tabla 43. Datos Resistencia a la polarización con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 4000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 2260,1304 |
| 2 | 7,786 | 2294,4112 |
| 3 | 15,2462 | 2312,7405 |
| 4 | 22,397 | 2321,9809 |

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 44 se especifican los valores tanto de tiempo como de resistencia a la polarización del proceso, donde una se tiene una orientación descendente desde un punto inicial de 1195,4848 mpy hasta 944,794 mpy al paso de un tiempo de 25,9168 minutos, este comportamiento se debe al efecto del inhibidor en las concentraciones aplicadas.

Tabla 44. Datos Resistencia a la polarización con 500 ppm del inhibidor C 907 a 4000 RPM.

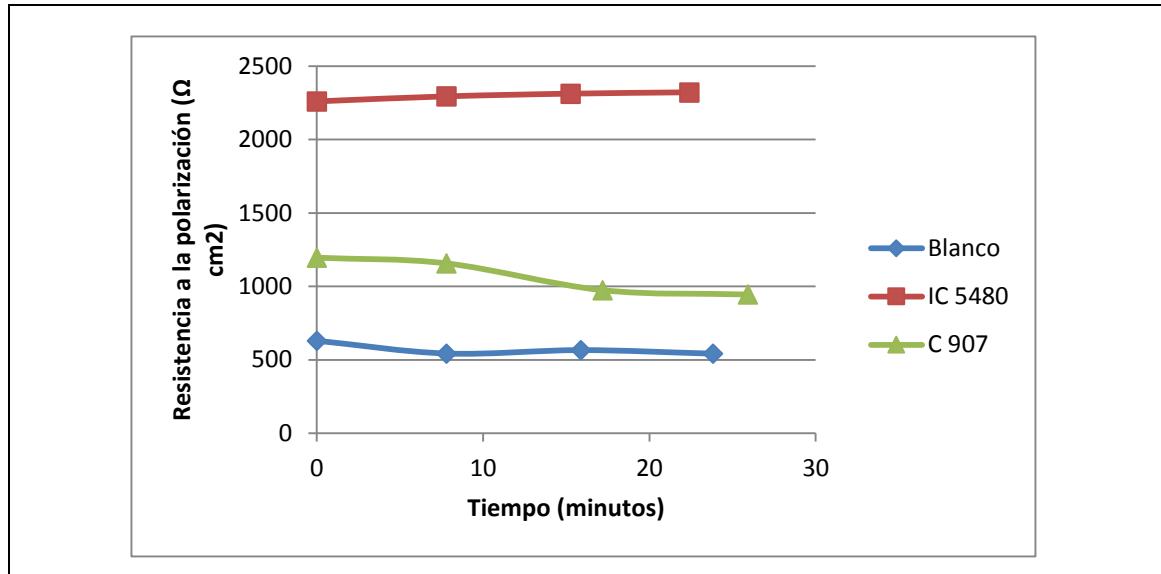
| Iteración | Tiempo (minutos) | Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) |
|-----------|------------------|---|
| 1 | 0 | 1195,4848 |
| 2 | 7,7878 | 1156,7729 |
| 3 | 17,1754 | 974,2838 |
| 4 | 25,9168 | 944,794 |

Fuente: elaboración propia.

A pesar de que el inhibidor de corrosión base agua C 907 en la Gráfica 26 se muestra sobre la curva del blanco, mostrando una resistencia a la polarización mayor a esta; sus valores son contiguos haciendo más fácil el ataque de la corrosión en la aleación.

El producto IC 5480 se destaca por su actividad en este aspecto adquiriendo cifras entre $200 \Omega \text{ cm}^2$ y $2500 \Omega \text{ cm}^2$ aproximadamente. La desigualdad de actividad que se establece por parte de los productos se evidencia con un aumento casi del doble en valores de resistencia a la polarización, contribuyendo a la selección del inhibidor IC 5480.

Gráfica 26. Resistencia a la polarización para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm a 4000 RPM.



Fuente: elaboración propia.

- Inclusive se estudia la tasa de pérdida de masa para un sistema de 4000 RPM evaluando el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.

Como se ha nombrado anteriormente, el blanco proporciona valores alrededor a 0,006 mdd y 0,008 mdd para el aspecto de tasa de pérdida de masa.

Además, se observan los datos de la Tabla 45, en la cual existe una reducción en la tasa de pérdida de masa desde 0,0001525 mdd hasta 0,00012232 mdd gracias al efecto inhibitor del producto IC 5480.

Tabla 45. Datos Tasa pérdida de masa con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 4000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa pérdida de masa (mdd) | % Eficiencia IC 5480 | Promedio % |
|-----------|------------------|----------------------------|----------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,0001525 | 97,57859638 | |
| 2 | 7,786 | 0,0001347 | 98,1565622 | |
| 3 | 15,2462 | 0,0001347 | 98,07791096 | |
| 4 | 22,397 | 0,0001232 | 98,31739962 | 98,032617 |

Fuente: elaboración propia.

Este resultado se soporta con la Tabla 46, pues existe un incremento en la tasa de pérdida de masa comprendida entre los valores 0,002029 mdd y 0,004856 mdd.

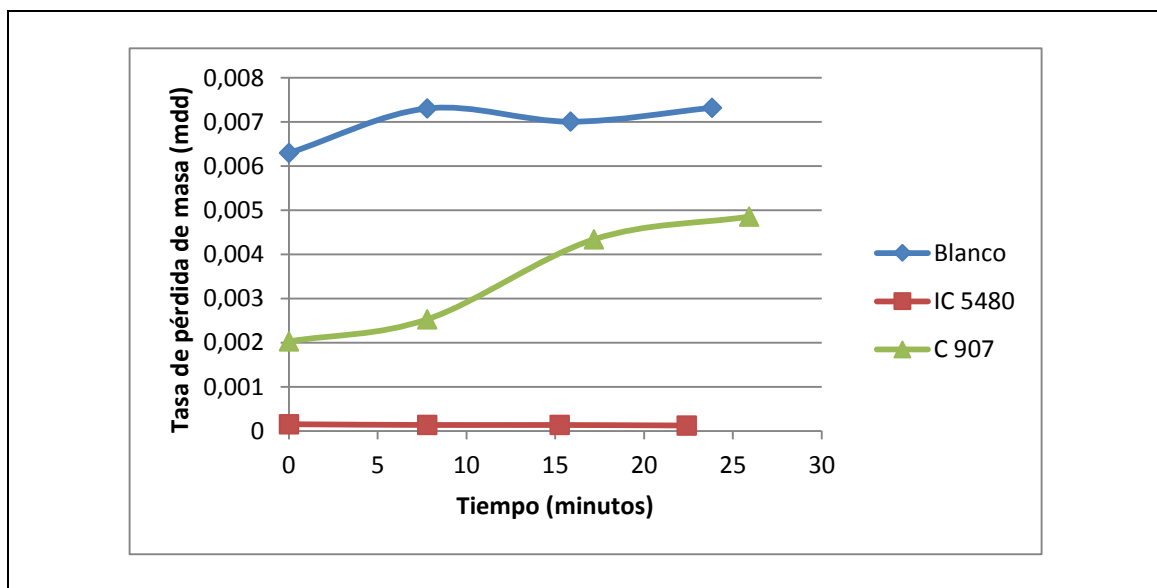
Tabla 46. Datos Tasa pérdida de masa con 500 ppm del inhibidor C 907 a 4000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de pérdida de masa (mdd) | % Eficiencia C 907 | Promedio % |
|-----------|------------------|-------------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,002029 | 67,78342331 | |
| 2 | 7,7878 | 0,00253 | 65,37566717 | |
| 3 | 17,1754 | 0,00434 | 38,07077626 | |
| 4 | 25,9168 | 0,004856 | 33,67932259 | 51,227297 |

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la Gráfica 27 el inhibidor de corrosión base agua con un menor índice de pérdida de masa es el IC 5480, fundamentado con una eficiencia del 98,0326 %, caso contrario, es el del producto C 907 que toma valores muy cercanos al blanco y presenta una eficiencia de 51,2272 %. La desigualdad de respuesta entre los productos alcanza un valor máximo de 0,0047 mdd aproximadamente, siendo un valor considerable en cuanto a la pérdida de masa de una tubería en campo.

Gráfica 27. Tasa pérdida de masa para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm a 4000 RPM.



Fuente: elaboración propia.

- También se analiza la tasa de penetración de un sistema a 4000 RPM evaluando el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm.

Como se ha indicado anteriormente, el blanco proporciona valores alrededor de 9 mpy y 24 mpy para el aspecto de tasa de penetración.

Resultados que toman más fuerza con los datos registrados en la Tabla 47, donde se expone una disminución de la tasa de penetración de 0,9523 mpy a 0,7954 mpy gracias al efecto del inhibidor IC 5480 aplicado al medio.

Tabla 47. Datos Tasa de penetración con 500 ppm del inhibidor IC 5480 a 4000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) | % Eficiencia IC 5480 | Promedio % |
|-----------|------------------|---------------------------|----------------------|------------|
| 1 | 0 | 0,9523 | 92,02602448 | |
| 2 | 7,786 | 0,9536 | 95,96679031 | |
| 3 | 15,2462 | 0,8474 | 91,83583024 | |
| 4 | 22,397 | 0,7954 | 91,41472471 | 92,810842 |

Fuente: elaboración propia.

Al igual que en la Tabla 48, se presenta un incremento de la tasa de penetración, teniendo en cuenta el intervalo de 3,6345 mpy a 5,3653 mpy, debido a las condiciones de operación.

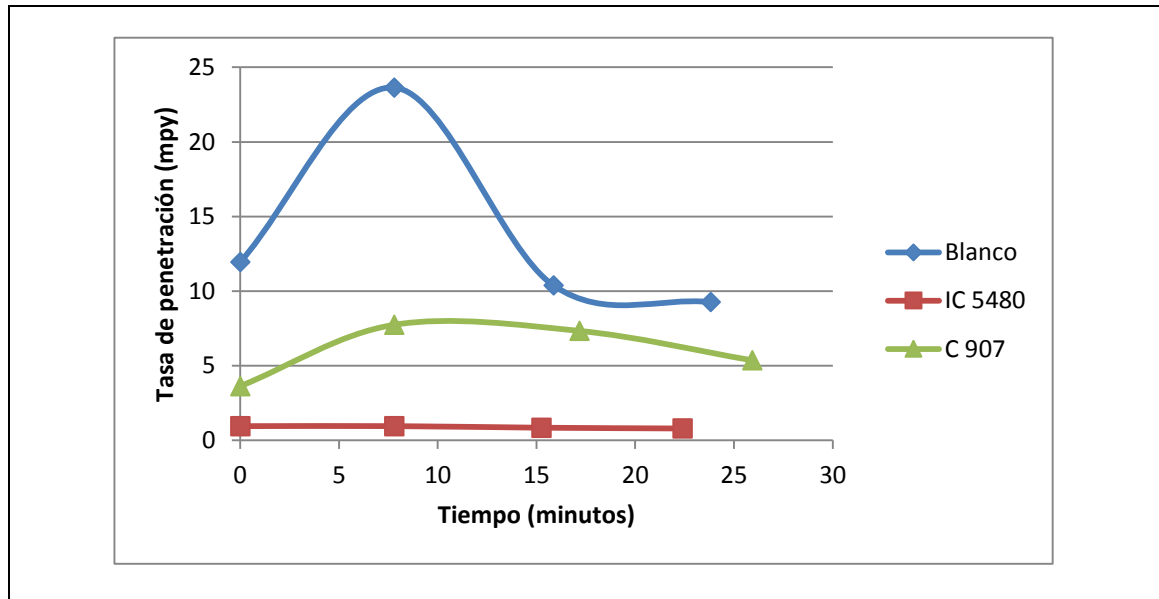
Tabla 48. Datos Tasa de penetración con 500 ppm del inhibidor C 907 a 4000 RPM.

| Iteración | Tiempo (minutos) | Tasa de penetración (mpy) | % Eficiencia C 907 | Promedio % |
|-----------|------------------|---------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 0 | 3,6345 | 69,56692847 | |
| 2 | 7,7878 | 7,7436 | 67,24878086 | |
| 3 | 17,1754 | 7,3348 | 29,33378294 | |
| 4 | 25,9168 | 5,3653 | 42,08878863 | 52,059570 |

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la velocidad de corrosión descrita en la Gráfica 28, el inhibidor C 907 conserva valores contiguos al blanco con una eficiencia de 52,0595 %, y el producto IC 5480 conserva una tasa de penetración baja soportada por una eficiencia de 92,8108 %. Con una diferencia máxima de 7 mpy aproximadamente entre los inhibidores, se destaca el producto IC 5480.

Gráfica 28. Tasa de penetración para el blanco, el inhibidor IC 5480 con 500 ppm y el inhibidor C 907 con 500 ppm a 4000 RPM.



Fuente: elaboración propia.

En conclusión, al ser evaluados en diferentes factores de dosis y velocidad, bajo el parámetro de 1L por corrida de agua de formación sintética los dos inhibidores de corrosión base agua evaluados presentan un buen desempeño en aspectos como resistencia a la polarización, tasa de pérdida de masa y tasa de penetración; aunque es importante resaltar que el producto IC 5480 actúa de manera más estable en los diferentes escenarios valorados y presenta tasas más bajas en cuanto a pérdida de masa y penetración, además se define que la dosis de 250 ppm es la apropiada en las tres velocidades estudiadas (200 RPM, 2000 RPM y 4000 RPM).

En la Tabla 49 se observa la recopilación de un promedio de resultados en cuanto a resistencia a la polarización, donde se observan valores entre 2842,999925 $\Omega \text{ cm}^2$ y 485,3534 $\Omega \text{ cm}^2$; adicionalmente se reúne el promedio correspondiente a la tasa de pérdida de masa con valores entre 0,00698375 mdd y 0,000136275 mdd, junto con eficiencias desde 7,485410826 % hasta 98,03261729 %; así mismo se agrupa un promedio perteneciente a la tasa de penetración con datos entre 17,359675 mpy y 0,49965 mpy, relacionados con una eficiencia de 38,362654% hasta 95,88124 %.

Como se puede apreciar los valores en cuanto a porcentaje de eficiencia para el producto IC 5480, están por el orden de 90,54284182% a 95,881241%, lo cual es superior al porcentaje presentado por el inhibidor C 907 con valores entre 38,36265476% y 60,9407725%; destacando de esta manera el comportamiento del producto IC 5480 en el sistema.

Cabe resaltar que los resultados presentados en este capítulo se encuentran soportados por el Trabajo de grado titulado “Calculo de la eficiencia de inhibidores de corrosión para ductos de hidrocarburos” elaborado por Albañil Romero Héctor Samuel y Rodríguez Ruiz Oscar David ⁷²; al igual que por el trabajo de grado “Evaluación de la velocidad de corrosión erosión en un acero API 5L grado 65 en un sistema salmuera-CO₂-SiO₂-aceite mineral, por medio de técnicas electroquímicas” elaborado por Muñoz-Fernández Héctor Luis; González-Mendoza Luis Ángel y Peña-Ballesteros Darío Yesid.⁷³

⁷² BENAGLIO, Claudia. Instituto Politécnico Nacional. 2008. 847 p.

⁷³ Muñoz-Fernández, et al. Ingeniería y Universidad ISSN: 0123-2126
revistascientificasjaveriana@gmail.com Pontificia Universidad Javeriana Colombia. [1]:

Tabla 49. Resumen de resultados referentes a la metodología experimental.

| Experimento | Concentración (ppm) | Velocidad (RPM) | Promedio Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) | Promedio Tasa pérdida de masa (mdd) | Promedio eficiencia Tasa pérdida de masa (%) | Promedio Tasa de penetración (MPY) | Promedio eficiencia Tasa de penetración (%) |
|----------------|---------------------|-----------------|--|-------------------------------------|--|------------------------------------|---|
| Blanco | 0 | 200 | 649,18727 | 0,0069147 | ----- | 17,359675 | ----- |
| Inhibidor 5480 | IC 250 | 200 | 2842,999925 | 0,00062865 | 90,9114735 | 1,234575 | 92,6753625 |
| Inhibidor 5480 | IC 500 | 200 | 1777,933675 | 0,00059267 | 91,6431901 | 1,052525 | 93,7259666 |
| Inhibidor 907 | C 250 | 200 | 924,864 | 0,00639425 | 7,48541082 | 6,47385 | 60,9407725 |
| Inhibidor 907 | C 500 | 200 | 485,3534 | 0,00532 | 25,0270967 | 6,97005 | 58,0177481 |
| Blanco | 0 | 2000 | 606,454525 | 0,00665 | ----- | 11,191325 | ----- |
| Inhibidor 5480 | IC 250 | 2000 | 2632,97345 | 0,0001888 | 97,1348739 | 1,014225 | 90,5428418 |
| Inhibidor 5480 | IC 500 | 2000 | 2296,63505 | 0,00027365 | 95,8847711 | 0,910275 | 91,5366060 |
| Inhibidor 907 | C 250 | 2000 | 1567,5441 | 0,0013825 | 78,4671677 | 4,797525 | 55,2189913 |
| Inhibidor 907 | C 500 | 2000 | 1336,14345 | 0,00421225 | 36,4210999 | 6,520225 | 38,3626547 |
| Blanco | 0 | 4000 | 570,1541 | 0,00698375 | ----- | 13,807625 | ----- |
| Inhibidor 5480 | IC 250 | 4000 | 2639,77665 | 0,00015185 | 97,8237595 | 0,49965 | 95,881241 |

Tabla 49. (Continuación).

| Experimento | Concentración (ppm) | Velocidad (RPM) | Promedio Resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$) | Promedio Tasa pérdida de masa (mdd) | Promedio eficiencia Tasa pérdida de masa (%) | Promedio Tasa de penetración (MPY) | Promedio eficiencia Tasa de penetración (%) |
|----------------|---------------------|-----------------|--|-------------------------------------|--|------------------------------------|---|
| Inhibidor 5480 | IC 500 | 4000 | 2297,31575 | 0,00013627 | 98,0326172 | 0,887175 | 92,8108424 |
| Inhibidor 907 | C 250 | 4000 | 1237,779425 | 0,00169 | 75,8115599 | 6,57505 | 42,8223982 |
| Inhibidor 907 | C 500 | 4000 | 1067,833875 | 0,00343875 | 51,2272973 | 6,01955 | 52,0595702 |

Fuente: elaboración propia.

4. EVALUACIÓN FINANCIERA

En este capítulo se estudia la evaluación financiera de la viabilidad del proyecto en cuanto a la eficiencia de inhibidores de corrosión base agua para aguas de formación para la empresa CHEMDRILL S.A.S., estimando los costos totales del proceso, teniendo en cuenta tanto los costos actuales del método como los costos generados con la implementación de la metodología desarrollada en el presente proyecto.

Posteriormente se establecerá una relación costo beneficio de manera cualitativa, relacionando aspectos como estabilidad térmica, eficiencia en el medio, tiempo y costos; implicando un conocimiento comparativo.

El método actual de selección de inhibidor en campo actúa en una instalación de procesamiento y en la tubería, en dicha tubería o línea se realiza una perforación en el metal, con el objetivo de instalar cupones laminares del mismo material que la tubería por medio una cuponera que sostiene los cupones expuestos al medio o agua de formación.

El cupón de corrosión es pesado antes de ser insertado en la tubería, con el transcurso del tiempo el cupón es retirado de la tubería y vuelve a ser pesado; al obtener una diferencia de pesos se calcula la velocidad de corrosión en la línea estudiada. Además, cada línea consta de un punto de inyección, en el cual con apoyo de una bomba es inyectada la química a probar o evaluar.

4.1 COSTOS TOTALES

Para determinar la inversión total es necesario conocer la inversión fija del proyecto y los costos de operación.

4.1.1 Costo de operación actual. Los costos totales de operación actual incluyen la estimación en los valores de producto (IC 5480 y C 907), servicio técnico, maquinaria, cupones laminares, entre otros; siendo estas las herramientas requeridas por cada línea de producción, se estiman los valores implicados en la metodología de selección de inhibidores de corrosión base agua correspondientes al campo en trabajo ubicado en los Llanos Orientales de Colombia.

- **Producto.** Hace referencia al costo del producto IC 5480 y C 907 por galón; sin embargo, en este método actual de selección se hace uso de 1 barril de producto aproximadamente; lo cual refleja una diferencia entre los dos productos en cuanto a costo. Tal como se observa en la Tabla 50.

Tabla 50. Costos del producto.

| Producto | Costo (USD/gal) | Costo (COP/barril) |
|----------|-----------------|--------------------|
| IC 5480 | 6 | 738.612 |
| C 907 | 9 | 1'107.918 |

Fuente: elaboración propia.

- **Servicio técnico.** El servicio técnico pertenece al costo relacionado con el personal necesario para realizar la instalación y desinstalación de equipos y herramientas en el pozo estudiado. No obstante, cabe aclarar que este valor puede aumentar con el paso del tiempo, pues el valor estimado en la Tabla 51 se encuentra establecido por un tiempo aproximado de 7 días, pero el trabajo en campo se puede extender a periodos de 4 - 6 semanas, según el pozo petrolero lo requiera.

Tabla 51. Costo de servicio técnico.

| Servicio técnico (alrededor de 7 días) | Costo (COP) |
|--|-------------|
| Servicio Técnico | 500.000 |

Fuente: elaboración propia.

- **Punto por Inyección.** Hace referencia a la zona seleccionada para la inyección de la química por línea en el pozo, el costo estimado en la Tabla 52 incluye el valor de equipos como bombas requeridas en el proceso; sin embargo, dicho valor está sujeto por cada punto necesario, es decir, el valor puede aumentar de ser necesario un mayor número de puntos en el campo.

Tabla 52. Costo punto de inyección.

| Punto de inyección | Costo (COP) |
|---------------------|-------------|
| Inyección por punto | 2'700.000 |

Fuente: elaboración propia.

- **Transportes químicos.** El transporte pertenece al costo relacionado con el desplazamiento de los barriles de los productos químicos que van a ser evaluados. Tal como se observa en la Tabla 53.

Tabla 53. Costo transporte químicos.

| Transporte | Costo (COP) |
|------------|-------------|
| Transporte | 3'000.000 |

Fuente: elaboración propia.

- **Cuponeras.** Las cuponeras son las estructuras que sostienen el cupón laminar y deben ser instaladas en cada línea.

Tabla 54. Costo de cuponeras.

| Cuponeras | Costo (COP) |
|-----------|-------------|
| Cuponeras | 1´100.000 |

Fuente: elaboración propia.

- **Cupones laminares.** Los cupones laminares hacen referencia a las piezas metálicas expuestas al medio en cada punto de inyección. Estas pizas son pesadas antes y después de la evaluación con el objetivo de hallar la velocidad de corrosión por medio del método de pérdida de masa. El valor presentado en la Tabla 55 representa el valor por unidad, sin embargo, este costo puede aumentar, puesto que se encuentra sujeto al número de puntos de inyección en el pozo, número de líneas, productos evaluados, concentraciones estimadas y blancos.

Tabla 55. Costo de cupones laminares.

| Cupones laminares | Costo (COP) |
|-------------------|-------------|
| Cupones | 90.000 |

Fuente: elaboración propia.

- **El costo total de operación actual.** Los costos totales de operación están representados por la suma de los costos estimados de producto (IC 5480), servicio técnico, punto de inyección, transporte, cupones laminares, cuponeras; como se ve en la Tabla 56.

Tabla 56. Costo total de operación actual.

| Ítem | Costo (COP por unidad) |
|---------------------|------------------------|
| Producto IC 5480 | 738.612 |
| Servicio Técnico | 500.000 |
| Inyección por punto | 2´700.000 |
| Transporte | 3´000.000 |
| Cuponeras | 1´100.000 |
| Cupones laminares | 90.000 |
| TOTAL | 8´128.612 |

Fuente: elaboración propia.

4.1.2 Costo de operación con proyecto. En el proyecto se hace uso de la maquina Rotating cylinder electrode del proveedor PINE research instrumentation la cual fue adquirida por un costo de \$ 70'000.000 de pesos.

Por otra parte, en los costos de operación con proyecto se incluye la estimación de los valores de producto (C 907) y cupones; siendo estos los instrumentos necesarios para el método de selección de inhibidores de corrosión.

- **Cupones.** Hace referencia al costo de una caja que contiene 5 cupones para RCE.

Tabla 57. Costo cupones RCE.

| Cupones RCE | Costo (COP) |
|-------------|-------------|
| Cupones | 1'000.000 |

Fuente: elaboración propia.

- **Producto.** Hace referencia al costo del producto IC 5480 y C 907 por galón.

Tabla 58. Costos del producto.

| Producto | Costo (USD/gal) | Costo (COP/gal) |
|----------|-----------------|-----------------|
| IC 5480 | 6 | 17.586 |
| C 907 | 9 | 26.379 |

Fuente: elaboración propia.

- **El costo total de operación con proyecto.** Los costos totales de operación están representados por la suma de los costos estimados de producto (C 907) y cupones RCE; como se ve en la Tabla 59.

Tabla 59. El costo total de operación con proyecto.

| Ítem | Costo (COP/gal) |
|------------------|-----------------|
| Producto IC 5480 | 17.586 |
| Cupones | 1'000.000 |
| TOTAL | 1'017.586 |

Fuente: elaboración propia.

Por lo anterior, se observa una gran diferencia entre el costo total de operación actual con \$ 8'128.612 y el costo total de operación con proyecto con \$ 1'017.586; obteniendo una reserva económica de \$ 7'111.026 donde se evidencia una considerable disminución de costos con la implementación del proyecto. Los anteriores valores fueron suministrados por la empresa CHEMDRILL S.A.S.

En resumen, la Tabla 60 expone los factores decisivos especificados en este proyecto, es decir, se define cada aspecto influyente en el proceso de corrosión; factores como porcentaje de pérdida de masa, donde se evidencia un menor porcentaje de pérdida para el producto IC 5480 lo que refleja una resistencia del inhibidor en condiciones de trabajo a una temperatura aproximada de operación.

Además, se define para ambos inhibidores una dosis apropiada de 250 ppm por cada litro de agua de formación, siendo esta la dosis que señala mayor estabilidad. Por otra parte, se estiman las velocidades de rotación con el objetivo de probar la eficiencia y resistencia del producto en distintas exigencias del medio y geografía del pozo.

Finalmente se puntualizan los costos de ambos productos siendo el inhibidor IC 5480 el más económico; sin embargo, para el método de selección de productos desarrollado en el presente proyecto la cantidad necesaria es mínima, lo que genera un mayor ahorro para la empresa CHEMDRILL S.A.S.

Tabla 60. Factores decisivos en el proyecto.

| Producto | Pérdida de peso (%) | Dosis (ppm) | Velocidad (RPM) | Costos (COP) |
|----------|---------------------|-------------|-----------------|--------------|
| IC 5480 | 12,3 | 250 | 200 | 17.586 |
| | | | 2000 | |
| | | | 4000 | |
| C 907 | 17,2 | 250 | 200 | 26.379 |
| | | | 2000 | |
| | | | 4000 | |

Fuente: elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta los soportes bibliográficos estudiados se identificaron los parámetros involucrados en el fenómeno de la corrosión para aguas de formación; entre los cuales se encontró: velocidad, temperatura y acidez del medio, los cuales dependen tanto de condiciones físicas del pozo, como de operaciones especiales del campo, tales como empuje hidráulico, levantamiento artificial, recuperación secundaria, Pulling, workover, etc.
- La temperatura es un factor considerable en la selección de un inhibidor de corrosión base agua, en vista de que a mayor temperatura un inhibidor puede degradarse o modificar su solubilidad, se efectuaron pruebas de análisis termo gravimétrico (ATG) para definir si el inhibidor altera sus propiedades fisicoquímicas al ser expuesto a una temperatura aproximada de operación del pozo correspondiente.
- Se llevó a cabo una evaluación de estabilidad térmica por medio del análisis termo gravimétrico (ATG) donde se prueban las propiedades fisicoquímicas de cada inhibidor, teniendo en cuenta una temperatura de experimentación aproximada a la temperatura de operación; dicho ensayo condujo a la selección del inhibidor IC 5480, el cual presenta un remanente en peso de 87,7 %, de igual manera se escogió el inhibidor C 907 puesto que tiene un remanente en peso de 82,8%, partiendo de una base de 100% en peso.
- El proyecto se realizó con concentraciones de 250 ppm y 500 ppm, bajo un parámetro de 1 L de agua de formación sintética; aunque se obtuvo un mejor resultado para el producto IC 5480 con 250 ppm, soportado por un porcentaje de eficiencia entre 90,91147351% y 97,82375958%, bajo los parámetros anteriormente mencionados; es importante aclarar que la relación de flujo/volumen trabajados en pozo, es decisivo al momento de estimar la concentración del inhibidor requerido para proteger las instalaciones y ductos del ataque de la corrosión.
- Se seleccionó el producto IC 5480 como el inhibidor de corrosión base agua que presento mejores resultados en aspectos como resistencia a la polarización con valores entre 2842,999925 $\Omega \text{ cm}^2$ y 1777,933675 $\Omega \text{ cm}^2$; al igual que en la tasa de pérdida de masa con datos desde 0,000136275 mdd hasta 0,00062865 mdd, soportados por un valor máximo de eficiencia de 98,03261729 %. De manera paralela se estimó el aspecto de tasa de penetración con valores entre 0,49965 mpy y 1,234575 mpy, fundamentado con un porcentaje de eficiencia máximo de 95,881241 %.
- El proyecto se efectuó a presión atmosférica, sin tener en cuenta la presión de operación en campo y ductos; ya que se presentaron problemas con el sistema

de inyección de gases, lo que puede presentar variaciones en los resultados con respecto a las condiciones del pozo.

- El proyecto se realizó con ayuda del equipo Rotating Cylinder Electrodes (RCE), el cual se fundamenta en el criterio de resistencia por polarización lineal, y por ende aplicando las constantes de Tafel, las cuales deben ser estimadas por medio experimental; sin embargo, para medios prácticos del proyecto por cuestiones de tiempo se hizo uso de valores bibliográficos correspondientes a 0,12 V/déc, por lo que se pueden presentar variaciones en los resultados.
- El método de análisis resistencia por polarización lineal, es un procedimiento que permite medir las tasas de corrosión de manera directa y en tiempo real, por lo cual es necesario desarrollar la experimentación en lapsos de tiempo de 24 a 48 horas de trabajo; sin embargo, por cuestiones de tiempo y recursos este proyecto se desarrolló en periodos de tiempo de 30 a 60 minutos, por lo que se pueden presentar variaciones en dichos resultados.
- Se observaron altibajos en la tendencia de diferentes curvas durante la experimentación, esta alteración en el comportamiento se atribuye al estado del cupón después de ser sometido a varias corridas y sesiones de limpieza.
- En la evaluación financiera se calculó el costo total de operación actual con \$ 8'128.612 y el costo total de operación con proyecto sujeto a \$ 1'017.586; con respecto a lo anterior se estableció la viabilidad financiera con una mejor selección de los inhibidores de corrosión base agua, obteniendo una reserva económica para la empresa CHEMDRILL S.A.S. de \$ 7'111.026 con la implementación del proyecto.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de agua de formación extraída directamente del pozo de producción trabajado, ya que se asegura el contenido de los diferentes compuestos exceptuando el oxígeno disuelto, el cual es un parámetro que se disipa al momento de la extracción; esto con el objetivo de minimizar errores de resultados, humanos, entre otros.
- Es necesaria la implementación de cupones nuevos por cada corrida; ya que al hacer uso de cupones usados la estructura cristalina se ve afectada y por ende los resultados presentan altibajos, al hacer la implementación se reduce las caídas de corriente por presencia de grietas en el material.
- Se recomienda realizar las corridas con un mayor número de iteraciones en un tiempo de trabajo de 24 a 48 horas, con el fin de evidenciar el tiempo real de acción del inhibidor.
- Se invita realizar diferentes variaciones en los parámetros de temperatura y presión; con el propósito de evaluar las distintas condiciones de trabajo de forma conjunta para poder desarrollar una evaluación integral del sistema, usando sistemas de recirculación e inyección de gases.
- Se recomienda la práctica de pruebas de biodegradabilidad utilizando métodos sofisticados, con el objetivo de comprobar las propiedades ecológicas de los compuestos presentes en los inhibidores de corrosión base agua.
- Se recomienda el montaje independiente de un sistema con temperatura y velocidad variable, por medio de un electrodo de referencia, un electrodo de trabajo, un electrolito y un potencióstato; con el objetivo de lograr las curvas de Tafel y por medio de estas especificar las correspondientes constantes, las cuales son fundamentales para el funcionamiento del equipo RCE.

BIBLIOGRAFÍA

ALMAGRO PONCE, Miguel Alfonso and PILAY DE LA A, Carlos Alberto. Utilización de inhibidores orgánicos en operaciones de estimulación de pozo para extender la vida útil de la tubería de revestimiento. [1]. Universidad Estatal Península de Santa Elena: La apuesta, en el agro y en ciencias del mar. En: LIDERES. Quito, Ecuador. Jul 8.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DEL PETRÓLEO. Informe de desempeño ambiental 2015. [1]. [Consultado el Oct 19,2017]. Disponible en: https://acp.com.co/web2017/images/pdf/publicaciones_e_informes/informe_ambiental/IGA%202016_WEB.pdf

ASRAR, Nausha; MACKAY, Bruce; BIRKETVEIT, Oystein; STIPANICEV, Marko; JACKSON, Joshua E; JENKINS, Alyn; MELOT, Denis; SCHEIE, Jan; VITTONATO, Jean. Corrosion- The longest war. Schlumberger. 2016.

BAILEY, Bill; CRABTREE, Mike; TYRIE, Jeb; ELPHICK, Jon; KUCHUK, Fikri; ROMANO, Christian; ROODHART, Leo. Schlumberger. Control de agua. [1]. [Consultado el Mar 29, 2018]. Disponible en: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/sum00/p32_53.pdf.

BENAGLIO, Claudia. Instituto Politécnico Nacional. 2008. 847 p.

BILURBINA, Luis y LIESA, Francisco. Materiales no metálicos resistentes a la corrosión. Barcelona: Marcombo, 1990.

BOLAÑOS GAONA, Luis Galvany. Evaluación de inhibidores de corrosión tipo filmico para agua de formación. Universidad central del ecuador, facultad de ingeniería química carrera de ingeniería química. [1]:

CARBOTECNIA. El Agua de su casa o empresa puede ser Corrosiva o Incrustante. [1]. -03-14T11:17:11-05:00. [Consultado el Aug 14,2018]. Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/agua-casa-empresa-puede-corrosiva-incrustante/>

CIA. GENERAL DE ACEROS S.A. Aceros ingeniería al carbono. SAE 1020 Y SAE 1045. [1]:

CHALKER, Bob. Revelan el costo global de la corrosión. INPRA LATINA. [En línea]. [Consultado el Aug 18,2018]. Disponible en: <http://www.inpralatina.com/201606146395/noticias/empresas/revelan-el-costo-global-de-la-corrosion.html>

CHAVERRA, Duván. Revelan el costo global de la corrosión | Pinturas y Recubrimientos. [1]. [Consultado el Feb 22,2018]. Disponible en: <http://www.inpralatina.com/201606146395/noticias/empresas/revelan-el-costo-global-de-la-corrosion.html>

CHEMDRILL S.A.S. EQUIPO DE CORROSIÓN RCE. OPERACIONES.

CLIMENT OLMEDO, María José; ENCINAS PEREA, Susana and FERRER RIBERA, Belén. Química para ingeniería. Valencia: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, 2013.

CONCEPTO DEFINICION.DE ¿Qué es Temperatura? - Su Definición, Concepto y Significado. [1]. [Consultado el Feb 9,2018]. Disponible en: <http://conceptodefinicion.de/temperatura/>.

Dr. BRAIG, Adalbert. Et al. Inhibidores de corrosión orgánicos para recubrimientos: ayudando a la industria a cubrir las regulaciones ambientales y laborales del futuro. [1]:

FERNANDEZ, José. Velocidad. [1]. [Consultado el Feb 9, 2018]. Disponible en: <https://www.fisicalab.com/apartado/velocidad#contenidos>.

FUNDACION MAPFRE.ORG. GUIAS DE SEGURIDAD. Corrosión. [1]. [Consultado el Feb 9, 2018]. Disponible en: https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/es/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1030514.

GARCIA INZUNZA, Ramses. Inhibidores de corrosión de acero en medios ácidos a partir de extractos naturales. Instituto de ingeniería and maestría y doctorado en ciencias e ingeniería. Universidad autónoma de baja california. [1]:

GENESCA, J. Técnica de extrapolación de tafel o de intersección. Técnicas electroquímicas de corriente directa para la determinación de la velocidad de corrosion. Ingeniería metalúrgica.faculcad química.unam. méxico. [1]:

HWANG, Jong-Yeon, et al. Flow field characterization of a rotating cylinder. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND FLUID FLOW. vol. 29, no. 5, p. 1268-1278

IBRAHIM, Publicado por Vaness zakhour. Forma de Protección contra la corrosión. [1]. [Consultado el Jul 23,2018]. Disponible en: <http://formaproteccioncontralacorrosion.blogspot.com/>

Ingeniería mecánica col. corrosión seca - ingeniería mecánica. [1]. [Consultado el Aug 15,2018]. Disponible en: <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/07/corrosion-seca.html>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Documentación. Presentación de tesis, trabajo de grado y otros trabajos de investigación. NTC 146.Sexta actualización, 1 ed. Bogotá: ICONTEC, 2008.33 p.

----- .Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. 1 ed. Bogotá: El instituto, 2008. 38 p.

----- .Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490.1 ed. Bogotá: El instituto, 1998.23 p.

LABTEC. Aguas corrosivas o incrustantes. Indice de Langelier [1]. [Consultado el Jul 15,2018]. Disponible en: <https://www.labotec.es/aguas-corrosivas-o-incrustantes-indice-de-langelier>.

LEBED LEBED, Daria. Corrosión en la Industria de la Alimentación. [1]. [Consultado el Jul 17,2018]. Disponible en: <https://prezi.com/rraeniqpodbj/corrosion-en-la-industria-de-la-alimentacion/>

LOPEZ, Elia del Valle León. Medidas de Protección Contra la Corrosión. [1]. [Consultado el Oct 19,2017]. Disponible en: <http://medidasdedefensacontralacorrosion.blogspot.com.co/>

MARROQUÍN RAXÓN, Walter Omar. PROTECCIÓN CATÓDICA PARA PREVENIR LA CORROSIÓN and ELECTROQUÍMICA EN ELEMENTOS METÁLICOS. Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica. [1]:

MORALES, Carlos Daniel. Corrosión - Monografias.com. [1]. [Consultado el Feb 8,2018]. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos60/corrosion/corrosion.shtml>.

MUÑOZ-FERNÁNDEZ, et al. Ingeniería y Universidad ISSN: 0123-2126 revistascientificasjaveriana@gmail.com Pontificia Universidad Javeriana Colombia. [1]:

NAAR, Lucia. Tovar, Luis. Ipdvsa. Evaluación en laboratorio y campo para seleccionar técnicamente los inhibidores de corrosión.

NIETO GARZA, Mario. Pemex. Protección interior de ductos con inhibidores. México d.f. 2000. 10-11 p.

OILFIELD GLOSSARY. Amina cuaternaria. [1]. [Consultado el Feb 17, 2018]. Disponible en: http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/q/quaternary_amine.aspx.

PINE RESEARCH. Electrochemistry Research Equipment and Accessories. [1]. [Consultado el Jul 15,2018]. Disponible en: <https://www.pineresearch.com/>

PINE RESEARCH INSTRUMENTATION. Tools for the Study of Flow Based Corrosion by Rotating Cylinder Electrodes. [1]:2014.

PINE RESEARCH. MANUAL PARA EL USUARIO. [1]. [Consultado el May 30,2018]. Disponible en: <https://www.pineresearch.com/>.

POCHTECA. Metasilicato de sodio anhidro y metasilicato de sodio pentahidratado. [1]. [Consultado el Feb 17,2018]. Disponible en: <https://www.pochteca.com.mx/metasilicato-de-sodio-anhidro-y-metasilicato-de-sodio-pentahidratado/>

PULLAS RIVERA, Diego Fernando. Formulación y evaluación en laboratorio de un nuevo inhibidor de corrosión para ductos en campos petroleros. Universidad central del ecuador, facultad de ingeniería química carrera de ingeniería química. [1]:

QUÍMICOS SIAMEX. Inhibidor de corrosión (Anti-Ox). [1]. [Consultado el Feb 17,2018]. Disponible en: http://www.productosquimicosmexico.com.mx/inhibidor_de_corrosion.aspx.

QUIMICOS SIAMEX. Venta de Inhibidor de corrosión. [1]. [Consultado el Oct 19,2017]. Disponible en: http://www.productosquimicosmexico.com.mx/inhibidor_de_corrosion.aspx

RAMIREZ, Yetxibel; BUCARITO, Jesús; PEREZ, Mariannis. La Tecnología Del. Tecnología del Acero: CORROSION POR ALTAS TEMPERATURAS. [1]. miércoles, 29 de junio de. [Consultado el Feb 9,2018]. Disponible en: <http://tecnologiadelacero06pm.blogspot.com.co/2011/06/corrosion-por-altas-temperaturas.html>.

REYNAUD-MORALES, A.G. CASALES-DIAZ, M. MARTÍNEZ-GOMEZ, L. MARTÍNEZ-VILLAFANE, A. GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, J.G. CHACON-NAVA J. G. Influencia de la adición de imidazolina [im-nh17] en el proceso de corrosión del acero api5l-x52. [1]. [Consultado el Feb 17,2018]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/366327478/Eficiencia-de-imidazolina-como-inhibidor-de-corrosion>.

ROBERGE, Pierre R. Handbook of Corrosion Engineering. McGraw. United States of America. 2000. 221 p.

SMARTDRAW, [1]. [Consultado el Mar 30,2018]. Disponible en:<https://www.smartdraw.com/flowchart/flowchart-symbols.htm>

TODO PRODUCTIVIDAD: Estudiando la corrosión a altas temperaturas (1ª PARTE). [1]. 15 septiembre. [Consultado el Aug 15,2018]. Disponible en: <http://todoproductividad.blogspot.com/2011/09/estudiando-la-corrosion-altas.html>

UNIVERSIA COLOMBIA. Más de 26 mil millones de pesos pierde la industria colombiana debido a la corrosión de materiales. [1]. [Consultado el Feb 8,2018]. Disponible en: <http://noticias.universia.net.co/actualidad/noticia/2013/08/29/1045848/mas-26-mil-millones-pesos-pierde-industria-colombiana-debido-corrosion-materiales.html>

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA. 9. Principios de corrosión. [1]. -05-20T05:00:12+00:00. [Consultado el Oct 19,2017]. Disponible en: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/9-principios-de-corrosion/>

VALDÉZ SALAS, Benjamín; Schorr Wiener, Michael. Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. [1]: España, 2013.

ZAPATA MINA Juan Camilo, et al. 12. Corrosión y procesos de corrosión. [1]. -12-13t00:55:24+00:00. [Consultado el Oct 19,2017]. Disponible en: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/12-corrosion-y-procesos-de-corrosion/>