



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

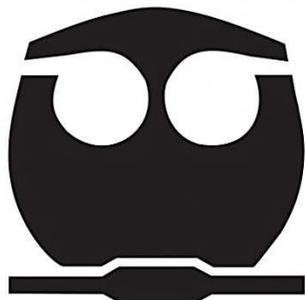
FACULTAD DE QUÍMICA

**“ÁLOE VERA COMO INHIBIDOR DE CORROSIÓN
DEL ACERO AL CARBONO EN SOLUCIONES
SALINO – ACÉTICAS”**

TESIS DE LICENCIATURA

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**PRESENTA:
LILIANA RODRÍGUEZ CAICEROS**



MÉXICO, D.F.

2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ

Vocal: M. EN C. CARLOS RODRÍGUEZ RIVERA

Secretario: DR. DAVID TURCIO ORTEGA

1er Suplente: M. EN I. JOSÉ FERNANDO FLORES ÁLVAREZ

2do Suplente: M. EN I. PAOLA RONCAGLIOLO BARRERA

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de Corrosión y Protección
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Facultad de Química, U.N.A.M., Edificio D.

ASESOR DEL TEMA:

DR. FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ

FIRMA

SUPERVISOR TÉCNICO:

M. EN I. PAOLA RONCAGLIOLO BARRERA

FIRMA

SUSTENTANTE:

LILIANA RODRÍGUEZ CAICEROS

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y ponerme en este camino. Por estar conmigo en cada paso que doy y enseñarme día con día que con paciencia, perseverancia y humildad todo es posible.

A la UNAM, máxima casa de estudios en nuestro país, y a la Facultad de Química, por ser mi segundo hogar durante los últimos años y porque además de formarme como profesional, me formó como persona.

A mi asesor, el Dr. Francisco Javier Rodríguez Gómez, a quien le agradezco haberme dado la oportunidad y confianza de ser parte de este proyecto, así como su paciencia, consejos y tiempo dedicado a la revisión de mi tesis. Gracias por tener siempre una sonrisa para todos los que lo rodeamos.

A mi asesora técnica, Paola Roncagliolo, en quien encontré una excelente persona. Gracias Pao por tu forma de ser tan relajada y esa sinceridad que te caracteriza, por toda tu ayuda, consejos y paciencia.

Al M. en C. Carlos Rodríguez Rivera, a quien considero un gran profesor y persona. Gracias por siempre tener la mejor de las disposiciones, además de facilitarme todos los materiales para la experimentación de este proyecto.

Al Dr. David Turcio Ortega, por invertir su tiempo en leer y corregir mi trabajo. Gracias por todos los comentarios aportados para mejorar este proyecto.

Al profesor Fernando Flores, quien además de ser un excelente profesor es alguien que se convirtió en un buen amigo. Gracias profe por su buen humor, sus pláticas y todos sus consejos.

A Araceli Espinoza, gracias por tomarte el tiempo de leer y realizar correcciones valiosas a mi trabajo.

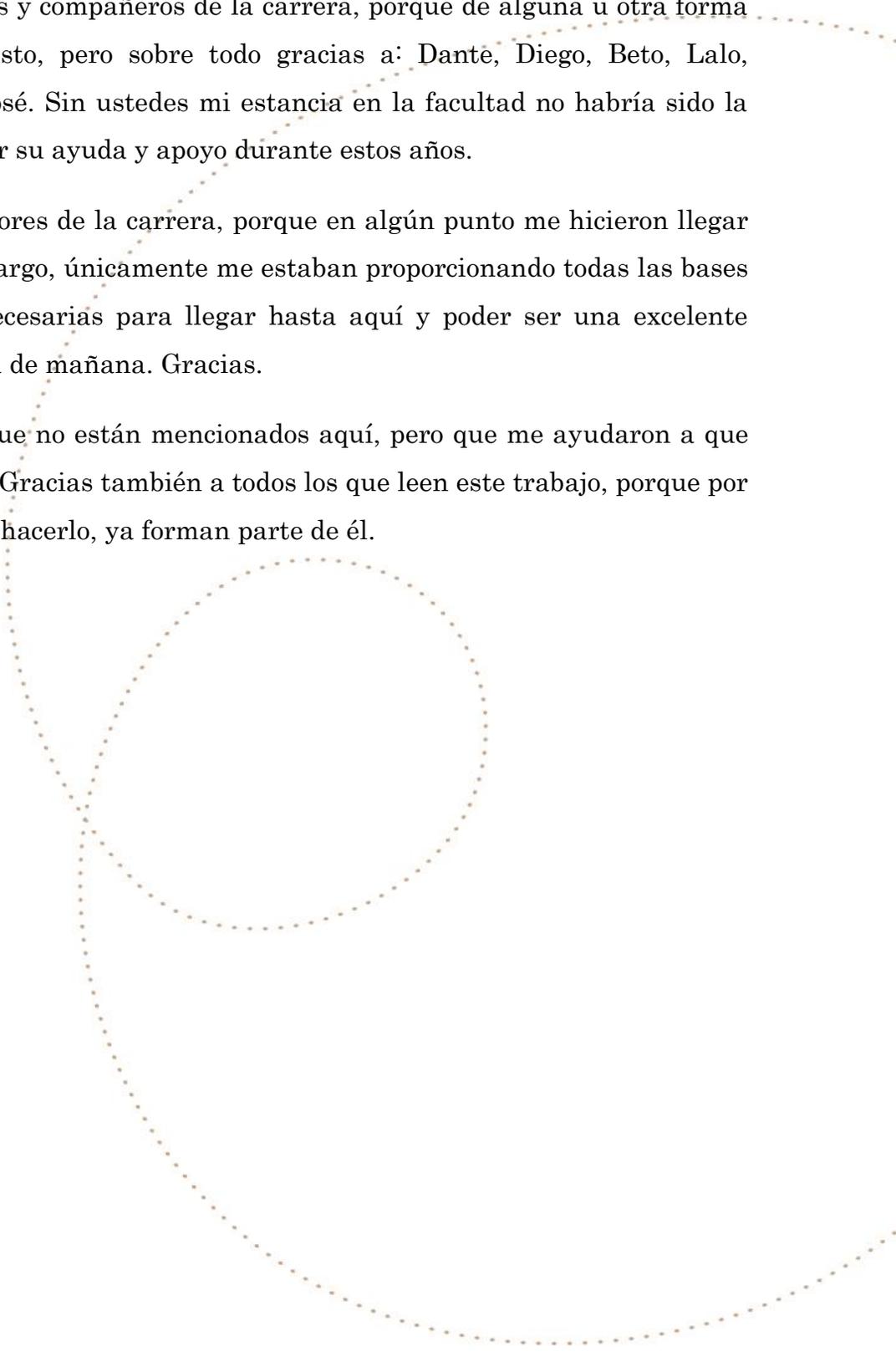


A mis mejores amigos de la facultad: Ara, Vane, Andy y Vic, mis QFB'S e IQ favoritos. Gracias por apoyarme y permitirme entrar en sus vidas durante estos años llenos de risas y buenos momentos dentro y fuera de clases. Porque sé que sin importar lo que pase, estarán ahí. Los quiero mucho.

A todos mis amigos y compañeros de la carrera, porque de alguna u otra forma fueron parte de esto, pero sobre todo gracias a: Dante, Diego, Beto, Lalo, Héctor, Cesar y José. Sin ustedes mi estancia en la facultad no habría sido la misma. Gracias por su ayuda y apoyo durante estos años.

A todos mis profesores de la carrera, porque en algún punto me hicieron llegar a odiarla. Sin embargo, únicamente me estaban proporcionando todas las bases y herramientas necesarias para llegar hasta aquí y poder ser una excelente profesionista el día de mañana. Gracias.

A todos aquellos que no están mencionados aquí, pero que me ayudaron a que esto fuera posible. Gracias también a todos los que leen este trabajo, porque por el simple hecho de hacerlo, ya forman parte de él.



DEDICATORIAS

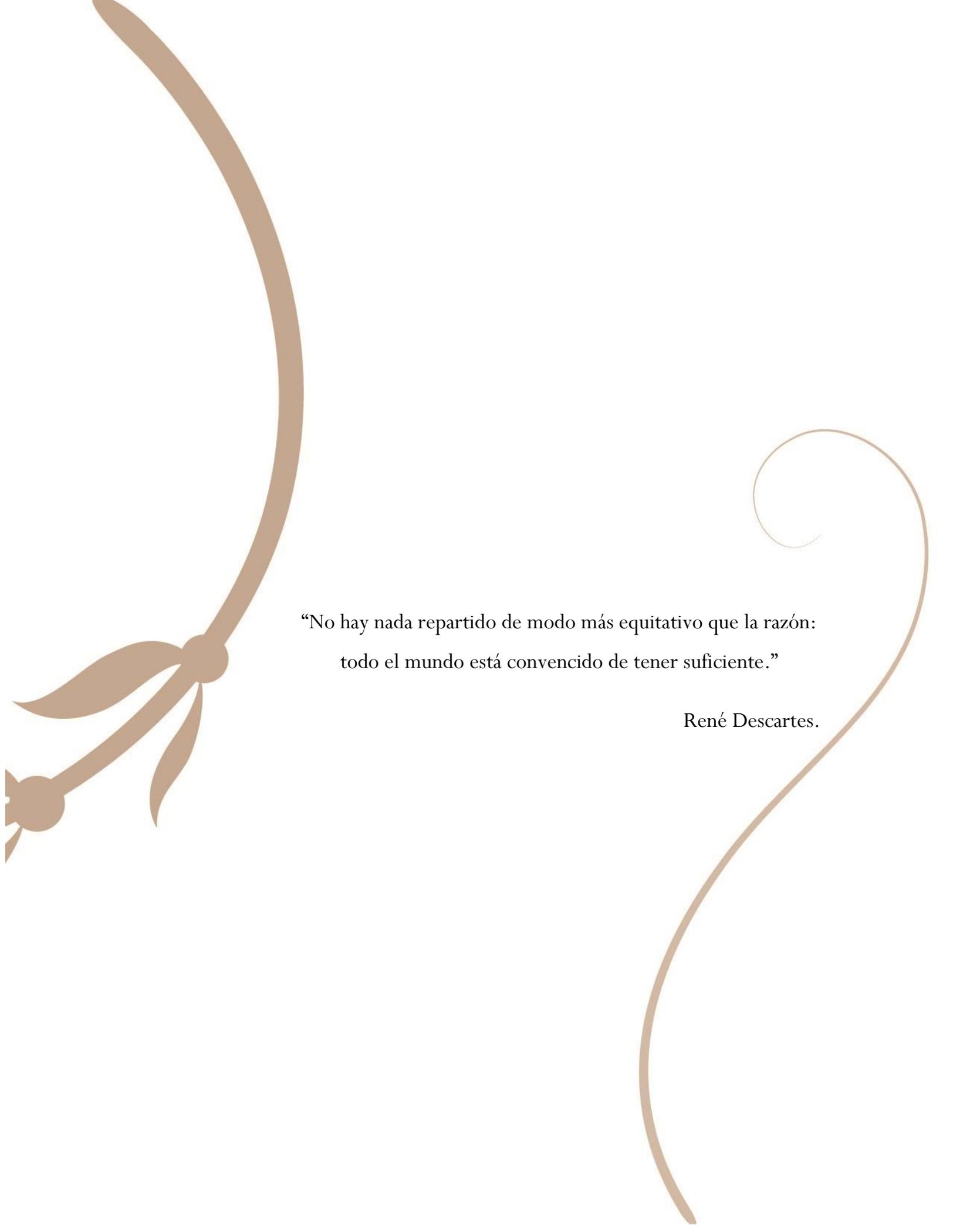
A:

Mi mamá, porque sin ti esto no habría sido posible. Gracias por estar siempre conmigo, por la paciencia que me tienes y todo el amor que me das, por todos los regaños que en su momento no entendía pero que me ayudaron a llegar hasta aquí. Gracias por darme una carrera para mi futuro. Este logro es tuyo; es el resultado de todos tus sacrificios y de todo lo que me has enseñado en la vida. Gracias a ti aprendí que jamás hay que rendirse y que ante la adversidad siempre hay que sonreír. Gracias por ser esa mujer de quien me enorgullece ser su hija. Te amo.

Pau, por ser la mejor hermana y amiga que pueda existir en el mundo mundial. Gracias por soportar mi forma de ser, por ayudarme siempre y tener un consejo o un regaño para mí, pero sobre todo por estar cuando más te necesito. Este logro también es tuyo y de Mushis.

Y aunque no siempre te lo diga... Te quiero mucho.

Rodri, porque has estado incondicionalmente a mi lado, en los buenos y malos momentos; siempre animándome y motivándome a ser mejor cada día en todos los aspectos. Gracias por creer en mí, por balancear mi mundo, por tu infinita paciencia y por hacerme feliz, por ser mi compañero, amigo y cómplice. Por ser mi todo que llego de la nada... Por todo eso y mucho más este trabajo también te pertenece. Te amo.



“No hay nada repartido de modo más equitativo que la razón:
todo el mundo está convencido de tener suficiente.”

René Descartes.

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
OBJETIVOS.....	ii
HIPÓTESIS.....	ii

CAPÍTULO I BASES TEÓRICAS

1.1 GENERALIDADES.....	2
1.1.1 Antecedentes	2
1.1.2 Corrosión en la industria petrolera	4
1.1.2.1 Tipos de corrosión en la industria petrolera.....	5
1.1.2.2 Flujo en las tuberías.....	7
1.1.2.3 Causas de la corrosión interna.....	9
1.1.2.4 Métodos de control de la corrosión en la industria petrolera.....	9
1.2 INHIBIDORES DE CORROSIÓN.....	10
1.2.1 Clasificación de inhibidores de corrosión	12
1.2.1.1 Modificadores del ambiente	13
1.2.1.2 Modificadores de la interfase (metal/solución).....	13
1.2.1.2.1 Inhibidores anódicos, catódicos y mixtos	14
1.2.1.3 Inhibidores orgánicos e inorgánicos.....	16
1.2.1.3.1 Inhibidores de origen natural	16
1.2.1.3.1.1 Aloe Vera	19
1.2.2 Mecanismo de inhibición de la corrosión.....	21
1.2.2.1 Aspectos generales del proceso de adsorción	21

1.3 TIPOS DE FLUÍDO EN LAS TUBERIAS: FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO	22
1.4 ELECTRODO DE CILINDRO ROTATORIO (ECR)	25
1.4.1 Esfuerzo cortante para geometría cilíndrica.....	26
1.5 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS	27
1.5.1 Potencial de corrosión vs tiempo.....	28
1.5.2 Resistencia a la polarización (Rp).....	29
1.5.3 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).....	32
1.5.4 Polarización potenciodinámica cíclica	36

CAPÍTULO II

DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 METODOLOGÍA	39
2.1.1 Selección, caracterización y preparación de muestras metálicas.....	39
2.1.2 Selección y preparación de medio de prueba.	40
2.1.3 Selección y preparación del Inhibidor.	41
2.1.4 Matriz experimental.....	42
2.1.5 Instrumentación.....	43
2.1.6 Pruebas electroquímicas.....	44
2.1.6.1 Monitoreo del potencial de corrosión vs tiempo	44
2.1.6.2 Ensayo de Impedancia Electroquímica (EIS)	44
2.1.6.3 Ensayo de resistencia a la polarización (Rp)	45
2.1.6.4 Curvas cíclicas	45

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS QUÍMICO Y METALOGRAFICO DE LA MUESTRA METÁLICA.....	47
3.1.1 Análisis de muestra metálica sin Inhibidor	48
3.1.2 Análisis de muestra metálica con Inhibidor	48
3.2 EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ÁLOE VERA COMO INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN	
3.2.1 Efecto del inhibidor a 0 rpm	51
3.2.2 Efecto del inhibidor a 100 rpm.....	58
3.2.3 Efecto del inhibidor a 500 rpm.....	63
3.2.4 Efecto del inhibidor a 1000 rpm.....	67
3.2.5 Efecto del inhibidor a 3000 rpm.....	72
3.3 PRUEBAS DE IMPEDANCIA DURANTE 48 HRS	78
3.3.1 Efecto del Aloe Vera como inhibidor de la corrosión sobre el acero SAE 1018 en función del tiempo de inmersión a temperatura ambiente	78
3.3.2 Efecto del inhibidor sobre el acero SAE 1018 en tiempos largos de inmersión a temperatura de refrigeración	85

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

4 CONCLUSIONES.....	90
BIBLIOGRAFÍA	91

ANEXOS

ANEXO A1.

Gráficas de potencial de corrosión vs tiempo para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), pH= 3, a temperatura ambiente.....99

ANEXO A2.

Simulación de datos experimentales con los datos calculados a 100 ppm de inhibidor de Aloe Vera a diferentes velocidades de rotación.....101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Fallas en la industria petrolera.....	5
Tabla 1.2 Corrosión en la industria petrolera.....	6
Tabla 1.3 Influencia del patrón de flujo en el tipo de corrosión.....	8
Tabla 1.4 Clasificaciones más usadas para los inhibidores de corrosión.....	12
Tabla 1.5 Ejemplos de inhibidores de origen natural previamente estudiados.....	18
Tabla 1.6 Número de Reynolds correspondiente a cada velocidad de rotación.....	25
Tabla 1.7 Revoluciones por minuto para la obtención del fluido según el ducto destinado.....	26
Tabla 2.1 Composición química teórica para el acero API X52.....	39
Tabla 2.2 Composición química teórica para el acero SAE 1018.....	39
Tabla 2.3 Variables experimentales a trabajar.....	42
Tabla 2.4 Variables experimentales para las pruebas de EIS durante 48 hrs en modo estático.....	43
Tabla 3.1 Composición química obtenida a partir del análisis químico.....	47
Tabla 3.2 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición obtenidos para acero al carbono SAE 1018 en un medio tipo NACE TM 0177 a 0 rpm a partir de los datos de Rp.....	51
Tabla 3.3 Parámetros electroquímicos en modo estático a partir de EIS _[z]	53
Tabla 3.4 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición a partir de las curvas de polarización obtenidos en modo estático	57
Tabla 3.5 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición obtenidos para acero al carbono SAE 1018 en un medio tipo NACE TM 0177 a 100 rpm a partir de los datos de Rp.....	58

Tabla 3.6 Parámetros electroquímicos a 100 rpm a partir de EIS _[z]	59
Tabla 3.7 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de a partir de las curvas de polarización a 100 rpm.....	62
Tabla 3.8 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición obtenidos para acero al carbono SAE 1018 en un medio tipo NACE TM 0177 a 500 rpm a partir de los datos de Rp.....	63
Tabla 3.9 Valores de velocidad de corrosión y eficiencia a 500 rpm a partir de EIS _[z]	64
Tabla 3.10 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición para 500 rpm a partir de las curvas de polarización.....	66
Tabla 3.11 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición obtenidos para acero al carbono SAE 1018 en un medio tipo NACE TM 0177 a 1000 rpm a partir de los datos de Rp.....	67
Tabla 3.12 Valores de velocidad de corrosión y eficiencia a 1 000 rpm a partir de EIS _[z]	68
Tabla 3.13 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición para 1000 rpm a partir de las curvas de polarización.....	71
Tabla 3.14 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición obtenidos para acero al carbono SAE 1018 en un medio tipo NACE TM 0177 a 3000 rpm a partir de los datos de Rp.....	72
Tabla 3.15 Valores de velocidad de corrosión y eficiencia a 3 000 rpm a partir de EIS _[z]	74
Tabla 3.16 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición para 3000 rpm a partir de las curvas de polarización.....	76
Tabla 3.17 Parámetros obtenidos durante 48 hrs de inmersión en una solución tipo NACE TM 0177, pH= 3 en modo estático a partir de EIS _[z]	83
Tabla 3.18 Parámetros obtenidos durante 48 hrs de inmersión en una solución tipo NACE TM 0177, pH=3 en modo estático a temperatura de refrigeración a partir de EIS _[z]	88

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1.1 Patrones de flujo presentes en las tuberías horizontales.....	8
Figura 1.2 Efecto de los inhibidores (anódico, catódico y mixto sobre las curvas de polarización).....	15
Figura 1.3 Formula estructural de la Aloína.....	19
Figura 1.4 Estructura y microestructura de la hoja de Aloe Vera.....	20
Figura 1.5 Figuras que muestran los filamentos coloreados que se transportan a través de a) Flujo laminar y su respectivo perfil de distribución de velocidad dentro del tubo, b) Flujo en la zona critica, c) Flujo turbulento y perfil de distribución de velocidad.....	24
Figura 1.6 Gráfica de potencial (E) vs densidad de corriente (i_{corr}).....	29
Figura 1.7 Circuito de Randles.....	33
Figura 1.8 Diagrama de Nyquist que representa el proceso del circuito de Randles.....	34
Figura 1.9 Presentación de datos de la técnica de impedancia. A) Gráfico de Nyquist (Z' vs Z''), B) Diagrama de Bode (Log $ Z $ vs Log f, correspondiente al gráfico A), C) Diagrama de Bode (Log f vs Log Z), D) Diagrama de Bode (Log f vs ángulo theta, correspondiente al gráfico A).....	35
Figura 1.10 Diagrama de Nyquist. Sistema de transferencia de carga simple.....	35
Figura 1.11 Diagrama de Nyquist. Sistema controlado por transferencia de carga y difusión.....	36
Figura 1.12 Diagrama de Nyquist. Sistema controlado por transferencia de carga y por adsorción de especies.....	36
Figura 1.13 Esquema de una curva de polarización que muestra el potencial crítico y la región metaestable de la picadura.....	37

Figura 2.1 Arreglo experimental de la celda electroquímica de vidrio con el ECR (marca PINE), conectada a cables adquirentes de datos de la terminal GillAc.....	43
Figura 2.2 Vista esquemática de las dimensiones de las probetas cilíndrica de acero SAE 1018 utilizadas en las pruebas electroquímicas.....	44
Figura 3.1 Vista microscópica de un acero SAE 1018 (extraída de la literatura). Aumento 500 X.....	48
Figura 3.2 Vista microscópica de un acero SAE 1018 (probeta de trabajo). Reactivo de ataque: Nital 3. Aumento 100 X.....	48
Figura 3.3 Vista inferior y frontal de las piezas seleccionadas para analizar expuestas en un medio de tipo NACE TM 0177 durante 48 hrs.....	49
Figura 3.4 Vista microscópica con 500 X del borde a) y del centro b) de un acero SAE 1018 expuesto durante 48 hrs en un medio de tipo NACE TM 0177 a temperatura ambiente, 0 ppm de inhibidor.....	50
Figura 3.5 Vista microscópica con 100 X del borde a) y del centro b) de un acero SAE 1018 expuesto durante 48 hrs en un medio de tipo NACE TM 0177 a temperatura de refrigeración, 0 ppm de inhibidor.....	50
Figura 3.6 Vista microscópica con 500 X del borde a) y del centro b) de un acero SAE 1018 expuesto durante 48 hrs en un medio de tipo NACE TM 0177 a temperatura de refrigeración, 100 ppm de inhibidor.....	50
Figura 3.7 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 inmerso en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso) a diferentes concentraciones del Aloe Vera en modo estático.....	53
Figura 3.8 Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso) a diferentes concentraciones del Aloe Vera en modo estático.....	55

Figura 3.9 Curvas de polarización obtenidas para el sistema acero al carbono SAE 1018 en solución tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera en modo estático.....	56
Figura 3.10 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso) a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 100 rpm.....	59
Figura 3.11 Diagramas Bode módulo para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso) a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 100 rpm.....	60
Figura 3.12 Curvas de polarización para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para blanco, 20, 50 y 100 ppm de Aloe Vera a 100 rpm.....	61
Figura 3.13 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 500 rpm.....	63
Figura 3.14 Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 500 rpm.....	65
Figura 3.15 Curvas de polarización para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 500 rpm.....	66
Figura 3.16 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 1000 rpm.....	68

Figura 3.17 Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 1000 rpm.....	69
Figura 3.18 Curvas de polarización para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso) a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 1000 rpm.....	70
Figura 3.19 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 3000 rpm.....	73
Figura 3.20 Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 3000 rpm.....	75
Figura 3.21 Curvas de polarización para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para blanco, 20, 50 y 100 ppm de Aloe Vera a 3000 rpm.....	76
Figura 3.22 Eficiencia mediante EIS del Aloe Vera a 100 ppm de inhibidor a diferentes velocidades de rotación.....	77
Figura 3.23 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para blanco, durante 48 hrs en modo estático a Tamb.....	79
Figura 3.24 Diagramas Bode módulo para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para blanco, durante 48 hrs en modo estático a Tamb.....	79
Figura 3.25 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 con 50 ppm de inhibidor, durante 24 hrs en modo estático a Tamb.....	80

Figura 3.26	Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 con 50 ppm de inhibidor, durante 24 hrs en modo estático a Tamb.....	81
Figura 3.27	Diagramas Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 con 100 ppm de inhibidor, durante 48 hrs en modo estático a Tamb.....	82
Figura 3.28	Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 con 100 ppm de inhibidor, durante 48 hrs en modo estático a Tamb.....	82
Figura 3.29	Diagramas Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para blanco durante 48 hr, modo estático, 3°C.....	85
Figura 3.30	Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para blanco durante 48 hrs, modo estático, 3°C.....	86
Figura 3.31	Diagramas Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para 100 ppm durante 48 hrs, modo estático en refrigeración.....	87
Figura 3.32	Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH ₃ COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para 100 ppm durante 48 hrs, modo estático en refrigeración.....	88

RESUMEN

En la industria petrolera se ha visto que uno de los principales problemas que causa considerables pérdidas económicas al año es la corrosión.

Dado lo anterior, este proyecto surge como una iniciativa de implementar inhibidores de corrosión de origen natural para con ello generar un menor impacto ambiental, así como un menor costo para la industria petrolera donde exista el fenómeno de la corrosión.

De acuerdo a Petróleos Mexicanos (PEMEX), la corrosión interior (la que se presenta en los ductos) suele controlarse con el uso de inhibidores, los cuales, con base en la norma NRF-005-PEMEX-2009 ^[39], deben presentar una eficiencia mayor al 90% de inhibición para ser aceptables.

El presente trabajo muestra los resultados y análisis de estudios electroquímicos del proceso de corrosión de probetas de acero al carbono SAE 1018. Teniendo así, como objetivo principal el determinar el efecto inhibidor del Aloe Vera en un medio salino-acético, empleando un electrodo de cilindro rotatorio.

Por otra parte, con el objetivo de obtener la información necesaria para conocer la influencia de la persistencia de película de inhibidor en modo estático, se empleó la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica durante un tiempo de 48 hrs para darle seguimiento a la corrosión.

El espesor y morfología de la película obtenida depositada sobre la superficie de las muestras de acero fue analizada con la ayuda de un microscopio a 500 X.

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas, se encontró que:

1. El Aloe Vera a una concentración de 50 y 100 ppm en modo estático actúa correctamente como inhibidor de corrosión.
2. Conforme se incrementa el tiempo de exposición en el medio corrosivo, la eficiencia por parte del inhibidor disminuye.

OBJETIVOS

- Determinar el efecto inhibitor del aloe vera en un medio salino-acético, a temperatura ambiente para un acero al carbono a través de ensayos electroquímicos.
- Determinar la concentración óptima de aloe vera para inhibir la corrosión en función de las diferentes condiciones hidrodinámicas establecidas.

HIPÓTESIS

El aloe vera funcionará adecuadamente como inhibidor de corrosión (90% de eficiencia) en medio salino-acético, a temperatura ambiente, de acuerdo a un mecanismo de adsorción en la intercara metal/electrolito. Lo anterior se verificará en el laboratorio mediante la determinación de velocidades de corrosión con técnicas electroquímicas de corriente directa (DC) y corriente alterna (AC).



CAPÍTULO I
B A S E S T E Ó R I C A S

1.1 GENERALIDADES

En este apartado se muestra información sobre los antecedentes del tema de corrosión en la industria petrolera y los antecedentes históricos de este trabajo.

Así como también se resumen algunos de los conceptos teóricos necesarios para la comprensión de los resultados experimentales obtenidos.

1.1.1 Antecedentes

La corrosión puede ser definida como la destrucción o deterioro de las propiedades de un material debido a su interacción con el entorno. ^[1] La velocidad a la que un material se degrada puede ser lenta y continua o bien, relativamente rápida y discontinúa; todo dependiendo del ambiente donde este se encuentre. A medida que pasa el tiempo se va creando una capa fina de material en la superficie, que va formándose inicialmente como manchas hasta que llegan a aparecer imperfecciones en la superficie del material metálico.

El uso de acero en la vida diaria del hombre se ha vuelto indispensable, su desarrollo va de la mano con el avance de la humanidad. Sin embargo, desde que el hombre empezó a utilizar instrumentos de metal se enfrentó a la corrosión y aunque con el avance de los conocimientos ha podido defenderse mejor de ella, este es un problema permanente ^[2]. Con el paso del tiempo, el mercado pide que las estructuras de ingeniería tengan un mejor rendimiento a largo plazo.

La diversidad de los agentes corrosivos genera, por un lado, diferentes tipos de daños al material metálico con el que se encuentra en contacto, y por el otro, una complicación adicional en la estimación de la corrosión de los equipos metálicos industriales.

Esta complejidad ha hecho que las evaluaciones de la velocidad de corrosión, utilizando la pérdida de peso, proporcionen valores erróneos, comparados con los daños observados en los equipos durante su mantenimiento, haciendo así, evaluaciones inexactas de la eficiencia de los inhibidores de corrosión [2].

Durante los últimos treinta años, el uso de métodos electroquímicos para sondear los procesos de corrosión se ha incrementado hasta el punto en que representan un conjunto de herramientas indispensable.

En trabajos previos [3] se ha establecido que los medios ácidos (en presencia de ácido acético y cloruros) compiten por los sitios de adsorción, con lo cual impiden un buen desempeño de las sustancias que actúan como inhibidores de corrosión.

El uso de inhibidores de corrosión ha proporcionado, por mucho tiempo, una solución a los daños ocasionados por la corrosión en la industria petrolera. Sin embargo, debido a la gran cantidad de ambientes corrosivos, la selección de un inhibidor de corrosión es un trabajo complejo. El número de diferentes inhibidores disponibles es muy grande y la elección de los mismos dependerá del metal que se desee proteger, del ambiente corrosivo y de las condiciones de operación a las que el material se encuentre sometido [4].

La evaluación de la resistencia a la corrosión de los materiales metálicos, solos o en presencia de diferentes compuestos, en ambientes de refinación del petróleo, es un tema de interés en la actualidad, ya que se busca la optimización en la operación de las plantas de proceso y mayor durabilidad de los equipos utilizados en las mismas.

1.1.2 Corrosión en la industria petrolera

La corrosión es uno de los principales problemas que causan pérdidas económicas en el ámbito industrial. La industria petrolera no está exenta de este fenómeno. Para esta industria, la pérdida de una pequeña porción de material representa una pérdida millonaria anualmente, por el efecto de la corrosión de tuberías, codos, empaques, y cualquier otro material metálico que se encuentre en contacto con un medio agresivo.

Hoy en día, las compañías petroleras a nivel mundial cuentan con una extensa red de ductos, la cual es utilizada como infraestructura para el transporte de hidrocarburo extraído.

La tubería conductora de petróleo crudo, gas e hidrocarburo en general, es vulnerable a la corrosión; siendo un aspecto importante el material del cual se fabrican. Por razones económicas, se han usado aceros al carbono y de baja aleación en la construcción de estas tuberías. Estos materiales aunque son convenientes por su bajo costo, muestran de manera característica una baja resistencia a la corrosión y para controlar este proceso la industria petrolera y petroquímica usan inhibidores de corrosión, principalmente en las tuberías que llevan los hidrocarburos de los pozos a las instalaciones y plantas de proceso.

La pérdida de metal a causa de la corrosión puede ocurrir en varias formas, siendo la más común la pérdida de metal uniforme para prácticamente cualquier sistema. En operaciones de producción de gas y de combustible, se presentan fenómenos de corrosión del tipo localizada ^[5].

Durante mucho tiempo, el Instituto Mexicano del Petróleo ha estado presente en el diseño y evaluación de inhibidores de corrosión para la industria petrolera mexicana. Sin embargo, las condiciones cambiantes en las corrientes de entrada a los procesos, ha sido la causa de muchos problemas de corrosión, incluso los inhibidores de corrosión diseñados, en ocasiones provocan problemas de corrosión más graves ^[5].

Cabe aclarar que la corrosión no es un hecho trivial, ya que mundialmente, es uno de los fenómenos más trascendentales en la economía de toda la sociedad. La destrucción de los materiales metálicos por efecto de la corrosión es un problema tecnológico de una gran importancia ya que tiene asociado pérdidas económicas y humanas muy importantes que afectan la economía de cualquier país. Si no existiera la corrosión, la economía del mundo cambiaría radicalmente; de acuerdo a la Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos (OEA) ^[6], los perjuicios causados por la corrosión equivalen del 1.5 – 3.5% del Producto Interno Bruto en numerosos países. Debido a esto son muchos los esfuerzos de investigación para el entendimiento y control de este fenómeno.

Estas pérdidas económicas están ligadas a costes de mantenimiento, producción, por averías, daños por accidentales e interrupción de la producción, baja eficiencia de los equipos y contaminación, solo por mencionar algunos ^[7].

1.1.2.1 Tipos de corrosión en la industria petrolera

De todas las fallas que ocurren en las operaciones de la industria del gas y del petróleo, la más importante es la falla por corrosión, la cual representa el 33% de los casos ^[8], como se muestra en las tablas 1.1 y 1.2.

Tabla 1.1 Fallas en la Industria Petrolera identificadas por Kermany y Harrop ^[8].

Tipo de Falla	%
Corrosión	33
Fatiga	18
Daño Mecánico	14
Fractura Frágil	9
Defecto de Fabricación	9
Defectos de Soldadura	7
Otros	10

A su vez, el tipo de corrosión que ocurre se distribuye aproximadamente de la siguiente forma:

Tabla 1.2 Corrosión en la Industria Petrolera.

Tipos de Corrosión	%
Por CO ₂	28
Por H ₂ S	18
En Soldadura	18
Por Picadura	12
Corrosión – Erosión	9
Galvánica	6
Crevice	3
Por Impacto	3
Bajo Tensión	3

- **Corrosión por CO₂:** También conocida como “corrosión dulce”, la cual tiene lugar cuando el acero se expone al dióxido de carbono y la humedad.
- **Corrosión por H₂S:** O corrosión “amarga”, ocurre cuando se tiene la presencia de crudo amargo, teniendo así la formación de sulfuro de hierro.
- **Corrosión por soldadura:** Se presenta cuando al unir y soldar dos piezas metálicas estas se funden durante la soldadura, reaccionando así con el oxígeno del aire. Sufren una pre oxidación que propicia su posterior corrosión.
- **Corrosión por picaduras:** El material presenta una capa pasiva y en el medio hay presencia de cloruros.
- **Corrosión-erosión:** Se considera que es el aumento de la velocidad del deterioro que sufre un metal debido al movimiento relativo entre un fluido corrosivo y la superficie metálica.
- **Corrosión galvánica:** Ocurre cuando están en contacto eléctrico dos metales distintos, expuestos a soluciones corrosivas o atmósferas húmedas, uno de ellos se comporta como ánodo y el otro como cátodo. El más electronegativo se corroerá con mayor intensidad, mientras menor sea la diferencia de potenciales entre sí.

- **Corrosión por crevice:** Se presenta en uniones de piezas metálicas en rendijas debajo de tuercas o remaches, arandelas o debajo de depósitos u objetos localizados sobre la superficie metálica, es decir, ocurre cuando en la unión de los materiales existen espacios vacíos en donde no llega el oxígeno.
- **Corrosión bajo tensión:** Se presenta por la acción combinada de un esfuerzo de tracción y la corrosión que forma grietas, hasta que finalmente se logra el fallo catastrófico del componente.

Otro tipo de corrosión que también se presenta en la industria petrolera, pero en menor porcentaje es:

- **Corrosión uniforme:** Se puede dar cuando el ataque se extiende casi por igual sobre toda la superficie del metal.

Para sistemas de gas húmedo con bajas velocidades de flujo, comprendidas entre 0 y 4.5 m/s, existen mayores posibilidades de un ataque corrosivo localizado.

En los sistemas de gas con velocidades de flujo moderadas ubicadas en el rango de 4.5 a 7.5 m/s, el agua se presenta en flujos continuos a lo largo del fondo de la tubería y atomizada en el resto de la línea, con lo que se obtienen diferentes grados y tipos de ataque corrosivo, siendo el más severo el que se presenta en el fondo de la línea, como un ataque localizado.

A velocidades altas, superiores a los 7.5 m/s el agua se encuentra atomizada en toda la superficie interna de la línea de gas por lo que en general y dependiendo del contenido de agua, ocurre un ataque general (uniforme) de moderada intensidad ^[20].

1.1.2.2 Flujo en las tuberías

Para las tuberías horizontales (Figura 1.1 y Tabla 1.3) los patrones de flujo se correlacionan empíricamente como funciones de las velocidades de flujo y las propiedades del mismo (viscosidad, densidad, tensión superficial) ^[8].

Figura 1.1 Patrones de flujo presentes en las tuberías horizontales.

	Flujo Suave Estratificado	Estratificado
	Flujo Turbulento Estratificado	
	Flujo de Burbuja Alargada	Intermitente
	Flujo Slug	
	Flujo Anular	Anular
	Flujo Turbulento Anular	
	Flujo de Burbujas Dispersas	

Tabla 1.3 Influencia del patrón de flujo en el tipo de corrosión.

Patrón de Flujo	Ubicación del agua libre	Turbulencia del Agua	Tipo de Corrosión
Bifásico Gas / Agua			
Flujo Estratificado	Inferior	Estancada y Laminar	Corrosión bajo depósitos Picaduras del SAE
Flujo Slug	Mayormente inferior, mezcla	Muy turbulenta	Corrosión inducida por Flujo
Flujo Anular	Circunferencial	Turbulenta	Corrosión inducida por Flujo
Bifásico Hidrocarburo / Agua			
Flujo Segregado	Inferior	Estancada a Laminar	Corrosión bajo depósitos Picadura del SAE
Flujo Mezclado	Mayormente inferior, mezcla	Laminar a Turbulenta	Corrosión bajo depósitos
Flujo Disperso	Mezcla	Turbulenta	Corrosión inducida por Flujo
Trifásico Gas / Hidrocarburo / Agua			
Flujo Estratificado	Inferior, separado	Estancada a Laminar	Corrosión bajo depósitos Picadura del SAE
Flujo Slug	Mayormente inferior, mezcla	Muy turbulenta	Corrosión inducida por Flujo
Flujo Anular	Circunferencial	Posiblemente Turbulento	Corrosión inducida por Flujo

1.1.2.3 Causas de la corrosión interna

Los productos refinados secos con los añadidos normales son anticorrosivos a las tuberías de acero. Los productos son corrosivos debido al agua y el aire asociados: una película de agua líquida se adhiere a la superficie de la tubería mientras que el oxígeno está disponible en el aire disuelto en el producto.

El aire es introducido en los productos por los mezcladores del tanque, la turbulencia, el tanque normal que respira, etc., pero su solubilidad es variable.

1.1.2.4 Métodos de control de la corrosión en la Industria Petrolera

La corrosión interna se puede controlar quitando los ingredientes activos del agua o del aire, agregando un inhibidor que hará el acero inactivo, o usando una barrera que cubra el acero. La deshidratación también es una manera eficaz de controlar la corrosión interna de una tubería de los productos.

La mayoría de pozos de petróleo crudo contienen salmuera que es un electrolito excelente para promover la corrosión. Algunos aceites contienen parafina y depositan una capa protectora de parafina en la pared de la tubería, mientras que otros son anticorrosivos debido a la composición química.

La cantidad de corrosión se relaciona a menudo con la cantidad y la composición del sedimento. La alta velocidad del flujo tiende a barrer el sedimento fuera de la tubería, mientras que la velocidad baja permite que el sedimento se coloque en el fondo de la tubería. Cuando el sedimento se precipita, cubre la tubería y las picaduras tienden a ocurrir debajo del sedimento. Cuando el petróleo crudo es amargo, el sedimento contiene sulfuro de hierro que es fuertemente catódico respecto al acero. Así, el sulfuro de hierro y el acero producen un tipo de celda cuya acción destruye el acero con una velocidad rápida^[9].

El CO₂ y el H₂S son las especies corrosivas más importantes contra las cuales es necesario actuar utilizando revestimientos que deben resistir a esas especies, a la temperatura, presión y también guardar resistencia a la abrasión y al impacto que en una medida u otra están involucrados en la utilización de tuberías y equipos.

1.2 INHIBIDORES DE CORROSIÓN

En la industria de extracción y procesamiento del petróleo, los inhibidores siempre han sido considerados como la principal protección contra los problemas de corrosión ^[9]. Aunque se debe señalar que en algunos casos, un ambiente puede hacerse menos agresivo mediante el uso de otros métodos tales como la remoción del oxígeno presente o la modificación del pH. La organización internacional de estándares ISO por sus siglas en inglés (ISO 8044-1999) define como inhibidor de corrosión de la siguiente manera ^[11].

“Sustancia química que cuando está presente en el sistema de corrosión a una concentración adecuada disminuye la velocidad de corrosión, sin cambiar significativamente la concentración de cualquier agente corrosivo”.

Otra definición menciona que, los inhibidores de corrosión son sustancias de naturaleza orgánica o inorgánica que al adicionarse en concentraciones del orden de partes por millón (ppm) a un medio corrosivo, previenen, controlan y en ocasiones detienen la velocidad de corrosión de 80 a 90% en mejor de los casos^[12].

Cualquiera que sea la definición, la función de un inhibidor de corrosión está enfocada a disminuir la velocidad de corrosión a niveles técnicamente aceptables.

El comportamiento de los inhibidores puede ser muchas veces peligroso, ya que en función de la concentración o de las circunstancias, pueden jugar tanto el papel de inhibidores como de estimulantes de la corrosión.

La literatura científica y técnica, posee una amplia lista de compuestos que exhiben propiedades de inhibición. De todos ellos solo unos cuantos son utilizados en la práctica. Porque las propiedades deseables en un inhibidor usualmente se extienden más allá de las relacionadas a la protección de la superficie metálica.

Los inhibidores de corrosión comerciales se encuentran disponibles bajo ciertos nombres o marcas que usualmente no dan ninguna información acerca de su composición química. Las formulaciones comerciales consisten de una sustancia activa (considerada como inhibidor), algún tipo de solvente y otros aditivos tales como surfactantes, desmulsificantes, formadores de película, secuestradores de oxígeno, etc. [10,12].

En la producción de petróleo se emplean tradicionalmente compuestos orgánicos conteniendo nitrógeno, usualmente en forma de aminas, imidazolinas, amidas o sales de amonio que se adsorben sobre la superficie formando una película que interfiere con las reacciones electroquímicas relacionadas con el proceso de corrosión. No obstante, el uso intensivo de inhibidores en la producción de petróleo, en la mayoría de los casos el mecanismo de acción de los mismos se desconoce [13].

Algunos de los parámetros de campo más importantes que pueden afectar el desempeño de un inhibidor y que son importantes de considerar en la evaluación de un inhibidor son: temperatura, presión, presencia de diferentes fases en el fluido (relación gas/líquido o salmuera/hidrocarburo), régimen de flujo y propiedades de emulsión.

La eficiencia de inhibición (EI) de un inhibidor de corrosión expresada en porcentaje puede calcularse mediante la siguiente ecuación [4,6]:

$$\%EI = \frac{i_{corr}^{\circ} - i_{corr}^i}{i_{corr}^{\circ}} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

i_{corr}° : Densidad de corriente obtenida del blanco

i_{corr}^i : Densidad de corriente obtenida con inhibidor

1.2.1 Clasificación de inhibidores de corrosión

La clasificación de los inhibidores de corrosión se puede realizar de acuerdo a su composición química, su acción de carácter eléctrico o químico sobre la superficie metálica, o bien, a la barrera física compuesta de un material distinto al que compone la especie inhibidora que bloquea la superficie del metal. La clasificación que manejamos está en función de la reacción que inhibe. [9, 14, 15]

Existen inhibidores que reducen la concentración de iones H^+ en el ambiente, neutralizando el pH, otros inhibidores secuestran el oxígeno del medio eliminando la agresividad de este, otros previenen la formación de depósitos como es el caso del sulfuro de calcio y carbonatos que en combinación con biocidas, ayudan a controlar los organismos que favorecen a la corrosión. Existen otras sustancias como los biostatos que disminuyen y controlan la población de bacterias que tienen influencia en el fenómeno de la corrosión, por lo cual se pueden considerar como inhibidores de corrosión.

La clasificación y el entendimiento de la acción inhibidora de estas sustancias son de suma importancia para una mejor utilización en el sistema a proteger.

En la literatura [16,17] han aparecido diversas formas de clasificarlos dependiendo del criterio que se esté siguiendo, tal y como se observa en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Clasificaciones más usadas para los inhibidores de corrosión.

CARACTERÍSTICA	TIPO DE INHIBIDOR
Por la reacción parcial que interfieren	<ul style="list-style-type: none"> • Anódico • Catódico • Mixto
Por su composición	<ul style="list-style-type: none"> • Orgánico • Inorgánico
Por sus características químicas	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerte • Débil • Intermedios

Por su mecanismo	<ul style="list-style-type: none"> • De Interfase • De Membrana • Capa Difusa • Pasivantes • Neutralizador • Captador de Oxígeno
Por su aplicación	<ul style="list-style-type: none"> • De Corrosión Atmosférica • Para Soluciones Acuosas • De Decapado • Para Soluciones Alcalinas • Para Medios Acuosos

1.2.1.1 Modificadores del ambiente

La corrosión puede controlarse eliminando las especies corrosivas del medio. Las sustancias que disminuyen la corrosividad reaccionando con los agentes agresivos del medio se denominan modificadores del medio o “secuestrantes”.

En soluciones neutras o alcalinas, la reducción del oxígeno es una reacción catódica común y el oxígeno se considera como una especie agresiva. En tal situación, la corrosión puede ser controlada mediante la disminución del contenido de oxígeno a través de la adición de algún secuestrante, por ejemplo, la hidracina.

1.2.1.2 Modificadores de la interfase (metal/solución)

Los inhibidores que modifican la interfase, controlan la corrosión formando una película en la interfase metal/solución. Estos se clasifican en inhibidores fase vapor o fase líquida

- **Inhibidores en fase vapor.**

Una protección temporal contra la corrosión particularmente en ambientes cerrados se puede llevar a cabo utilizando inhibidores en fase vapor. Las sustancias que tienen baja pero significativa presión de vapor con propiedades inhibidoras son efectivas, capaces de evaporarse y condensar, sobre la superficie a proteger, en volúmenes cerrados ^[18].

En contacto con la superficie metálica, el vapor de estas sales condensa y se hidroliza en contacto con la humedad.

- **Inhibidores en fase líquida.**

Los inhibidores fase líquida se clasifican como anódicos, catódicos, o mixtos, dependiendo si inhiben la reacción anódica, catódica o ambas.

1.2.1.2.1 Inhibidores anódicos, catódicos o mixtos ^[19]

- **Anódicos.**

Causan un gran cambio en el potencial de corrosión en dirección anódica forzando a la superficie metálica a entrar en el estado de pasivación. Existen dos tipos de inhibidores pasivantes: los aniones oxidantes, tales como, cromatos, nitratos y nitritos que pueden pasivar la superficie del acero en ausencia de oxígeno y los iones no oxidantes, tales como fosfatos, tungstos y molibdatos que requieren la presencia de oxígeno para pasivar la superficie del acero. En general este tipo de inhibidores puede causar problemas de corrosión por debajo de la concentración mínima requerida.

- **Catódicos.**

Pueden funcionar disminuyendo la velocidad de la reacción catódica o precipitando selectivamente sobre áreas catódicas limitando la difusión de especies susceptibles a reducirse en estas áreas. Algunos inhibidores catódicos, tales como los compuestos de arsénico y antimonio actúan dificultando la recombinación y evolución de hidrógeno.

Este tipo de inhibidores puede causar ampollamiento, fragilidad o agrietamiento inducido por la adsorción de hidrógeno en el acero.

Este problema puede ocurrir en soluciones ácidas en donde la reacción de reducción es la evolución del hidrógeno.

- **Mixtos.**

Compuestos orgánicos que afectan ambas reacciones electroquímicas (anódica y catódica), como regla general afectan la superficie entera cuando se adicionan en concentración suficiente. Usualmente se designan como formadores de película, protegen el metal formando una película hidrofóbica sobre la superficie metálica. Por ejemplo, el bicarbonato cálcico, forma carbonato de hierro sobre los ánodos e hidróxido cálcico sobre los cátodos.

La eficiencia de estos compuestos, se relaciona a la extensión a la cual se adsorben y cubren la superficie del metal. La efectividad depende por tanto de la composición química, de su afinidad a la superficie metálica y a la composición del medio. Debido a que la formación de la película es un proceso de adsorción, la temperatura y la presión son factores importantes.

Actualmente, los inhibidores que se están empleando para el control de la corrosión de aguas suelen ser de tipo mixto.

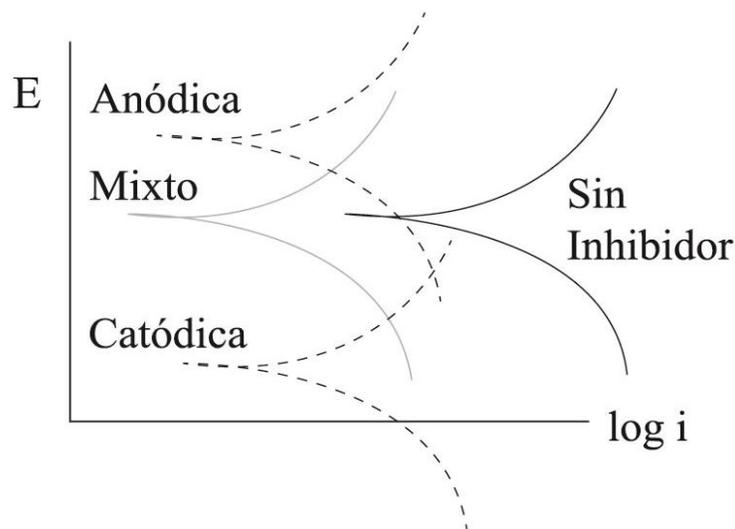


Figura 1.2 Efecto de los inhibidores (anódico, catódico y mixto sobre las curvas de polarización)

Hay que tener muy presente cuando se emplean estos inhibidores que los procesos de adsorción, muy a menudo son muy específicos y están afectados por muchos factores, como la temperatura, la velocidad de flujo del medio y las impurezas presentes en la superficie metálica.

1.2.1.3 Inhibidores orgánicos e inorgánicos

- **Orgánicos.**

Son generalmente protectores en soluciones neutras y alcalinas, pero ofrecen poca o ninguna protección en presencia de ácidos, salmueras y medios reductores. Este tipo de inhibidores protegen al metal mediante una película hidrofóbica en la superficie del metal. Los inhibidores serán fijados por adsorción según la carga iónica del inhibidor y la carga en la superficie ^[20]. Este tipo de inhibidores se aplican comúnmente en estado líquido o sólidos viscosos.

- **Inorgánicos.**

Usualmente son sales cristalinas tales como cromato, fosfato o molibdeno de sodio, que forman una película en el interior del ducto, neutralizando las sales disueltas en el agua e impidiendo su incrustación. Se suele utilizar sal de molibdeno mezclada con nitritos o fosfatos. Son útiles para circuitos de refrigeración, pero no recomendados para circuitos de calefacción o térmicos solares dado que la temperatura dificulta la formación de la película protectora en el metal ^[20]. Las formas más comunes de adicionar inhibidores inorgánicos al material son por precipitación, adsorción, adición, solubilidad, etc.

1.2.1.3.1 Inhibidores de origen natural

La naturaleza nos brinda una amplia variedad de elementos químicos. Específicamente las plantas vegetales ofrecen compuestos químicos que tienen la función de ser antioxidantes naturales, algunas son capaces de inhibir ciertas bacterias, hongos y combatir ciertas enfermedades ^[21]. En la última década el uso de extractos de plantas se ha aplicado cada vez con más frecuencia, al poseer grupos funcionales de la química orgánica, ya que tienen propiedades anticorrosivas para diversas aleaciones, una de las características importantes que deben tener es que se busca que sean razonablemente abundantes en la región para no contribuir a la pérdida de especies y uso racional de ejemplares.

Estos inhibidores son biodegradables y no contienen metales pesados u otros compuestos tóxicos. Algunos grupos de investigación han reportado el uso exitoso de sustancias de origen natural para inhibir la corrosión de metales en medio ácido y alcalino ^[22].

El uso de compuestos orgánicos que contienen oxígeno, azufre y nitrógeno en su estructura para reducir el ataque de la corrosión en el acero ha sido estudiado, se ha visto que el sulfuro y el nitrógeno son más eficientes como inhibidores de corrosión en medios como ácido sulfúrico y ácido clorhídrico ^[23].

Estos inhibidores son adsorbidos a la superficie del metal, desplazando las moléculas de agua y formando una película, la disponibilidad de pares de electrones en las moléculas del inhibidor facilitan la transferencia de electrones del inhibidor al metal, formando un enlace covalente coordinado, la fuerza del enlace de quimisorción depende de la densidad de electrones en el átomo donador del grupo y también la polarizabilidad del grupo.

Los extractos de plantas son vistos como una rica fuente de compuestos químicos sinterizados naturalmente que se pueden extraer mediante procedimientos simples con un bajo costo. La principal causa para recurrir a estos inhibidores son los efectos riesgosos de la mayoría de los inhibidores de corrosión sintéticos ya existentes. Recientemente los extractos de plantas han vuelto a ser importantes como una fuente ambientalmente aceptable, alta disponibilidad, son renovables y biodegradables.

En trabajos previos se han estudiado algunos inhibidores de origen natural para acero al carbono en un medio ácido, a temperatura ambiente; los cuales han presentado eficiencias considerables, tales como:

Tabla 1.5 Ejemplos de inhibidores de Origen Natural previamente estudiados.

Extracto	Concentración (ppm)	Eficiencia (%)
<i>Ginko biloba</i> ^[24]	1000	92
<i>Pectina</i> ^[25]	1000	77.1
“Bejuco de Agua” ^[26] <i>(Ptychotis verticillata)</i>	1000	74
<i>Spirulina Platensis</i> ^[27]	500	75.82
“Havarí Nuga o La Peluca Banyan” <i>(Alstonia Angustifolia)</i> ^[28]	5	84
“La Gobernadora” ^[29] <i>(Larrea tridentata)</i>	1500	87.96
“El árbol del Elefante” ^[29] <i>(Pachycormus discolor)</i>	1500	94.5

Debido a ello, la presente tesis aborda el uso de un inhibidor de corrosión, el cual tenga la finalidad de buscar alternativas de mejora a la obtención y sustitución de nuevos elementos que sean seguros al medio ambiente, así como económico y desde luego que presente un porcentaje alto de inhibición. Además de demostrar las aplicaciones que tiene el Aloe Vera como un inhibidor de la corrosión.

Es importante hacer notar que el Aloe Vera es un compuesto orgánico que se encuentra en la naturaleza, por lo tanto, es de baja toxicidad y fácil adquisición a comparación de otros inhibidores y el costo del mismo es muy bajo; todo esto con el fin de evitar tener problemas a largo plazo de contaminación o alguna alteración del medio ^[30].

Con base en los resultados obtenidos en investigaciones previas sobre la resina de Aloe Vera y su posible uso como inhibidor de la corrosión del acero, los cuales indicaron que la especie vegetal aloe vera posee un efecto de protección que disminuye la corrosión del acero en medios ácidos ^[30], fue que se decidió utilizar y comprobar los efectos benéficos del Aloe Vera como inhibidor de la corrosión.

1.2.1.3.1.1 Aloe Vera

Su nombre viene del griego “aloê”; y en árabe se llama “alloeh”, que significa: “la sustancia amarga brillante”, sin embargo, recientemente la planta se ha conocido bajo diversos nombres como sábila, *Aloe vera*, *Aloe Curacao*, *Aloe barbadensis* Miller o coloquialmente como sábila

El *Aloe vera* tiene amplios usos en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética; así mismo, la parte que más se usa de esta planta es el gel, debido a sus propiedades funcionales, antioxidantes y terapéuticas.

Un adecuado aprovechamiento de la planta está asociado al contenido de sus componentes bioactivos, a su microestructura (Figura 1.3 y 1.4) y los métodos para preservar y estabilizar los productos obtenidos a partir del gel. [31]

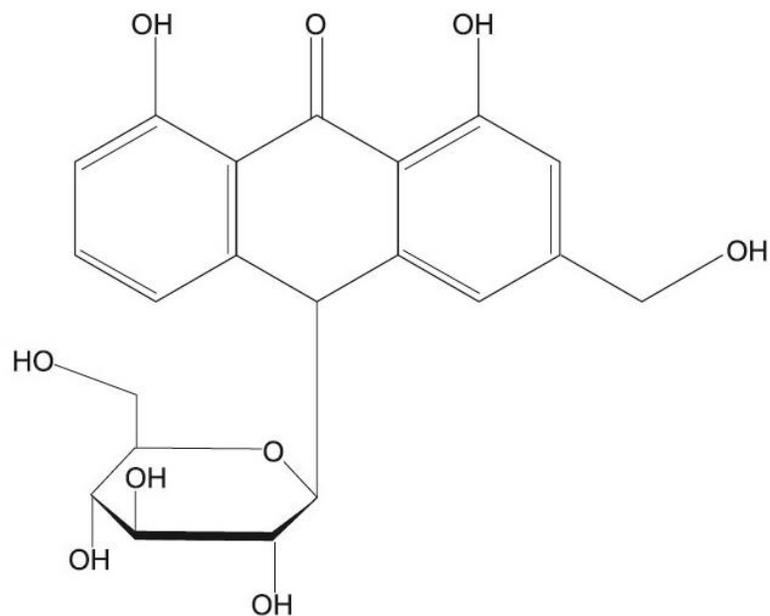


Figura 1.3 Formula estructural de la Aloína [32]

La corteza representa aproximadamente del 20 al 30 % del peso de toda la planta y dicha estructura es de color verde o verde azulado, dependiendo de diversos factores tales como: el lugar, clima o nutrición de la planta.

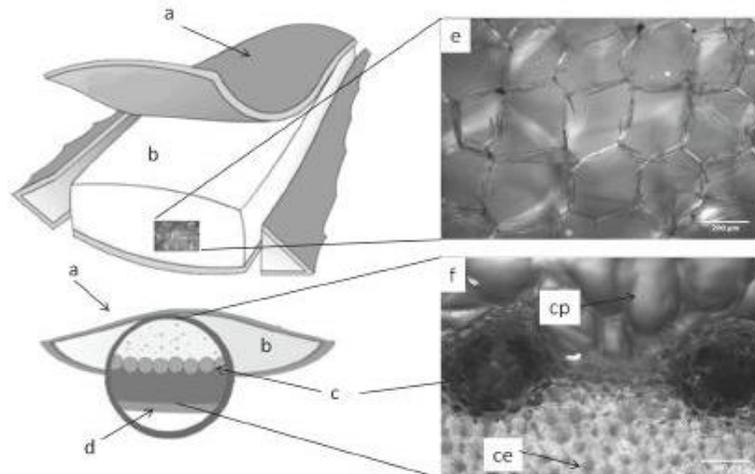


Figura 1.4 Estructura y microestructura de la hoja de Aloe vera

En la figura 1.4 se puede notar que el exocarpio (a), pulpa o tejido parenquimático (b), conductos de aloína (c) y cutícula (d) son imágenes de microscopía de luz tomadas a una magnificación de 5x de las células de parénquima (e) y de un corte seccional de la hoja de Aloe vera (f) donde se observan con gran detalle células internas del exocarpio (ce), células del parénquima (cp) y conductos de aloína (c).^[31]

El parénquima, conocido comúnmente como pulpa o gel, se localiza en la parte central de la hoja y representa del 65 al 80 % del peso total de la planta.^[33]

El gel está constituido principalmente de agua, mucílagos y otros carbohidratos, ácidos y sales orgánicas, enzimas, saponinas, taninos, heteróxidos antracénicos, esteroides, triacilglicéridos, aminoácidos, ARN, trazas de alcaloides, vitaminas y diversos minerales^[34].

El uso potencial de los productos de sábila con frecuencia, implica algún tipo de tratamiento, por ejemplo, calefacción, deshidratación o molienda. Desafortunadamente y debido a los procesamientos inadecuados que se llevan a cabo durante la preparación y estabilización del gel, se causan modificaciones irreversibles en componentes bioactivos como polisacáridos y compuestos antioxidantes, afectando su estructura original y promoviendo cambios importantes en las propiedades bioquímicas, haciendo que muchos de los productos contengan muy poco o casi ningún ingrediente activo^[32].

1.2.2 Mecanismo de inhibición de la corrosión

Entender los mecanismos que actúan en la cinética de los inhibidores de corrosión no es tarea fácil, ya que cada compuesto presenta una forma característica de inhibir la corrosión.

El mecanismo por el cual los compuestos orgánicos prevén la corrosión todavía no es muy conocido, sin embargo este mecanismo se basa en las propiedades del compuesto dependiendo del tipo de inhibidor.

Los efectos pueden determinarse mediante técnicas electroquímicas aplicadas al metal cuando está expuesto a un medio corrosivo, corroborando su eficiencia.

Cao ^[37] observó que el cambio del potencial de corrosión es despreciable cuando aumenta la inhibición en la interfase, y que este fenómeno es causado por el efecto del bloqueo geométrico del adsorbato de las especies que inhiben en la superficie del metal corroído. Establece los dos tipos de principales de la adsorción de un inhibidor orgánico sobre una superficie de metal, ya sea del tipo físico (electrostático) y el de quimiadsorción.

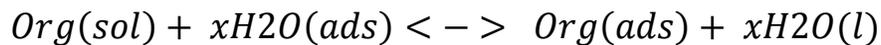
La quimiadsorción es la transferencia de las moléculas del inhibidor sobre la superficie del metal, donde se forman enlaces de tipo coordinado. La quimiadsorción probablemente es el tipo más importante de interacción entre la superficie de metal y una molécula del inhibidor.

1.2.2.1 Aspectos generales del proceso de adsorción

Cuando un inhibidor se adiciona a un sistema (fluido, electrolito o medioambiente), la molécula de inhibidor se adsorbe en la interfase metal-solución, lo cual se acompaña por un cambio en la diferencia de potencial entre el metal y la solución debida a la distribución no uniforme de las cargas eléctricas en la interfase.

La adsorción física ocurre como resultado de las fuerzas electrostáticas entre la carga eléctrica sobre el metal y la carga iónica o dipolos de las moléculas del inhibidor.

La adsorción de un compuesto orgánico en la interfase metal-solución, puede ocurrir como resultado de un proceso de adsorción sustitucional entre las moléculas orgánicas presentes en la solución acuosa (Org_{sol}) y las moléculas de agua previamente adsorbidas sobre la superficie metálica (H_2O_{ads}).



Donde $Org(sol)$ y $Org(ads)$, son las especies orgánicas en el seno de la solución y la especie adsorbida sobre el metal y x es el número de moléculas de agua desplazadas ^[16, 17, 35].

1.3 TIPOS DE FLUÍDO EN TUBERIAS: FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO

Cuando entre dos partículas en movimiento existe gradiente de velocidad, o sea que una se mueve más rápido que la otra, se desarrollan fuerzas de fricción que actúan tangencialmente a las mismas.

Las fuerzas de fricción tratan de introducir la rotación entre las partículas en movimiento, pero simultáneamente la viscosidad trata de impedir la rotación.

Cuando el gradiente de velocidad es bajo, la fuerza de inercia es mayor que la fricción, las partículas se desplazan pero no rotan, o lo hacen pero con muy poca energía, el resultado final es un movimiento en el cual las partículas siguen trayectorias definidas, y todas las partículas que pasan por un punto en el campo del flujo siguen la misma trayectoria. Este tipo de flujo fue identificado por O. Reynolds y se denomina “laminar”, queriendo significar con ello que las partículas se desplazan en formas de capas o laminas.

A medida que la velocidad se incrementa, estas láminas continúan moviéndose en líneas rectas hasta que se alcanza una velocidad en donde las láminas comienzan a ondularse y se rompe en forma brusca y difusa como se aprecia en la Figura 1.6, esto ocurre en la llamada velocidad crítica.

Al aumentar el gradiente de velocidad se incrementa la fricción entre partículas vecinas al fluido, y estas adquieren una energía de rotación apreciable, la viscosidad pierde su efecto, y debido a la rotación las partículas cambian de trayectoria a otras, las partículas chocan entre si y cambian de rumbo en forma errática. Este tipo de flujo se denomina “turbulento”.

El flujo “turbulento” se caracteriza porque:

- Las partículas del fluido no se mueven siguiendo trayectorias definidas.
- La acción de la viscosidad es despreciable.
- Las partículas del fluido poseen energía de rotación apreciable, y se mueven en forma errática chocando unas con otras.
- Al entrar las partículas de fluido a capas de diferente velocidad, su momento lineal aumenta o disminuye, y el de las partículas vecinas las hacen en forma contraria.

Cuando las fuerzas de inercia del fluido en movimiento son muy bajas, la viscosidad es la fuerza dominante y el flujo es laminar. Cuando predominan las fuerzas de inercia el flujo es turbulento. Osborne Reynolds estableció una relación que permite establecer el tipo de flujo que posee un determinado problema.

Para números de Reynolds bajos el flujo es laminar, y para valores altos el flujo es turbulento. O. Reynolds, mediante un aparato sencillo fue el primero en demostrar experimentalmente la existencia de estos dos tipos de flujo.

Mediante colorantes agregados al agua en movimiento se puede demostrar que en el flujo laminar las partículas de agua y colorante se mueven siguiendo trayectorias definidas sin mezclarse, en cambio para un flujo turbulento las partículas de tinta se mezclan rápidamente con el agua.

Experimentalmente se ha encontrado que en tubos de sección circular cuando el número de Reynolds pasa de 2400 se inicia la turbulencia en la zona central del tubo y depende de las condiciones estáticas del conjunto. Para números de Reynolds mayores a 4000 el flujo es turbulento.

En la Figura 1.5 se muestran los diferentes tipos de flujos que existen.

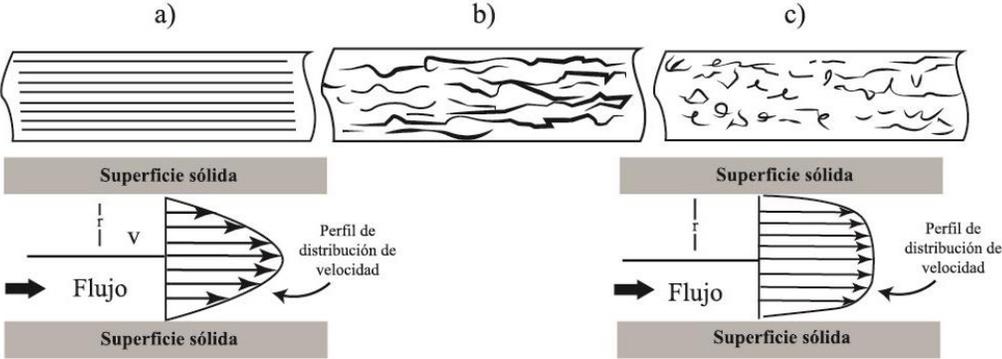


Figura 1.5. Figuras que muestran los filamentos coloreados que se transportan a través de a) Flujo laminar y su respectivo perfil de distribución de velocidad dentro del tubo, b) Flujo en la zona crítica, c) Flujo turbulento y perfil de distribución de velocidad. [36]

Las investigaciones de Reynolds demostraron que el régimen de flujo en tuberías, es decir, si es laminar o turbulento, depende del diámetro de la tubería, densidad, viscosidad de fluido y la velocidad del flujo. El valor numérico da una combinación adimensional de estas cuatro variables, conocido como el número de Reynolds (ecuación 2), puede considerarse como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad.

$$Re = \frac{Du\rho}{\mu} \tag{2}$$

Donde:

D = Diámetro interior de la tubería
 u = velocidad promedio

ρ = Densidad del fluido.
 μ = Viscosidad cinemática del fluido.

A continuación se presenta una pequeña tabla que logra hacer referencia al número de Reynolds correspondiente a cada velocidad de rotación, el tipo de ducto trabajado y los rangos aproximados de flujo de ducto según lo reportado en la norma NRF-005-PEMEX-2009 [39].

Tabla 1.6 Número de Reynolds correspondiente a cada velocidad de rotación [39].

Velocidad de Rotación (rpm)	Reynolds	Tipo de Flujo	Velocidades aproximadas dadas por la norma NRF-005-PEMEX-2009			
			Flujo en Ducto			r/min equivalentes para electrodo rotatorio
			Barriles/Día	L/min	Cm/s	
0	0	Estático	-----	-----	-----	-----
100	979	Turbulento	1757	194	10	94
1000	9785	Turbulento	15813	1746	90	945
			17576	1940	100	1057

1.4 ELECTRODO DE CILINDRO ROTATORIO (ECR)

Como parte esencial en el desarrollo experimental de este trabajo, se utilizó el Electrodo de Cilindro Rotatorio; con el que en la etapa experimental se evaluó la eficiencia de un inhibidor mediante la observación de su comportamiento aplicando los métodos Rp y EIS.

Mediante este instrumento se puede estudiar la velocidad de corrosión bajo ciertas condiciones hidrodinámicas (flujo turbulento) dentro de una celda electroquímica a volúmenes pequeños de electrolito, donde se hace girar un espécimen de prueba midiendo la velocidad de corrosión en la superficie del metal.

Permite obtener resultados reproducibles, por ello es muy usado en el estudio de transporte de masa, efectos en la superficie de películas, fenómenos de inhibición, etc; además de que a bajas velocidades de rotación permite trabajar en un flujo turbulento ($Re > 200$) [1].

La norma NFR-005-PEMEX-2009 ^[39], marca ensayos electroquímicos para la evaluación de los inhibidores a diferentes tipos de flujos obtenidos a partir de su simulación usando el Electrodo de Cilindro Rotatorio.

Tabla 1.7 Revoluciones por minuto para la obtención del fluido según el ducto destinado.

Flujo en Ducto			Rpm equivalentes para Electrodo de Cilindro Rotatorio
Barriles/Día	L/min	cm/s	
176	19	1	9
1 757	194	10	94
3 514	388	20	193
5 271	582	30	293
7 026	776	40	394
8 765	970	50	507
10 542	1 164	60	615
12 299	1 358	70	724
14 056	1 552	80	834
15 813	1 746	90	945
17 570	1 940	100	1 057
35 141	3 880	200	2 202
52 711	5 820	300	3 382
70 282	7 760	400	4 586
87 852	9 700	500	8 809
105 423	11 640	600	7 046
122 993	13 579	700	8 295
140 564	15 519	800	9 555
156 134	17 459	900	10 824
175 705	19 399	1 000	12 01

1.4.1 Esfuerzo cortante para geometría cilíndrica

El gradiente de velocidad del fluido tiene una influencia de forma significativa, el proceso de corrosión (creando un esfuerzo cortante), tanto como el gradiente de concentración de especies reactivas con respecto a la superficie del electrodo.

El esfuerzo cortante inducido puede remover productos de corrosión o películas inhibidoras. Aquí la velocidad de pérdida total de metal está definida por la velocidad de la reacción anódica después de un decapado mecánico o erosión mecánica. Por lo tanto, el “Esfuerzo Cortante Crítico” es el esfuerzo requerido para remover películas protectoras [1].

Es importante recordar que la igualdad de esfuerzos cortantes en laboratorio y campo no produce la igualdad exacta de coeficientes de transferencia de masa que dependen de sus respectivas velocidades de flujo.

El electrodo de cilindro rotatorio puede ser utilizado para simular condiciones de flujo de otra geometría, si la misma es tangencial a la superficie del electrodo usando la velocidad de rotación apropiada [1].

El esfuerzo en la superficie para ECR está dado por:

$$\tau \left(\frac{kg}{ms^2} \right) = cte \frac{f}{2} \rho \omega^2 r^2 \quad (3)$$

Donde: f = Factor de fricción

Re y la rugosidad de la superficie son factores importantes en la determinación del esfuerzo cortante. Para un cilindro liso el valor de $f/2 = 0.079Re^{-0.30}$ lo cual al sustituir y arreglando términos se expresa:

$$\tau = 0.064 r^{1.4} \omega^{1.7} \rho^{0.7} \mu^{0.3} \quad (4)$$

1.5 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS

No existe un método universal a escala de laboratorio para pruebas de inhibidores de corrosión. Sin embargo, existen diferentes pruebas que se han llevado a cabo a fin de estudiar los parámetros que pueden afectar el desempeño de un inhibidor cuando se aplica en campo.

Las técnicas electroquímicas se utilizan a menudo para estudiar la eficiencia de un inhibidor en un metal de interés en pruebas a nivel laboratorio, es decir, en un medio de prueba. La selección de técnicas electroquímicas para la evaluación de inhibidores depende del objetivo que se pretenda estudiar.

Los sistemas electroquímicos constan de 3 electrodos: el de trabajo (el metal o material de estudio), el de referencia (el cual se encarga de proporcionar un potencial de referencia constante, así como contabilizar las señales de los otros dos pero este no se oxida ni se reduce; este puede ser de H_2 , Hg_2Cl_2 , $Ag/AgCl$, $Cu/CuSO_4$) y un contra electrodo (que drena la señal de salida del sistema y en él se genera la reacción inversa a la del electrodo de trabajo); así como también un medio de transferencia de masa y carga, considerado un electrolito sin el cual se considera que el sistema electroquímico no podría ser estudiado.

A grandes rasgos, se puede decir que una técnica electroquímica para el análisis de la corrosión consiste en el manejo de señales eléctricas. Es la aplicación de una señal eléctrica, la cual perturba al electrodo de trabajo, la medición y análisis de la respuesta que presente el sistema. La aplicación de estas señales puede ser directa o alterna.

Las desventajas de algunas de estas técnicas, es que al perturbar el sistema, esto conduce a cambios de las propiedades del sistema, tales como la estructura, rugosidad de la superficie, adsorción y desorción de hidrógeno, formación de capas de productos de corrosión sobre la superficie, proceso de adsorción de inhibidores, reacciones óxido – reducción, etc.

1.5.1 Potencial de corrosión vs tiempo (E_{corr} vs t)

Con esta técnica electroquímica se monitorea el cambio en el potencial de corrosión (E_{corr}) en función del tiempo. El potencial obtenido puede proporcionar información sobre el comportamiento activo-pasivo de un material metálico en un medio corrosivo. Este potencial es medido respecto a un electrodo de referencia.

1.5.2 Resistencia a la polarización (R_p)

Diversos investigadores ^[40] observaron que a polarizaciones anódicas y catódicas de unos cuantos mili volts a partir del E_{corr} , la densidad de corriente neta es una función lineal del potencial del electrodo en las curvas de polarización (Figura 1.6). Como resultado el método fue nombrado como la polarización lineal. Sin embargo posteriormente se observó que la linealidad era restringida a un intervalo de potencial exclusivamente.

La resistencia a la polarización, definida como la pendiente de la curva corriente vs potencial en el E_{corr} es independiente del grado de linealidad. De esta manera el método fue denominado simplemente como resistencia a la polarización (R_p).

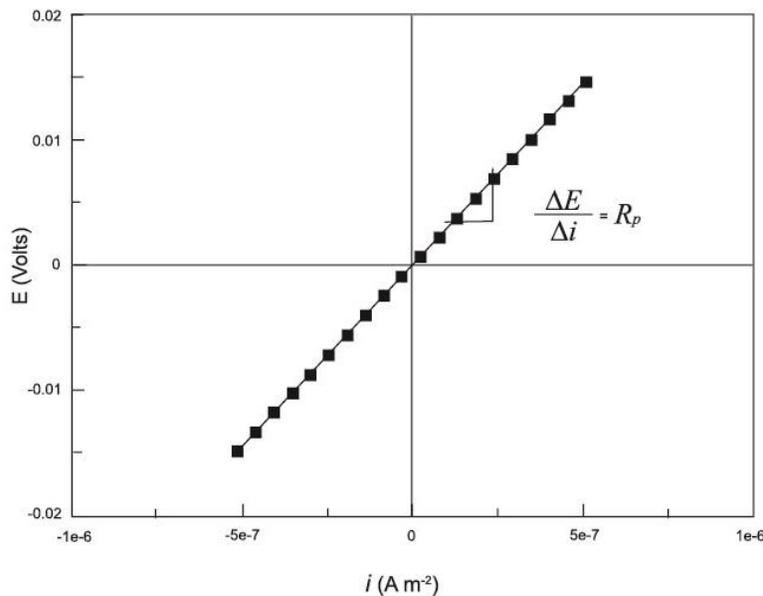


Figura 1.6. Gráfica de potencial (E) vs densidad de corriente.

R_p es la resistencia a la polarización dada en $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

Stearn y Geary obtuvieron una ecuación, la cual es una aproximación para la cinética de reacción controlada por transferencia de carga para el caso de sobre potenciales pequeños.

$$Rp = \left[\frac{\Delta E}{\Delta i} \right] = \left(\frac{babc}{2.303 i_{corr} (ba + bc)} \right) \quad (5)$$

Despejando i_{corr} en la ecuación anterior se tiene que:

$$i_{corr} = \frac{babc}{2.303 Rp (ba + bc)} \quad (6)$$

Y se define una constante B, denominada constante de Stern-Geary.

$$B = \frac{babc}{2.303 (ba + bc)} \quad (7)$$

Entonces:

$$i_{corr} = \frac{B}{Rp} \quad (8)$$

B es una constante (Denominada constante de Stern-Geary), la cual establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}); es decir, la velocidad de corrosión con la resistencia a la polarización (ec. 8). Esta ecuación recuerda la conocida Ley de Ohm, donde se establece que la diferencia de potencial entre dos puntos tiene como resultado un flujo de corriente limitado, esto por la presencia de una resistencia.

Esta constante depende de las pendientes de Tafel; por lo que, cuando una de las reacciones presenta desviación del comportamiento de Tafel en las reacciones involucradas en el proceso de corrosión, la determinación de la constante B se reduce a:

$$B = \frac{ba}{2.303} \quad \text{Si } bc \rightarrow \infty \text{ (control por transporte de masa)}$$

$$B = \frac{bc}{2.303} \quad \text{Si } ba \rightarrow \infty \text{ (pasivación)}$$

La densidad de corriente obtenida (i_{corr}) se transforma a través de factores de conversión correspondientes a las leyes de Faraday de carga y masa para Fe (en este ejemplo), hasta el parámetro Velocidad de corrosión (V_{corr}).

$$10^{\log i_{corr}} \left(\frac{A}{cm^2} \right) \left(\frac{1 C}{1 A \cdot s} \right) \left(\frac{1 eq-mol}{96500 C} \right) \left(\frac{56 g Fe}{1 mol} \right) \left(\frac{1 cm^3}{7.8 g Fe} \right) \left(\frac{10 mm}{1 cm} \right) \left(\frac{3600 s}{1 hr} \right) \left(\frac{24 hr}{1 día} \right) \left(\frac{365 días}{1 año} \right) = V_{corr} \left(\frac{mm}{año} \right) \quad (9)$$

Para que sea aplicable la ecuación de Stern y Geary, es indispensable que exista una región Tafeliana en el sistema electroquímico (que al menos tenga una región lineal dentro de la curva en al menos una década de corriente).

En los sistemas electroquímicos controlados por difusión, se presenta un fenómeno especial en el que la corriente catódica se ve limitada por la concentración de los reactivos catódicos, es decir, por el transporte de masa a través del electrolito (difusión) ^[40].

Cuando hay control difusional, se dice que se tiene una corriente límite, con una pendiente de Tafel catódica que tiende al infinito. La ecuación de Stern-Geary se ve reducida a la siguiente expresión:

$$i_{corr} = \frac{ba}{(2.303 Rp)} \quad (10)$$

La determinación de la velocidad de corrosión mediante la aplicación de la técnica de resistencia a la polarización, presenta las siguientes ventajas ^[40]:

- Permite el cálculo de la velocidad de corrosión instantánea y la velocidad de corrosión puede monitorearse constantemente.
- Es una técnica económica además de no destructiva, a diferencia de la técnica de extrapolación de Tafel, la cual es una técnica destructiva debido al paso de grandes corrientes a través de la interfase metálica.
- Presenta un corto intervalo de perturbación, por lo que no modifica de forma significativa las propiedades del material.

Limitaciones de la técnica:

- Es necesario que el potencial sea estable
- Caída óhmica en sistemas altamente resistivos, lo que la hace poco recomendable.
- Solo puede emplearse para sistemas controlados por transferencia de carga.
- Es necesario seleccionar una velocidad de barrido adecuado.

1.5.3 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

Método electroquímico basado en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo (metal en corrosión) determinando la respuesta correspondiente ^[41].

En las técnicas de corriente alterna, vistas a nivel macro, la polarización es hacia los sentidos de oxidación y reducción, de modo que según la frecuencia de cambio de esta polaridad el electrodo pasará de ser cátodo a ánodo continuamente y en teoría, el efecto destructivo de la técnica se vería aminorado. La técnica es funcional en el bajo campo, y los resultados son comparables con los de R_p .

En el procedimiento experimental se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial contra tiempo, dando como resultado valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada ^[41].

En el caso de los estudios de corrosión, los espectros de impedancia obtenidos suelen ser analizados mediante circuitos eléctricos equivalentes entre la superficie de trabajo y la interfase de la solución (Figura 1.7), los cuales son una combinación de elementos de circuitos eléctricos básicos con un significado físico

del sistema en cuestión, es decir, que dichos elementos se comportan de manera similar a la superficie del electrodo que se está corroyendo.

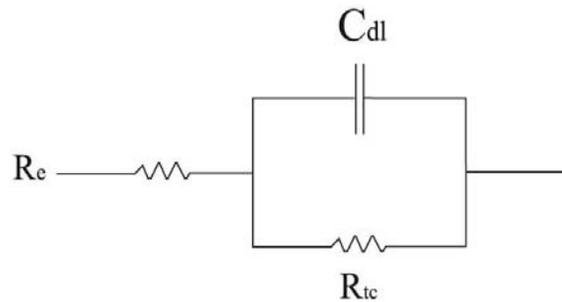


Figura 1.7 Circuito de Randles ^[41].

Donde (R_e) representa la Resistencia al Electrolito, (C_{dl}) un capacitor que combinado con la Resistencia a la Transferencia de Carga (R_{tc}), representan la interfase corroyéndose, aunque cada uno de estos tres elementos se asocia a diferentes fenómenos electroquímicos.

La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (E), utilizada en circuitos de corriente alterna (CA). En un circuito de corriente directa (CD) la relación entre la corriente (I) y el potencial (E) está dada por la ley de ohm.

$$E = IR$$

Donde:

E= Volts
I= Amperes
R= Ohms

En el caso de una señal alterna la expresión equivalente es la siguiente:

$$E = IZ$$

Donde Z representa la impedancia de circuito, con unidad de ohm.

Es necesario hacer notar que a diferencia de la resistencia, la impedancia de un circuito de corriente alterna depende de la frecuencia de la señal que sea aplicada.

La frecuencia (f) de un sistema de CA se expresa en unidades de Hertz (Hz) o número de ciclos por segundo.

Cuando la impedancia es medida a un número determinado de frecuencias y se grafica en un plano cartesiano, a la gráfica se le conoce como Diagrama de Nyquist, (algunas ocasiones referida como gráfica del plano complejo) donde cada punto del diagrama representa la impedancia a una frecuencia correspondiente. El eje horizontal del gráfico corresponde a la parte real de la impedancia (Z'') (componente resistivo) y el eje de las ordenadas corresponde al componente imaginario (Z') (reactancia capacitiva).

Los valores en altas frecuencias se representan del lado izquierdo del diagrama y proporcionan información sobre las impedancias dominadas por la resistencia de la solución, mientras que las bajas frecuencias se grafican del lado derecho y representan fenómenos de transferencia de masa, capacitancias asociadas a crecimientos de película y fenómenos pseudocapacitivos de adsorción. Se debe mencionar, que a cada valor de impedancia representado en el diagrama le corresponde un valor de frecuencia dada aunque no se observa explícitamente.

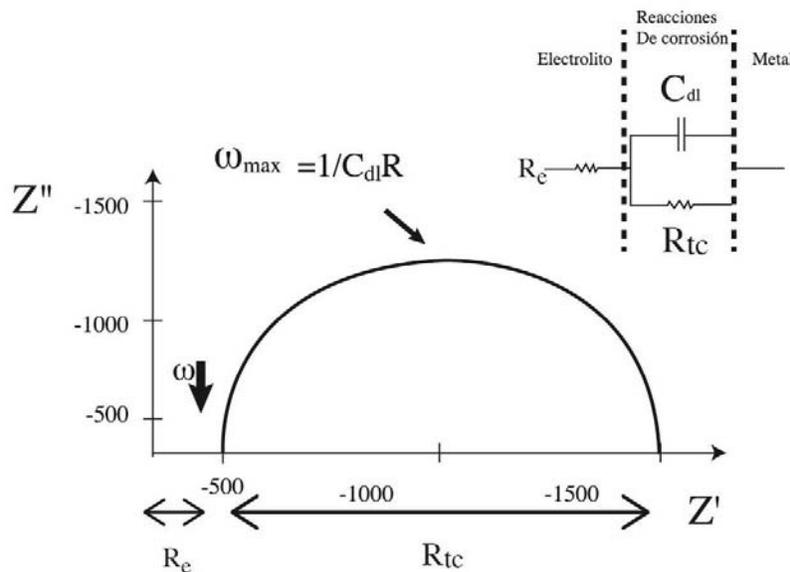


Figura 1.8 Diagrama de Nyquist que representa el proceso del circuito de Randles ^[42]

Al no aparecer de manera explícita la frecuencia en el diagrama Nyquist, es obtenida del diagrama de Bode, donde se presentan los diferentes parámetros de la impedancia contra la frecuencia.

Las representaciones de Bode contienen toda la información de un ensayo de EIS, ya que las frecuencias pueden identificarse claramente.

Los diagramas de Bode presentan información cuando sobre el electrodo tiene lugar más de una reacción, así como, en aquellos que tienen varias constantes de tiempo, las cuales pueden cambiar con el potencial.

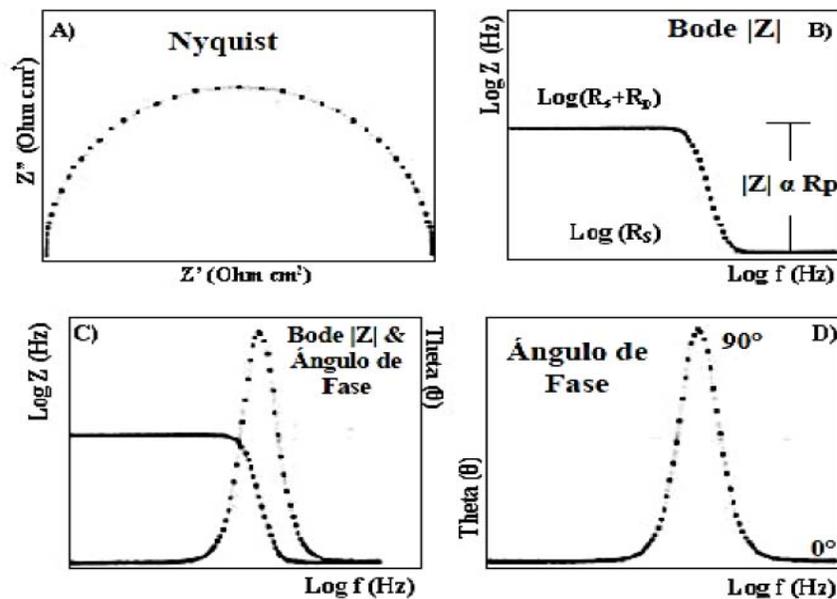


Figura 1.9 Presentación de datos de la técnica de impedancia. **A)** Gráfico de Nyquist (Z' vs Z''), **B)** Diagrama de Bode ($\text{Log } |Z|$ vs $\text{Log } f$, correspondiente al Gráfico A), **C)** Diagrama de Bode ($\text{Log } f$ vs $\text{Log } Z$), **D)** Diagrama de Bode ($\text{Log } f$ vs Ángulo Theta, correspondiente al Gráfico A) [42].

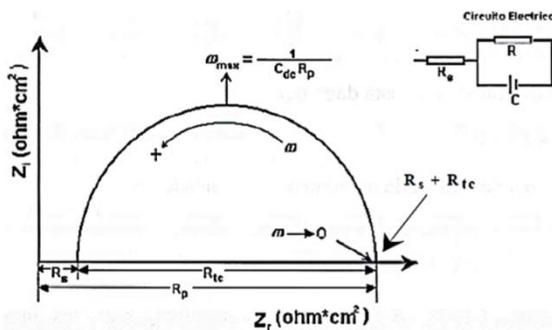


Figura 1.10 Diagrama de Nyquist. Sistema de transferencia de carga simple [42].

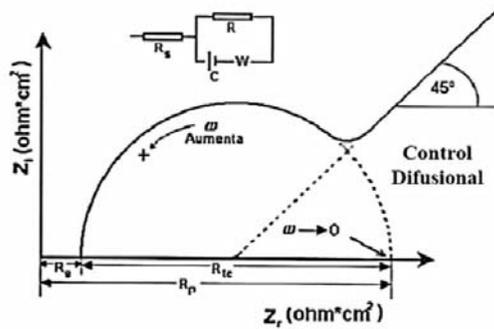


Figura 1.11 Diagrama de Nyquist. Sistema controlado por transferencia de carga y difusión.

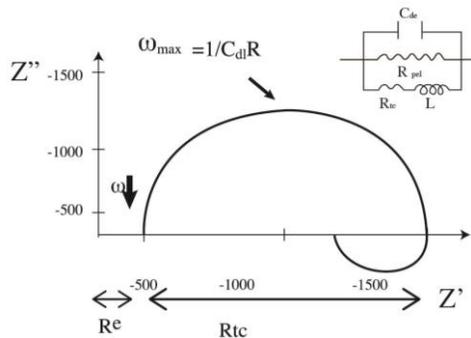


Figura 1.12 Diagrama de Nyquist. Sistema controlado por transferencia de carga y por adsorción de especies.

1.5.4 Polarización potenciodinámica cíclica

Esta técnica electroquímica permite estudiar la susceptibilidad a la corrosión generalizada y localizada a través de parámetros como la densidad de corriente de corrosión y de pasivación, el potencial de corrosión, de picadura, de repasivación, la anchura del bucle de histéresis anódico y la densidad de corriente de repasivación.

Las curvas de polarización cíclicas muestran la dependencia entre el potencial de electrodo y la intensidad de corriente (relaciones i vs E).

Estas pueden determinarse aplicando una corriente constante y midiendo el potencial, repitiendo este procedimiento para diversos valores de corriente y midiendo en cada caso el nuevo potencial alcanzado.

Otra forma de determinar la relación $i - E$ es aplicando un potencial constante y determinando la forma en que varía la corriente.

En una solución acuosa la superficie alcanzará el valor de un potencial relativamente estable E_{corr} que dependerá de la habilidad y la velocidad con que los electrones pueden intercambiarse en las reacciones anódica y catódica.

La mejor manera de analizar estas curvas es en forma semilogarítmica, ya que este tipo de representación permite observar perfectamente la zona de pasividad en la que la densidad de corriente permanece estable y la ruptura de la capa pasiva como consecuencia de las picaduras, así como el bucle de histéresis producido al invertir el sentido del barrido de potenciales.

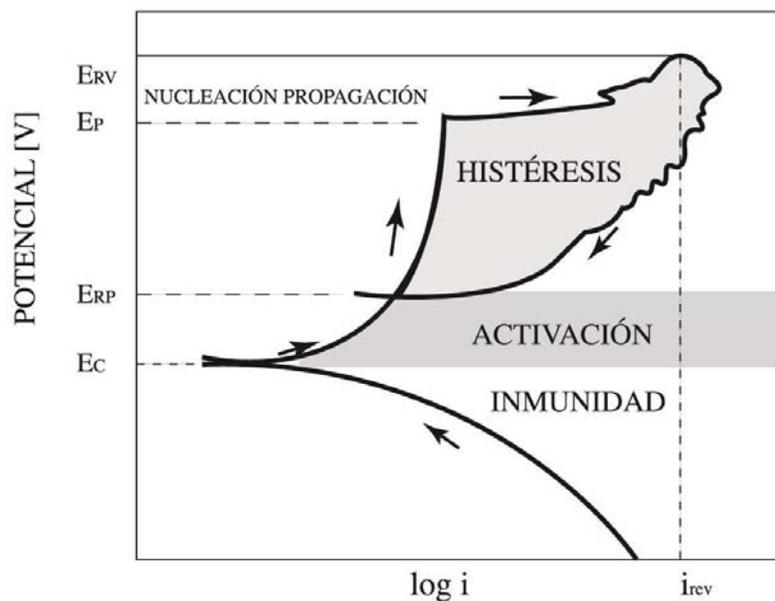


Figura 1.13 Esquema de una curva de polarización que muestra el potencial crítico y la región metaestable de la picadura. [43]

E_p : Potencial de Picado, E_r : Potencial de Repasivación, E_{corr} : Potencial de corrosión

El análisis de la curva de polarización anódica juntamente con el de la curva de polarización catódica permite deducir la condición espontánea del sistema, es decir, cuando no se aplique polarización sobre el mismo, que corresponde al potencial a circuito abierto E_{corr} .

Además permite determinar si un metal es susceptible a la corrosión uniforme o al ataque localizado. Si se polariza un electrodo primero en sentido anódico y luego en sentido catódico se puede obtener pares de valores de corriente y potencial.



CAPÍTULO II

DESARROLLO

EXPERIMENTAL

2.1 METODOLOGÍA

En este capítulo, se mencionan los pasos que se emplearon para realizar la selección del compuesto orgánico evaluado como inhibidor de corrosión, así como también las características del mismo.

2.1.1 Selección, caracterización y preparación de muestras metálicas

Dado que en el laboratorio no se contaba con el acero que se maneja a nivel industrial (API X52), se empleó un acero SAE 1018, el cual cuenta con una composición química muy similar a la del acero API. Como se muestra en la Tabla 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1 Composición química para el acero API X52 ^[36].

% C	% Mn	% Si	% P	% S
0.210	1.21	0.050	0.021	0.019

Tabla 2.2 Composición química para el acero SAE 1018 ^[44].

% C	% Mn	% Si	% P	% S
0.15 – 0.20	0.60 – 0.90	0.15 – 0.30	0.04 Max.	0.05 Max.

Los aceros al carbono son los materiales empleados habitualmente en la evaluación de inhibidores en la industria petrolera. El principal motivo de esto se basa en razones económicas, ya que resulta un material de bajo costo, fácil de adquirir, se puede maquinarse en todas las condiciones, es resistente a cambios drásticos de temperatura y es dúctil. Sin embargo estos aceros pueden o no ser resistentes al ambiente químico en el cual se expongan. ^[45]

Para todas las pruebas electroquímicas se utilizaron muestras cilíndricas de acero SAE 1018 (d= 0.9 cm, h= 1.3 cm) con un área expuesta de 4.94 cm².

Para verificar que las muestras metálicas cumplieran con la composición química propia del acero 1018 se tomó una de ellas como muestra patrón a la cual se le realizó un análisis metalográfico, así como de composición química.

Las probetas, al no encontrarse recién maquinadas, se tuvieron que caracterizar metalográficamente de acuerdo a la norma ASTM E3-01 ^[46] realizándoles un pulido mecánico con lijas del número 240, 320, 400, 600 y 1000, posteriormente paño grueso y paño fino, usando en ambos casos como abrasivo alúmina. Una vez realizado lo anterior se enjuagaron con agua destilada y desengrasados con acetona, se secaron con papel absorbente para su consecuente uso.

Esta preparación se hizo con la finalidad de obtener una superficie totalmente limpia y homogénea sobre la cual poder trabajar.

2.1.2 Selección y preparación de medio de prueba

El medio de prueba corrosivo con el que se trabajó fue elaborado con base en la norma NACE TM0177-86 ^[41], ya que este medio suele ser el más utilizado para la evaluación de metales y aleaciones sometidos a corrosión, muy común en la industria petrolera. En este método, se utiliza una solución altamente corrosiva en contacto con el material a evaluar. La alta agresividad del medio de evaluación resulta adecuada para tener resultados confiables en muy poco tiempo, además de que se cuenta con la presencia de 2 de los agentes corrosivos más importantes en las plantas de destilación primarias (ácido acético y cloruros),

La norma NACE TM0177-86 ^[47] indica la preparación de una solución salina-acética para lograr la siguiente composición: 50 wt% NaCl y 5 wt% CH₃COOH glacial en agua destilada.

Se pesaron 50 g de NaCl en una balanza analítica y se midieron 5 mL de CH₃COOH glacial con una jeringa y se llevaron al aforo en un matraz de 1000 mL con agua destilada. Posteriormente se vertió la solución en un matraz de bola de 5 bocas con capacidad de 1000 mL. Los reactivos para la elaboración de la solución fueron de grado analítico.

Todas las pruebas realizadas se efectuaron a temperatura ambiente.

El pH con el que se trabajó durante toda la experimentación fue de ± 3 .

2.1.3 Selección y preparación del inhibidor

La selección de un producto para aplicación en campo usualmente, se basa en resultados de pruebas de laboratorio y campo. Idealmente las pruebas deben reproducir todos los parámetros relevantes de campo. En realidad, el tiempo, esfuerzo y costos requeridos para diseñar y efectuar una prueba que reproduzca todas las condiciones reales hace impráctico lo anterior.

Petróleos Mexicanos, a través de sus organismos subsidiarios (PEMEX Exploración y Producción, PEMEX Gas y Petroquímica básica, PEMEX Petroquímica y PEMEX Refinación), utilizan la norma de referencia NFR-005-PEMEX-2009-F ^[39] “Protección de ductos con Inhibidores” para la selección y evaluación de inhibidores de corrosión destinados a aplicarse al campo. La norma de referencia establece que para ductos de transporte con dosificación de un inhibidor de corrosión, la velocidad de corrosión máxima aceptable será de 0.05 mm/año.

Dado lo anterior, se sugiere el empleo de un inhibidor de origen natural como el aloe vera. Es importante enfatizar que para esta planta no se tiene definida la sustancia activa, ya que contiene una infinidad de compuestos, sin embargo, con ayuda de la literatura es posible conocer cuales compuestos se pueden encontrar en mayor proporción.

De acuerdo a la norma NRF-005-PEMEX-2009 ^[39] se propone emplear 0, 20, 50 y 100 ppm del Aloe Vera.

Dado que el Aloe Vera con el que se trabaja se encuentra completamente fresco (es decir, aún en su forma natural directa de la planta y no como un extracto de la misma) se toma, con la ayuda de una espátula, la muestra proporcional a la concentración requerida. Esta muestra de trabajo es obtenida de la parte central de la planta (la parte conocida como pulpa o tejido parenquimático).

2.1.5 Matriz experimental

Se propuso trabajar bajo condiciones de flujo laminar y flujo turbulento

Tabla 2.3 Variables experimentales a trabajar.

Tipo de Acero	Inhibidor	Velocidad de Rotación (rpm)	Concentración (ppm)	Pruebas Electroquímicas
SAE 1018	Áloe Vera	0	0	E _{corr} vs t R _p E I S Curvas Cíclicas
			20	
			50	
			100	
		100	0	
			20	
			50	
			100	
		500	0	
			20	
			50	
			100	
		1 000	0	
			20	
			50	
			100	
		3 000	0	
			20	
			50	
			100	

Todos los ensayos se realizaron por triplicado para tener resultados más precisos de lo que se estaba trabajando

Los ensayos electroquímicos se realizaron de acuerdo a la norma NRF-005-PEMEX-2009 ^[39]

Entre cada prueba electroquímica se dejó una pausa de 5 mins

- Al término de las pruebas realizadas a las condiciones presentadas en la matriz experimental, se realizaron, con probetas de acero SAE 1018 recién maquinadas, pruebas de Impedancia Electroquímica (EIS) cada 2 hrs, durante un lapso de tiempo de 48 hrs con su respectiva media hr de estabilización del potencial antes de cada prueba.

Tabla 2.4 Variables experimentales para las pruebas de EIS durante 48hrs en modo estático.

Temperatura	Concentración (ppm)
Temperatura Ambiente ($\pm 25^{\circ}\text{C}$)	0
	50
	100
Refrigeración ($\pm 3^{\circ}\text{C}$)	0
	100

2.1.6 Instrumentación

El equipo que conformó el estudio consta de la celda electroquímica, en este caso un matraz de bola de 5 bocas (con capacidad de 1000 mL), del cual se emplearon únicamente 3 para el manejo de un electrodo de referencia de Ag/AgCl, una barra de grafito como contra electrodo y el electrodo de trabajo (el cilindro de acero).

El electrodo de trabajo se montó en un electrodo de cilindro rotatorio de la marca Pine, el cual a su vez se encontraba conectado a un potencióstato GillAc, cuyo software asociado es ACM Instruments en el canal Parallel-4-Sequencer.



Figura 2.1 Arreglo experimental de la celda electroquímica de vidrio con el ECR (marca PINE), conectada a cables adquirentes de datos de la terminal GillAc.



Figura 2.2 Vista esquemática de las dimensiones de las probetas cilíndricas de acero SAE 1018 utilizadas en las pruebas electroquímicas.

2.1.7 Pruebas electroquímicas

Aun cuando la aplicación de técnicas electroquímicas no es un hecho comúnmente aceptado en la industria, en este trabajo de investigación se utilizaron como herramienta fundamental para determinar el mecanismo de corrosión del sistema de estudio.

2.1.7.1 Monitoreo del potencial de corrosión vs tiempo

Con un potenciostato Gill AC, empleando un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata, se hizo el monitoreo durante media hora (1800 segundos) a partir de que se agregó el inhibidor a la celda electroquímica para la estabilización del potencial, con el fin de encontrar el potencial de reposo a partir del cual se realizaron las siguientes pruebas electroquímicas.

2.1.7.2 Ensayo de impedancia electroquímica

La prueba se realizó con la ayuda del potenciostato GillAc el cual permite generar polarizaciones a altas y bajas frecuencias, mismo que se encuentra acoplado a un programa de cómputo que permite la manipulación correspondiente de la información obtenida. La amplitud de la señal fue de 10 mV y el intervalo de frecuencias será de 10 kHz a 10 mHz. Se hicieron 60 lecturas por prueba (60 puntos para cada semicírculo).

Posteriormente se efectuó el cálculo de la densidad de corriente de corrosión y de la eficiencia para cada concentración de inhibidor.

2.1.7.3 Ensayo de resistencia a la polarización

Una vez obtenido el potencial de reposo se aplicó un sobre potencial $\pm 30\text{mV}$ respecto al potencial mencionado, primero en sentido catódico (-30mV) y posteriormente en sentido anódico ($+30\text{mV}$) con una velocidad de barrido de 10 mV/min , empleando el potencióstato Gill AC, electrodo de referencia de plata/cloruro de plata y contra electrodo de grafito.

Posteriormente se realizó el cálculo de la densidad de corriente de corrosión y de la eficiencia para cada concentración de inhibidor. (En caso de que el comportamiento sea Tafeliano, se emplean los valores de pendientes de Tafel).

2.1.7.4 Curvas cíclicas

Dado que es un ensayo electroquímico destructivo, la prueba se realizó al final.

Se realizaron curvas de polarización tomando $\pm 500\text{ mV}$ de sobre potencial. La velocidad de barrido es de 100 mV/min , empleando potencióstato Gill AC, electrodo de referencia de plata/cloruro de plata y contra electrodo de grafito.



CAPÍTULO III

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación de la eficiencia de inhibición para el sistema, en ausencia y presencia del inhibidor mediante el uso de las técnicas electroquímicas.

3.1. ANÁLISIS QUÍMICO Y METALOGRAFICO DE LA MUESTRA METÁLICA.

Con intención de caracterizar al electrodo de trabajo y corroborar si efectivamente se trataba de un acero SAE 1018, se llevó la pieza a un análisis químico por espectrometría de de emisión óptica (o de chispa) para corroborar la composición química de la misma (Tabla 3.1).

Al hacer un análisis de ambas composiciones químicas, se puede observar que la obtenida se encuentra, con base en la composición teórica, dentro de los rangos porcentuales establecidos para cada elemento.

Se puede ver que los porcentajes de Carbono (C), Manganeso (Mn) y Silicio (Si) se encuentran en un rango intermedio de la composición, mientras que el Fósforo (P) y Azufre (S) presentan un porcentaje muy por debajo del máximo señalado para el acero.

Con lo anterior se puede corroborar que como electrodo de trabajo se tiene un acero SAE 1018.

Tabla 3.1 Composición química obtenida a partir del análisis químico.

Composición Química	% C	% Mn	%Si	%P	%S
Teórica ^[44]	0.15 – 0.20	0.60 – 0.90	0.15 – 0.30	0.04 Max.	0.05 Max.
Obtenida	0.1567	0.8141	0.2158	0.0058	0.0051

3.1.1 Análisis de muestra metálica sin inhibidor

Aunado al análisis químico, también se realizó una metalografía al electrodo de trabajo (Figura 3.2), en la cual se puede observar una microestructura ferrítica-perlítica, característica de un acero SAE 1018.

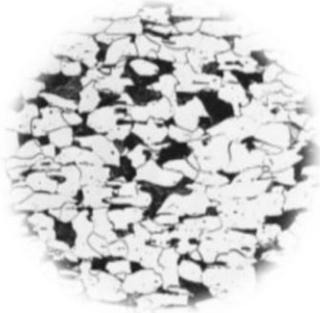


Figura 3.1 Vista microscópica de un Acero SAE 1018 (extraída de la literatura) ^[41]
Aumento 500 X



Figura 3.2 Vista microscópica de un Acero SAE 1018 (probeta de trabajo)
Reactivo de ataque: Nital 3.
Aumento 500 X

3.1.2 Análisis de muestra metálica con inhibidor

Se realizó un análisis metalográfico para las probetas expuestas a pruebas de Impedancia Electroquímica durante 48 hrs.

En la Figura 3.3, se puede notar a simple vista una gran diferencia entre el color del óxido que se presenta para cada diferente condición de trabajo, lo cual, sin haber hecho aún el análisis de las gráficas de impedancia arrojadas por el equipo, indicaba que el blanco a temperatura ambiente (Figura 3.3 a) y 3.3 b) presenta una capa de óxido relativamente gruesa (en comparación con la de las otras dos probetas) de un color bastante rojizo, donde visualmente no podía percibirse mucha superficie metálica.

Caso completamente contrario a 100 ppm en refrigeración (Figura 3.3 c), ya que por el color que presentaba la probeta (un color salmón aperlado en el momento en que se retiró de la prueba, para posteriormente ponerse ligeramente oscuro al exponerse al medio ambiente, además de la casi invisible capa de óxido), ya se podía saber que estaba actuando el inhibidor en la superficie metálica.

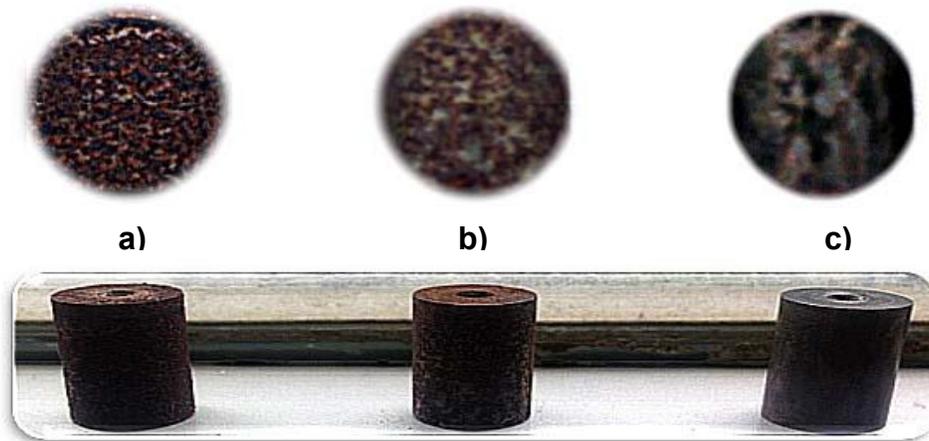


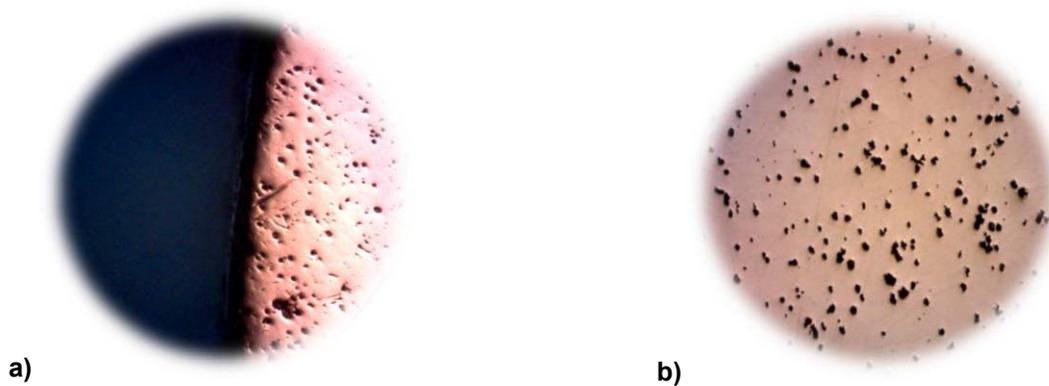
Figura 3.3 Vista inferior y frontal de las piezas seleccionadas para analizar expuestas en un medio de tipo NACE TM 0177 durante 48 hrs.

- a) A temperatura ambiente, pH= 3 con 0 ppm de inhibidor a base de Áloe Vera.
- b) En refrigeración, pH= 3 con 0 ppm de inhibidor a base de Áloe Vera.
- c) En refrigeración, pH= 3 con 100 ppm de inhibidor a base de Áloe Vera.

En la Figura 3.4 a) hasta la 3.6 b), se tienen vistas microscópicas de las probetas de trabajo previamente mencionadas sin reactivo de ataque.

En la Figura 3.4 a) se puede observar una línea gruesa de color oscuro en el borde de la probeta, la cual es el espesor de la capa de óxido formada después del tiempo de exposición. También se puede notar una gran densidad de picaduras en el borde de la misma, la cual se puede apreciar mejor en la Figura 3.4 b), donde se puede ver que estas son de gran tamaño y profundidad. Sin embargo, a pesar de esto, no se pueden observar a simple vista, únicamente mediante el uso de un microscopio.

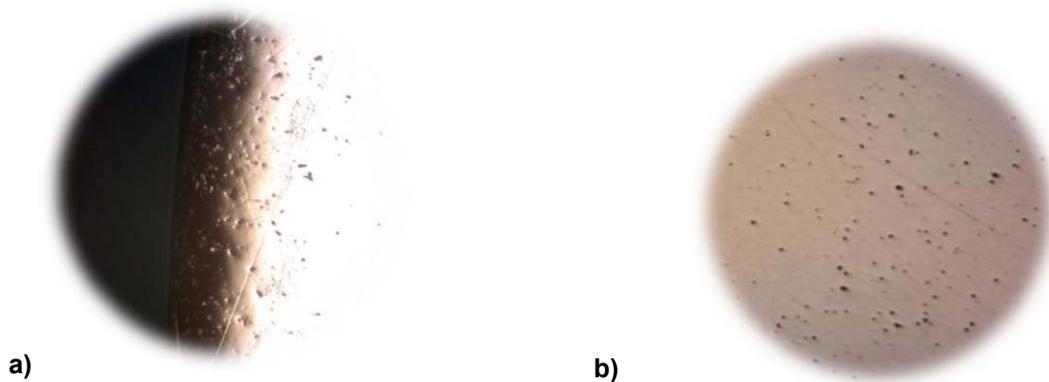
Posteriormente en la Figura 3.5 a) se observa una línea menos gruesa, en el borde de la probeta, que en la Figura 3.4 a), así como también una densidad de picaduras menor, de menor tamaño y aparentemente poca profundidad, como sucede para la Figura 3.6 a) y b), donde con dificultad se percibe una línea oscura en el borde de la probeta y la densidad de picaduras presentes en el borde de la probeta es mínima en comparación con las otras 2 probetas analizadas, así como un tamaño de picadura bastante pequeño.



a)

b)

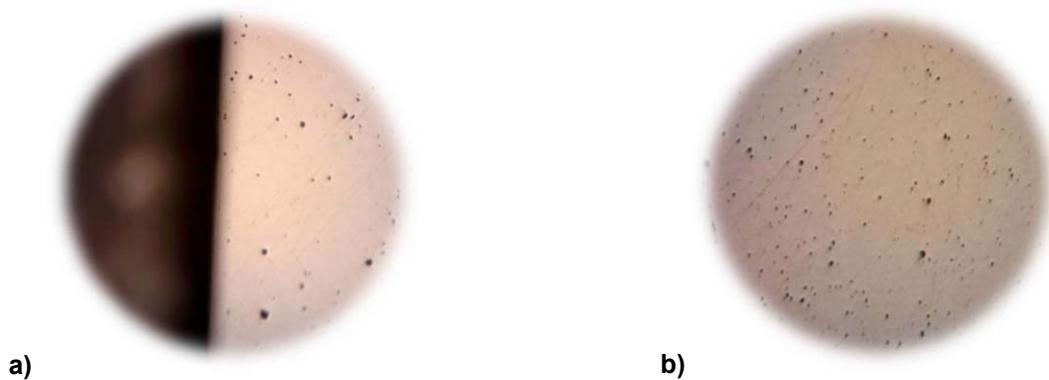
Figura 3.4 Vista microscópica con 500 X del borde **a)** y del centro **b)** de un Acero SAE 1018 expuesto durante 48 hrs en un medio de tipo NACE TM 0177 a Temperatura Ambiente, 0 ppm de inhibidor.



a)

b)

Figura 3.5 Vista microscópica con 500 X del borde **a)** y del centro **b)** de un Acero SAE 1018 expuesto durante 48 hrs en un medio de tipo NACE TM 0177 a Temperatura de Refrigeración ($\pm 3^{\circ}\text{C}$), 0 ppm de inhibidor.



a)

b)

Figura 3.6 Vista microscópica con 500 X del borde **a)** y del centro **b)** de un Acero SAE 1018 expuesto durante 48 hrs en un medio de tipo NACE TM 0177 a Temperatura de Refrigeración ($\pm 3^{\circ}\text{C}$), 100 ppm de inhibidor.

3.2 EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ALOE VERA COMO INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN

3.2.1 Efecto del inhibidor a 0 rpm

Como ya se ha mencionado previamente, lo primero que se realiza para el estudio de la corrosión del material de trabajo en la disolución de tipo NACE, es el registro del potencial a circuito abierto durante media hora (ver anexo A1).

Los datos presentados en la Tabla 3.2 fueron obtenidos directamente de las gráficas de Rp (las cuales no se presentan en este trabajo), posteriormente se consideró $B = 0.026 \text{ V}$ para la ecuación de Stern y Geary (ec. 8) para calcular la i_{corr} y a partir de esta, con la fórmula empleada para V_{corr} , (ec. 9) hacer un análisis dimensional empleando las propiedades del Fe, hasta llegar a unidades de milímetros por año (mm/año) (ec. 9), y finalmente, determinar la eficiencia del inhibidor (ec. 1).

Tabla 3.2. Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición obtenidos para acero al carbono SAE 1018 en un medio tipo NACE TM 0177 a 0 rpm a partir de los datos de Rp.

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	Rp ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	i_{corr} (mA/cm ²)	V_{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
0	0	79.41	3.27E-04	3.84	-----
	20	116.59	2.23E-04	2.61	31.88
	50	479.98	5.41E-05	0.63	83.46
	100	555.17	4.68E-05	0.54	84.59

Al comparar los resultados de Rp obtenidos de las pruebas con y sin inhibidor, se observa que los valores de Rp se van incrementando conforme se aumentó la concentración del inhibidor, lo que indica que el sistema se vuelve poco polarizable. ^[48] Lo anterior se debe a que la señal continua de sobrepotencial emitida drena muy poca corriente, es decir, conforme se aumenta la concentración de inhibidor el sistema es cada vez más resistente a la corrosión.

La eficiencia de inhibición se vuelve cada vez más grande en presencia del inhibidor *Áloe Vera*, lo que sugiere que se forma una capa sobre el sustrato metálico. ^[49]

Se puede observar que no existe alguna condición que logre cumplir con una eficiencia de más del 90% (como se pide en la norma NRF-005-PEMEX ^[33] para poder ser considerado como inhibidor). Sin embargo, con 100 ppm de *Áloe Vera* en modo estático, se puede obtener una eficiencia del 84.59%, lo cual se considera aceptable.

Por otro lado, mediante la Espectroscopia de impedancia Electroquímica, en el diagrama de Nyquist de la Figura 3.7 se puede ver que para las diferentes concentraciones de inhibidor trabajadas se tienen semicírculos bien definidos que se relacionan con la resistencia a la transferencia de carga (diámetro de semicírculo) con respecto a la curva testigo (0 ppm), que comparados con un circuito eléctrico de una resistencia y un capacitor en paralelo, concuerdan con un comportamiento resistivo-capacitivo.

En especial para una concentración de 100 ppm, se puede apreciar un aumento bastante significativo ($550 \Omega \cdot \text{cm}^2$) en comparación a las demás concentraciones.

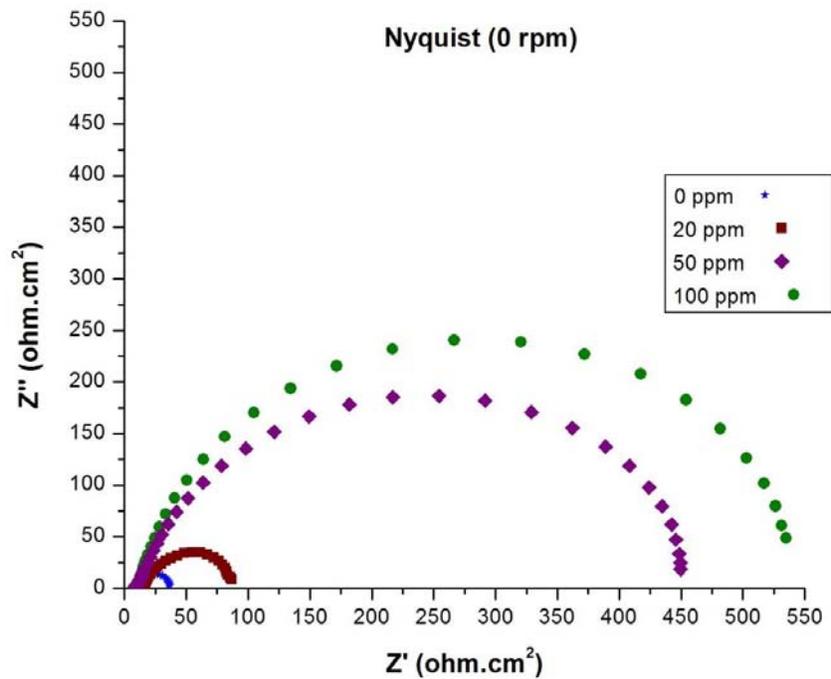


Figura 3.7 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 inmerso en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso) a diferentes concentraciones del Aloe Vera en modo estático.

Mediante la simulación con el circuito eléctrico equivalente de Randles (Figura 8) se calcularon los parámetros electroquímicos presentados en la Tabla 3.3 Los cuales involucran: Resistencia a la solución (R_{sol}), Resistencia a la Transferencia de carga (R_{tc}) y Capacitancia (C), posteriormente se aplicó $B= 0.026$ V para la ecuación de Stern y Geary (ec. 8) y finalmente se obtuvo la Densidad de corriente (i_{corr}) y la Velocidad de Corrosión (V_{corr})

Tabla 3.3 Parámetros Electroquímicos en modo estático a partir de EIS_[z]

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	E (mV)	R_{sol} (Ω .cm ²)	$R_{tc[z]}$ (Ω .cm ²)	C (F)	$i_{corr[z]}$ (mA/cm ²)	Vel_{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
0	0	-532.95	9.05	31.38	3.47E-03	8.28E-04	9.71	---
	20	-583.11	15.09	90.07	1.86E-03	2.88E-04	3.38	65.16
	50	-532.95	10.87	465.67	8.95E-04	5.58E-05	0.65	93.46
	100	-528.92	13.55	547.16	9.36E-04	4.75E-05	0.55	94.26

Los valores de R_{tc} al ser comparados con los de R_p resultan ser mayores. Si bien R_p suma todas las contribuciones resistivas debería de tener valores más altos a los de R_{tc} , ya que se supone está excluyendo, en principio, la resistencia de la solución.

De la tabla 3.3 también se puede observar que la capacitancia disminuye conforme se aumenta la concentración del inhibidor, lo cual es un comportamiento favorable, ya que indica que la película adsorbida no permite tan fácilmente el paso de las especies agresivas (incluyendo el agua) hacia la superficie metálica, es decir, se tiene una mayor eficiencia protectora por parte del inhibidor de corrosión. [50]

Para la capacitancia se esperarían valores del orden de $1E-05$ (F), en este caso, conforme se va aumentando la concentración de inhibidor estos comienzan a asemejarse a lo esperado, lo que habla de una mejora en la doble capa electroquímica, teniendo así, corrosión uniforme sobre el material así como también una velocidad de corrosión menor.

En el diagrama de Bode de la Figura 3.8 (Módulo de la Impedancia vs Frecuencia), se observa que conforme se incrementa la concentración del inhibidor, este valor para las concentraciones de 50 y 100 ppm incrementa en comparación con el blanco (por un orden de magnitud).

Por otro lado, en el gráfico del Ángulo de Fase vs Frecuencia se observa para todas las concentraciones una constante de tiempo (pico máximo) en el mismo intervalo de frecuencias (a frecuencias intermedias), ya que la reacción de corrosión está controlada por la transferencia de carga. [51]

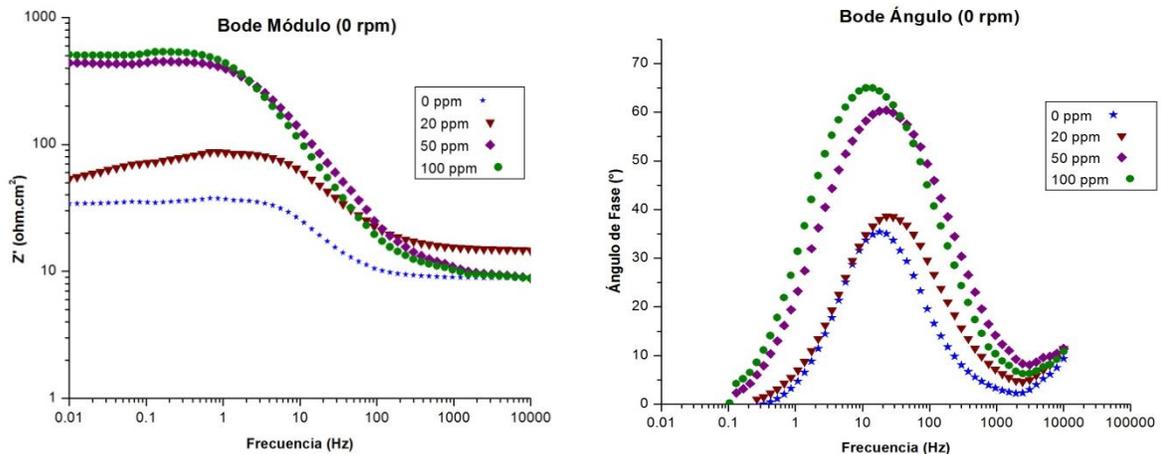


Figura 3.8 Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso) a diferentes concentraciones del Aloe Vera en modo estático.

Para las curvas de polarización (Figura 3.9), se puede ver que las pendientes en la parte catódica presentan ciertos cambios entre sí, lo cual puede deberse al cambio de concentración de los iones H⁺ en la superficie del metal conforme aumenta el tiempo de contacto de los mismos [52]. Sin embargo, para las curvas catódicas con 50 y 100 ppm de inhibidor, a potenciales mayores a -800 mV, se puede apreciar que se sobrepone entre ellas teniendo la misma corriente y en consecuencia el mismo proceso catódico.

Hacia la parte anódica de las curvas se observa que a partir de potenciales menores a -400 mV, aparece la activación de la reacción de oxidación, de tal forma que hacia los 200 mV de potencial, las corrientes anódicas (para 50 y 100 ppm de inhibidor) son mayores que las de 20 ppm e iguales que las del blanco. Lo cual habla de una oxidación del medio.

Lo anterior también demuestra que este inhibidor de la corrosión es del tipo mixto, ya que actúa en sitios anódicos y catódicos. [53]

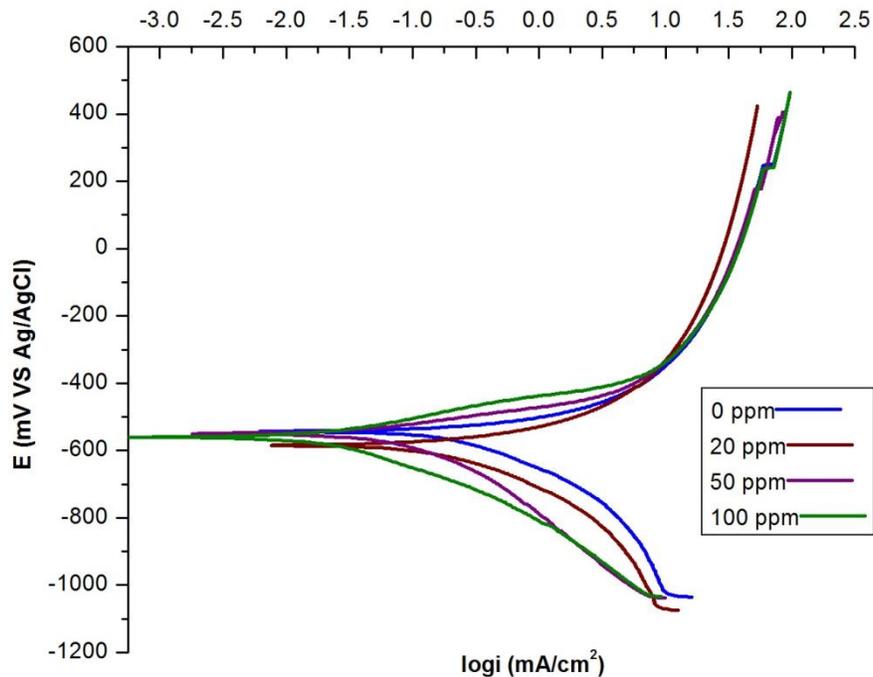


Figura 3.9. Curvas de Polarización obtenidas para el sistema acero al carbono SAE 1018 en solución tipo NACE TM 0177 (NaCl 50% en peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera en modo estático.

Con el fin de realizar la comparación cuantitativa, se determinaron los parámetros que generalmente se usan para la evaluación de la velocidad de corrosión. Los cuales son: el potencial de corrosión, la densidad de corriente de corrosión, la cual es directamente proporcional a la velocidad de corrosión del sistema.

Dichos parámetros han sido obtenidos a partir de las curvas presentadas en la Figura 3.9 aplicando el método de la intersección o técnica de extrapolación de Tafel, donde primeramente se obtuvo la i_{corr} de manera gráfica utilizando el criterio de los 120 mV sobre las curvas de polarización de los sistemas evaluados y posteriormente calcular la velocidad de corrosión como ya se mencionó previamente (ec.9).

Tabla 3.4 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición a partir de las curvas de polarización obtenidos para modo estático.

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	E (mV)	i_{corr} (A/cm ²)	V_{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
0	0	-542.77	1.0343	12.13	-----
	20	-585.46	0.7328	8.59	29.14
	50	-550.72	0.6099	7.15	41.03
	100	-560.36	0.4105	4.81	60.31

Es bastante evidente que la velocidad de corrosión en los sistemas de estudio disminuye al aumentar la concentración de Aloe Vera, lo cual se ve reflejado en la eficiencia obtenida.

La participación del inhibidor en las reacciones electroquímicas parciales, tanto la reacción anódica que es donde se disuelve el metal, o la reacción catódica que es donde se libera hidrógeno, no son favorecidas al adicionar el inhibidor de corrosión, sino que por el contrario, al aumentar la concentración de Aloe Vera hay una mayor estabilidad de la película adsorbida que se puede ver reflejada en el aumento de potencial y la disminución de corriente.

3.2.2 Efecto del inhibidor a 100 rpm

Después de observar la efectividad del inhibidor en condiciones estáticas se decidió evaluar las condiciones hidrodinámicas a diferentes velocidades de rotación. Como es el caso de 100 rpm que a continuación se describen.

En la Tabla 3.5 se puede observar que ninguna de las eficiencias de inhibición obtenidas mediante la técnica de Rp logra obtener una eficiencia igual o superior al 90%.

Tabla 3.5 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición obtenidos para acero al carbono SAE 1018 en un medio tipo NACE TM 0177 a 100 rpm a partir de los datos de Rp.

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	Rp ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	i_{corr} (mA/cm^2)	Vel. _{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
100	0	51.88	5.01E-04	5.87	-----
	20	60.26	4.31E-04	5.01	13.90
	50	101.34	2.56E-04	2.98	48.81
	100	170.29	1.52E-04	1.77	69.54

En las gráficas de Nyquist (Figura 3.10) con 50 y 100 ppm de inhibidor se puede apreciar cierto comportamiento que forma una especie de bucle, mejor conocido como “loop” inductivo (semicírculo a bajas frecuencias), el cual se atribuye a los procesos de relajación obtenidos por la adsorción del inhibidor o de alguna especie en la superficie del electrodo. [54]

Es decir, el comportamiento inductivo a bajas frecuencias se debe probablemente a las especies adsorbidas, las cuales no permiten que la corriente varíe bruscamente. Este fenómeno es característico del efecto de adsorción de una película en la superficie del metal.

A pesar de que para estas concentraciones ya se empieza a tener otra variable, que es la agitación de la solución (100 rpm), se aprecia la tendencia que presentaban las curvas a 0 rpm, de ir creciendo conforme se tiene una adición cada vez mayor de inhibidor en la solución con la que se trabaja, lo que termina de

constatar el hecho de que el inhibidor es bastante resistivo para lograr disminuir la corrosión gracias a que la película formada en la superficie del metal se adsorbe lo suficientemente bien para a su vez disminuir la resistividad del mismo.

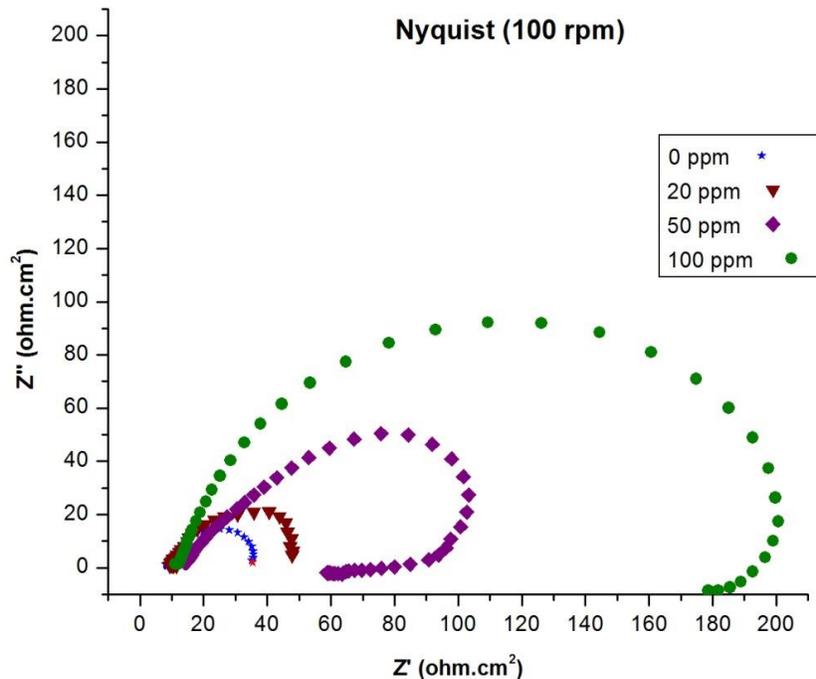


Figura 3.10 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso) a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 100 rpm.

Teniendo así, en la Tabla 3.6 una máxima eficiencia de inhibición a 100 ppm de 83.25 %, la cual no cumple con lo establecido por la norma NRF-005 [39] para poder ser considerado como inhibidor de corrosión pero denota que aún con esta condición hidrodinámica empleada el inhibidor sigue actuando sobre la superficie del metal utilizando altas concentraciones.

Tabla 3.6 Parámetros Electroquímicos a 100 rpm a partir de EIS_[z]

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	E (mV)	Rsol (Ω.cm ²)	Rtc _[z] (Ω.cm ²)	C (F)	i _{corr[z]} (mA/cm ²)	Vel _{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
100	0	-505.91	8.53	35.34	2.65E-03	7.35E-04	8.63	---
	20	-506.24	10.65	45.20	1.39E-03	5.75E-04	6.74	21.81
	50	-510.83	6.74	93.65	4.13E-03	2.77E-04	3.25	62.26
	100	-558.87	12.74	211.05	1.34E-03	1.23E-04	1.44	83.25

En la Figura 3.11 se presentan los diagramas de módulo, donde se observa que a una concentración de 100 ppm el cambio de pendiente es más pronunciado que a las demás concentraciones. La diferencia en la impedancia a 100 ppm con las demás concentraciones es de un orden de magnitud.

En los diagramas de ángulo de fase, se observa que las concentraciones de 0, 20 y 50 ppm de inhibidor muestran un ángulo aproximado de 40° y en el mismo intervalo de frecuencias (intermedias). Sin embargo, a una concentración de 100 ppm de inhibidor en ángulo de fase es mayor (70°), lo que puede asociarse a un comportamiento menos difusivo en comparación con las demás concentraciones^[49].

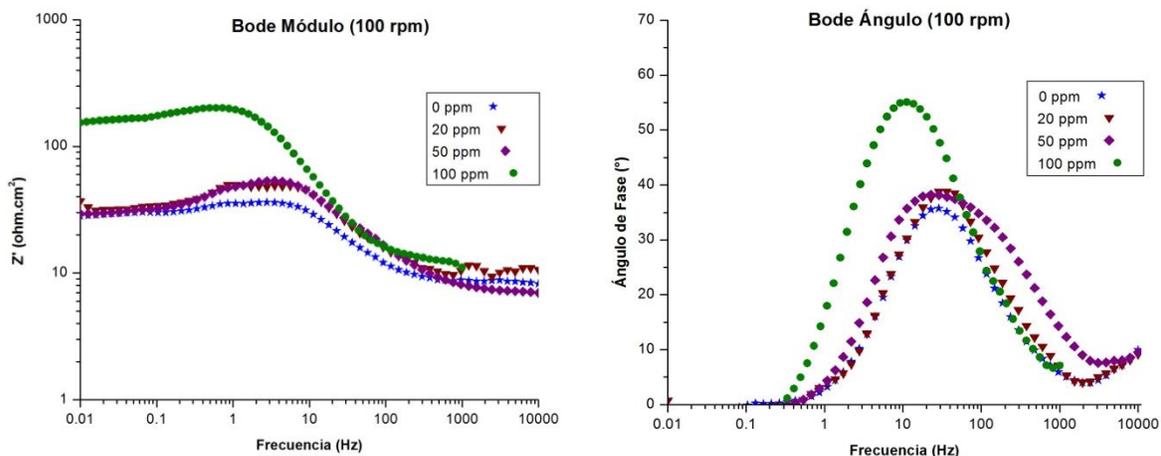


Figura 3.11 Diagramas Bode Módulo para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH_3COOH glacial 5 % en peso) a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 100 rpm.

En las curvas de Polarización (Figura 3.12) se puede ver que los potenciales anódicos para 0, 20 y 50 ppm muestran densidades de corriente similares, incluso se podría decir que para las corrientes de oxidación se puede observar un aumento de estas, lo cual se podría relacionar con la solubilidad de los productos de corrosión aunado a la velocidad empleada (100 rpm), o incluso con la entrada de oxígeno al sistema, la cual no estaba siendo controlada durante la experimentación.

Por otro lado, en los potenciales catódicos se muestran densidades ligeramente diferentes, pero lo suficiente para poder distinguir cada rama a simple vista. Incluso los potenciales de corrosión para 0, 20 y 50 ppm de inhibidor varían muy poco entre sí con respecto al potencial de corrosión a 100 ppm.

Todas las concentraciones presentan una disminución de las corrientes de reducción con respecto al blanco. Sin embargo, a una concentración de 100 ppm se puede ver que es la curva que mayor disminución presenta respecto al blanco.

La diferencia en la corriente obtenida en la curva con 100 ppm podría indicar que a esta concentración de inhibidor la solución es menos agresiva al acero que las demás concentraciones trabajadas.

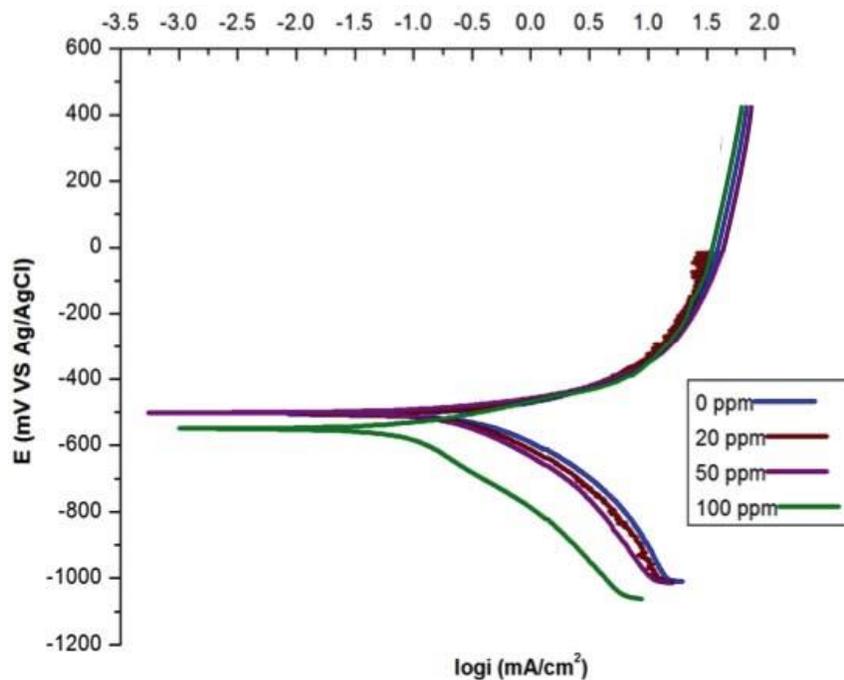


Figura 3.12 Curvas de Polarización para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para blanco, 20, 50 y 100 ppm de Aloe Vera a 100 rpm.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Pese a lo explicado anteriormente basado en lo que se observa en las curvas, las eficiencias reportadas en la Tabla 3.7 demuestran que para 100 ppm la eficiencia es bastante baja (36.92 %).

Sin embargo sí se puede resaltar que la eficiencia a 100 ppm con respecto a la de 50 ppm es casi del doble.

Tabla 3.7 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de a partir de las curvas de polarización a 100 rpm.

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	E (mV)	i_{corr} (A/cm ²)	V_{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
100	0	-507.26	1.3630	15.99	-----
	20	-507.03	1.1317	13.27	16.96
	50	-501.43	1.0828	12.70	20.55
	100	-549.73	0.8597	10.08	36.92

3.2.3 Efecto del inhibidor a 500 rpm

En la tabla 3.8 se puede observar que a una velocidad de 500 rpm ninguna de las concentraciones empleadas logra cumplir con una eficiencia de 90 % como se indica en la norma NRF-005-PEMEX [39].

Tabla 3.8 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición obtenidos para acero al carbono SAE 1018 en un medio tipo NACE TM 0177 a 500 rpm a partir de los datos de Rp.

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	Rp (Ohm·cm ²)	i _{corr} (mA/cm ²)	V _{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
500	0	35.67	7.28E-04	8.55	-----
	20	38.76	6.70E-04	7.86	7.97
	50	40.17	6.47E-04	7.56	11.20
	100	117.45	2.21E-04	2.59	69.62

Comparando la Figura 3.13 con la Figura 3.10, se puede observar el mismo comportamiento, es decir, que a mayor concentración incrementa el diámetro del semicírculo, pero este parámetro es menor que a la velocidad de 100 rpm, lo cual se atribuye que esta dinámica de flujo las moléculas del Aloe Vera adsorbidas son arrancadas (desorbidas) con esta velocidad.

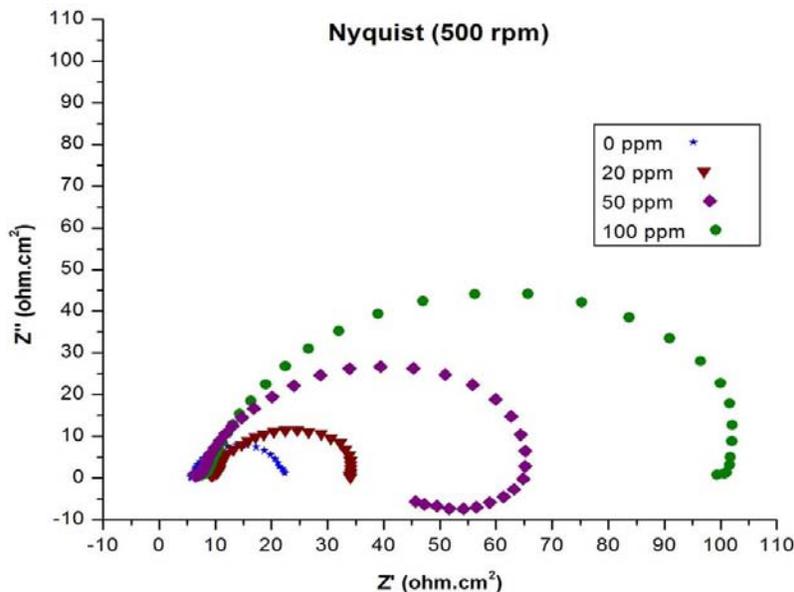


Figura 3.13 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 500 rpm.

En el caso particular de 50 ppm y un poco al final de la curva con 100 ppm de inhibidor, se presenta ese “loop” inductivo, el cual indica que se está teniendo un sistema controlado por transferencia de carga y adsorción de especies a esas concentraciones de inhibidor.

Como se ha estado viendo a las diferentes velocidades presentadas previamente, para concentraciones de 100 ppm de inhibidor es donde se obtienen las mejores eficiencias, en este caso (Tabla 3.9) la mejor eficiencia es de 83.18%, se sabe que no es lo que indica la norma. Sin embargo, para la velocidad a la que ya se está trabajando, habla de una buena adsorción por parte del inhibidor en la superficie del metal, lo cual se ve reflejado en la velocidad de corrosión, así como una disminución en el valor de capacitancia.

Tabla 3.9 Valores de Velocidad de corrosión y eficiencia a 500 rpm a partir de EIS_[z]

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	E (mV)	Rsol (Ω.cm ²)	Rtc _[z] (Ω.cm ²)	C (F)	i _{corr} [z] (mA/cm ²)	Vel _{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
500	0	-503.14	5.88	18.09	6.99E-03	1.43E-03	16.86	-----
	20	-497.35	9.78	28.87	2.05E-03	9.00E-04	10.56	37.33
	50	-487.14	7.11	68.40	1.92E-03	3.80E-04	4.45	73.55
	100	-507.69	8.62	105.01	1.32E-03	2.47E-04	2.90	82.77

Para los diagramas de Bode (Figura 3.14 a) se puede observar que la mayor pendiente de la curva corresponde a una concentración de 100 ppm de inhibidor.

El diagrama de fase (Figura 3.14 b) pone énfasis sobre las constantes de tiempo, lo que ayuda a ver mejor los fenómenos asociados al cambio de pendiente que se pudieron haber notado. A 100 ppm de inhibidor se presenta un ángulo de fase mayor que a las demás concentraciones (55°) con un ligero desplazamiento hacia frecuencias más altas y cierto ensanchamiento en la curva con respecto a las demás concentraciones, es decir, el incremento de la constante de tiempo a esta concentración con respecto al blanco, lo que significa que se forma una película protectora sobre el sustrato metálico lo cual se relaciona con una mejor eficiencia de inhibición a esa concentración.

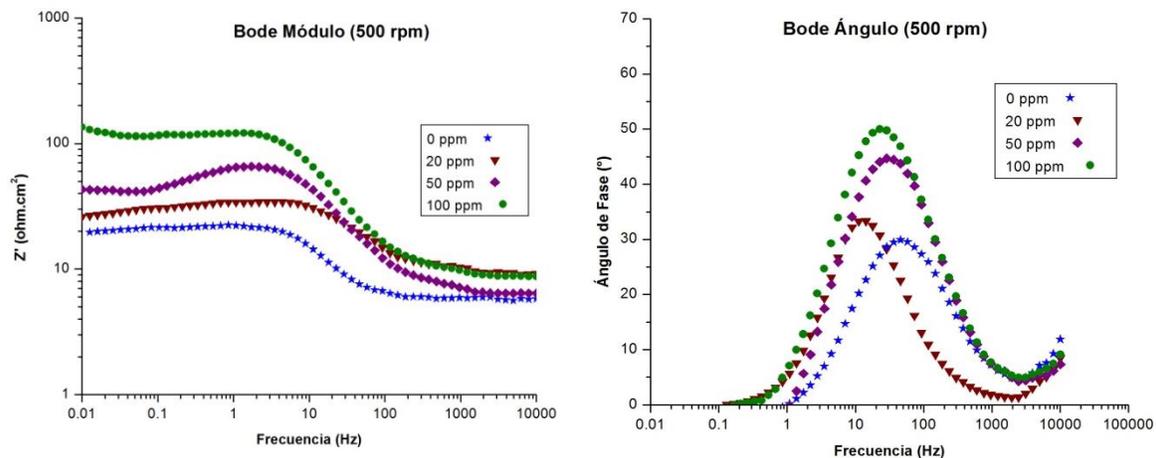


Figura 3.14 Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50% en peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 500 rpm.

En la Figura 3.15 se observa como las ramas de las curvas con inhibidor están más abiertas que la curva sin inhibidor, lo que puede indicar que se trata de un inhibidor de tipo mixto.

El inhibidor está trabajando sobre el área del electrodo de trabajo ocasionando el desplazamiento del E_{corr} y la modificación en la forma de las ramas anódica y catódica. A una concentración de 100 ppm, la rama catódica presenta un cambio en el comportamiento indicando que una posible competencia de reacciones.

Como se sabe, el aumento de la velocidad relativa de la solución hace que un fluido pueda adquirir características de mayor agresividad. Se ha observado que un aumento en la agitación, ocasiona un incremento en la densidad de corriente límite, teniendo así un aumento en la velocidad de corrosión. [56]

En la tabla 3.10 se resumen los parámetros electroquímicos obtenidos mediante esta técnica, observando que a 100 ppm tiene una eficiencia de inhibición máxima del 35 %.

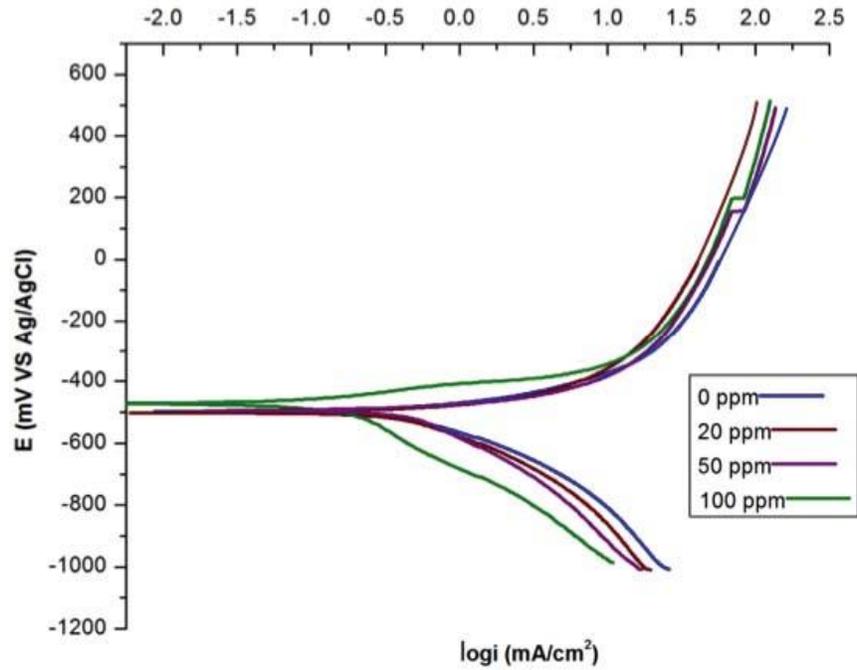


Figura 3.15 Curvas de Polarización para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 500 rpm.

Tabla 3.10 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición para 500 rpm a partir de las curvas de polarización.

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	E (mV)	i_{corr} (A/cm ²)	Vel. _{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
500	0	-499.73	1.8799	22.05	-----
	20	-474.12	1.7956	21.06	4.48
	50	-494.54	1.6378	19.21	12.87
	100	-502.19	1.2134	14.23	35.45

3.2.4 Efecto del inhibidor a 1000 rpm

A esta condición de velocidad, para la técnica de Rp (Tabla 3.11), las eficiencias ya son bastante malas en comparación con las anteriores, tal es así que la mejor eficiencia presentada es de 46.43 %.

Tabla 3.11. Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición obtenidos para acero al carbono SAE 1018 en un medio tipo NACE TM 0177 a 1000 rpm a partir de los datos de Rp.

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	Rp (Ohm·cm ²)	i _{corr} (mA/cm ²)	Vel. _{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
1 000	0	24.63	1.05E-03	12.38	-----
	20	37.97	6.84E-04	8.03	35.13
	50	40.08	6.48E-04	7.61	38.54
	100	45.98	5.65E-04	6.63	46.43

En los diagramas de Nyquist (Figura 3.16), al igual que en las demás velocidades analizadas previamente, se observa un semicírculo a las concentraciones 0 - 50 ppm lo que indica que el comportamiento es capacitivo. Se aprecia la transferencia de carga, lo que implica una resistencia a nivel de doble capa. ^[57]

Sin embargo, para una concentración de 100 ppm de inhibidor no se obtiene completamente un semicírculo bien definido, al principio de este, al hacer un zoom en Z' de 10-15 (Ohm.cm²) se puede ver una especie de semicírculo no bien formado e inmediatamente la formación de otro lo suficientemente bien definido, por lo que hay dos constantes de tiempo, uno relacionado a la resistencia a la transferencia de carga y el otro la resistencia de las moléculas orgánicas. ^[58] Es decir, la resistencia de las moléculas por parte del inhibidor de corrosión.

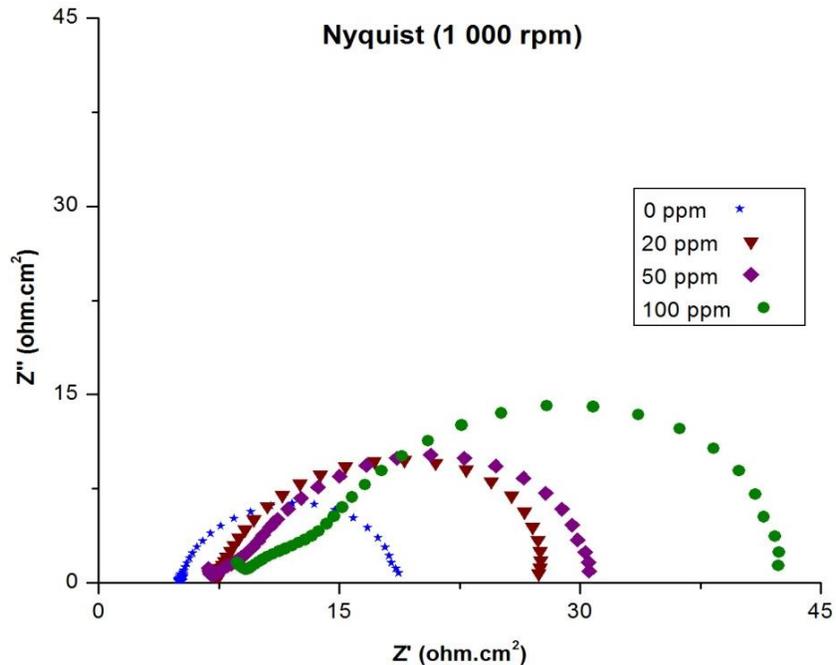


Figura 3.16 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 1000 rpm.

A diferencia de las eficiencias obtenidas con la técnica de Rp, aquí (Tabla 3.12) a 100 ppm aún se puede apreciar un 56.89 % por parte del inhibidor. Sin embargo, las velocidades de corrosión presentadas ya son bastante elevadas como las obtenidas a otras condiciones hidrodinámicas.

A esta velocidad es posible ver que los valores obtenidos para $R_{tc[z]}$ y los calculados para Rp ya no difieren tanto entre sí como en modo estático, aún es visible que los valores presentados para $R_{tc[z]}$ son mayores que los de Rp, por muy poco, pero aún se puede ver la diferencia.

Tabla 3.12 Valores de Velocidad de corrosión y eficiencia a 1 000rpm a partir de EIS_[z]

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	E (mV)	Rsol (Ω.cm ²)	Rtc _[z] (Ω.cm ²)	C (F)	i _{corr[z]} (mA/cm ²)	Vel _{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
1 000	0	-497.68	5.06	15.17	7.48E-03	1.71E-03	20.10	----
	20	-491.08	7.31	21.50	2.47E-03	1.20E-03	14.18	29.44
	50	-492.2	7.40	23.04	2.28E-03	1.12E-03	13.23	34.15
	100	-497.79	12.43	35.19	4.68E-03	7.38E-04	8.66	56.89

En el diagrama de Bode (Figura 3.17 a) se presenta una gran similitud y proximidad entre las curvas con 20 y 50 ppm de inhibidor, además de observar un aumento en comparación la que no tienen inhibidor.

Por otro lado, en la figura 3.17b, las curvas tienen un ángulo de fase en frecuencias intermedias a bajas en concentraciones de 0 y 20 ppm de inhibidor; para concentraciones de 50 y 100 ppm no existen grandes diferencias en los diagramas entre sí y pareciera que se desplazan ligeramente hacia frecuencias de intermedias a altas. El valor del ángulo de fase para todas las concentraciones es muy similar entre sí (30 – 35°), lo que indica que la superficie del metal a 1000 rpm es menos homogénea que a velocidades inferiores, teniendo así, que la resistencia a la corrosión es menor. O bien, que en principio, no existe una película inhibidora que cubra la superficie en su totalidad y que conforme se aumenta la concentración de inhibidor en la solución esta se incrementa un poco.

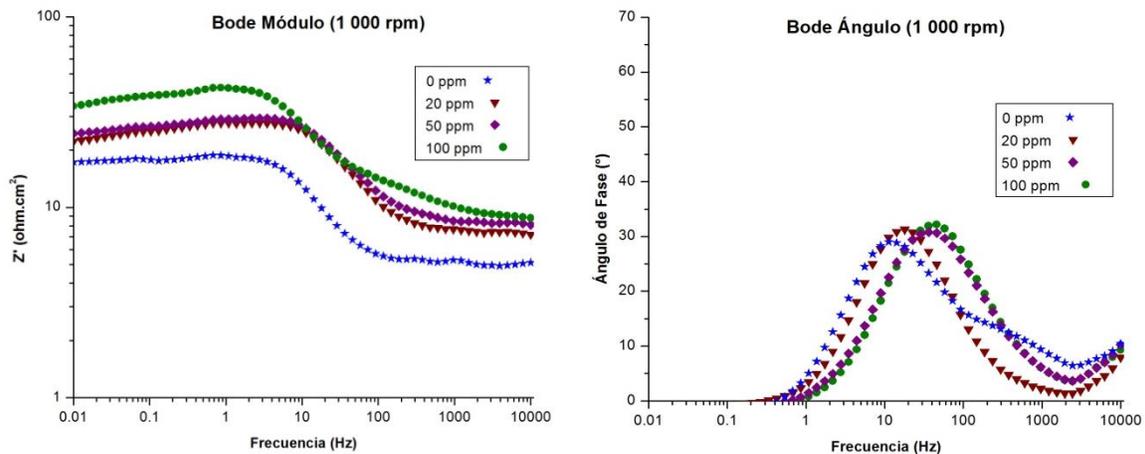


Figura 3.17 Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH_3COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 1000 rpm.

Las curvas de polarización (Figura 3.18) a las concentraciones de inhibidor establecidas presentan un comportamiento muy similar entre sí, tanto para la parte anódica como para la catódica, siendo 100 ppm quien presenta menores valores de corriente en ambas partes de la curva.

Esta disminución en la pendiente de reducción para todas las concentraciones en relación con la curva testigo (0 ppm de inhibidor) significa que existe un efecto global de inhibición a la corrosión del sistema.

Se puede ver que a todas las concentraciones trabajadas, las gráficas cortan en el mismo punto para el E_{corr} , con la única diferencia de que se van desplazando a la izquierda con respecto a la curva testigo (0 ppm), lo que puede reafirmar que se tiene un inhibidor de tipo mixto.

En las curvas de polarización (Figura 3.18) se puede observar cómo es que a las 4 diferentes concentraciones trabajadas se tiene casi el mismo E_{corr} (-490 ± 5 mV vs Ag/AgCl) y las diferencias entre los valores de las ramas catódicas y anódicas es pequeña entre sí. La adición del inhibidor reduce la disolución anódica del metal y también retarda la evolución de la reacción de hidrógeno. Este efecto va de la mano con la adsorción del inhibidor en los centros de activación de la superficie del acero. [59]

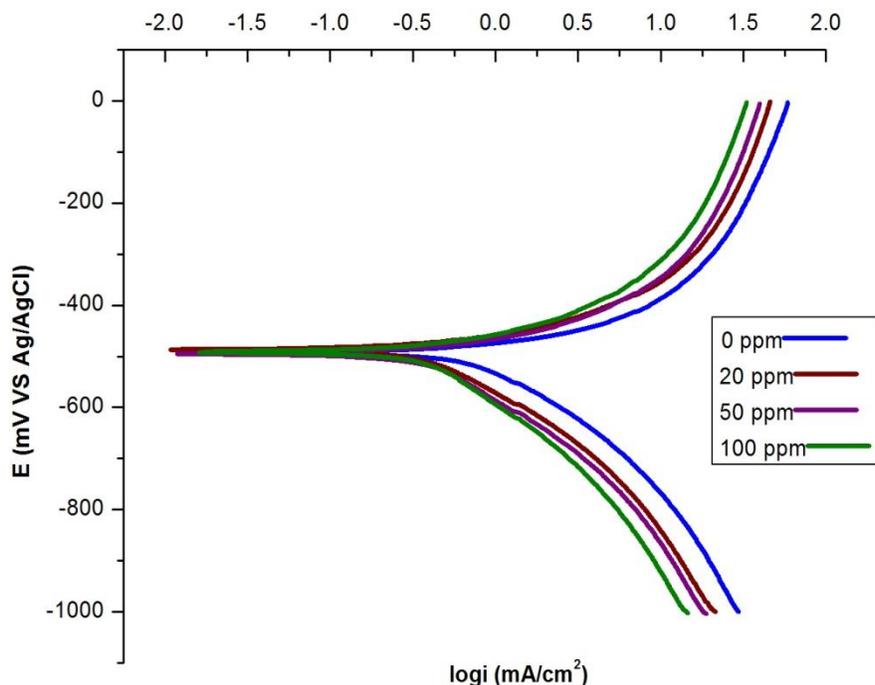


Figura 3.18 Curvas de Polarización para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH_3COOH glacial 5 % en peso) a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 1000 rpm.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las curvas con 20, 50 y 100 ppm de inhibidor se encuentran de forma continua, es decir, conforme va aumentando la concentración, la corriente de cada curva, tanto en sentido anódico como catódico va disminuyendo.

Al presentar un comportamiento similar entre sí, y con base en la Tabla 3.13 se puede ver que sus velocidades de corrosión también lo presentan.

Tabla 3.13 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición para 1000 rpm a partir de las curvas de polarización.

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	E_{corr} (mV)	i_{corr} (A/cm ²)	Vel. _{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
1 000	0	-493.38	1.6378	19.21	-----
	20	-495.38	1.3004	15.25	20.59
	50	-491.93	1.2134	14.23	25.91
	100	-487.26	1.1862	13.91	27.57

3.2.5 Efecto del inhibidor a 3000 rpm

Con la finalidad de observar el comportamiento del aloe vera en el acero SAE 1018 también se muestran los resultados para una velocidad de rotación de 3000 rpm, aunque se observó que desde 500 rpm las eficiencias son muy bajas.

De acuerdo a la Tabla 3.14, a una concentración de 20 ppm a 3000 rpm se tiene una eficiencia de 4.29 %, la cual es la más baja presentada para todas las condiciones hidrodinámicas trabajadas. Esta baja eficiencia se puede deber a que la fuerza de adsorción por parte del inhibidor sobre la superficie del metal ya no es lo suficientemente buena como para resistir dicha velocidad, además de que la concentración de la que se habla es la menor de las empleadas.

Tabla 3.14 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición obtenidos para acero al carbono SAE 1018 en un medio tipo NACE TM 0177 a 3000 rpm a partir de los datos de Rp.

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	Rp (Ohm·cm ²)	i _{corr} (mA/cm ²)	V _{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
3 000	0	18.04	1.44E-03	16.90	----
	20	18.85	1.38E-03	16.18	4.29
	50	23.07	1.12E-03	13.22	21.83
	100	25.81	1.01E-03	11.81	30.11

A pesar de tener una velocidad de 3000 rpm (la más alta empleada durante la experimentación), en los diagramas de Nyquist (Figura 3.19) se puede apreciar el crecimiento del semicírculo conforme se va aumentando la concentración del inhibidor sobre la solución empleada.

Las curvas de Nyquist presentadas para concentraciones de 50 y 100 ppm presentan el denominado “loop” (bucle) inductivo, lo que puede estar hablando de adsorción de especies corrosivas (y no necesariamente se esté adsorbiendo el inhibidor, sino que la especie adsorbida pueden ser los iones cloruro presentes en el seno de la solución).

Lo anterior se puede deber a la formación de una capa de productos de corrosión en la superficie del metal, la cual es removida debido a la turbulencia tan brusca del flujo sobre el mismo, pero posteriormente vuelve a formarse sobre el metal, generando así cada vez más y más productos de corrosión en el sistema, el cual se vuelve cada vez más activo por la formación y remoción de los productos de corrosión que va generando la turbulencia del fluido, es decir, la corrosión se ve afectada por la velocidad del fluido, ya que estos productos que podrían acumularse y minimizar de alguna forma la corrosión sobre la superficie metálica son separados de ésta.

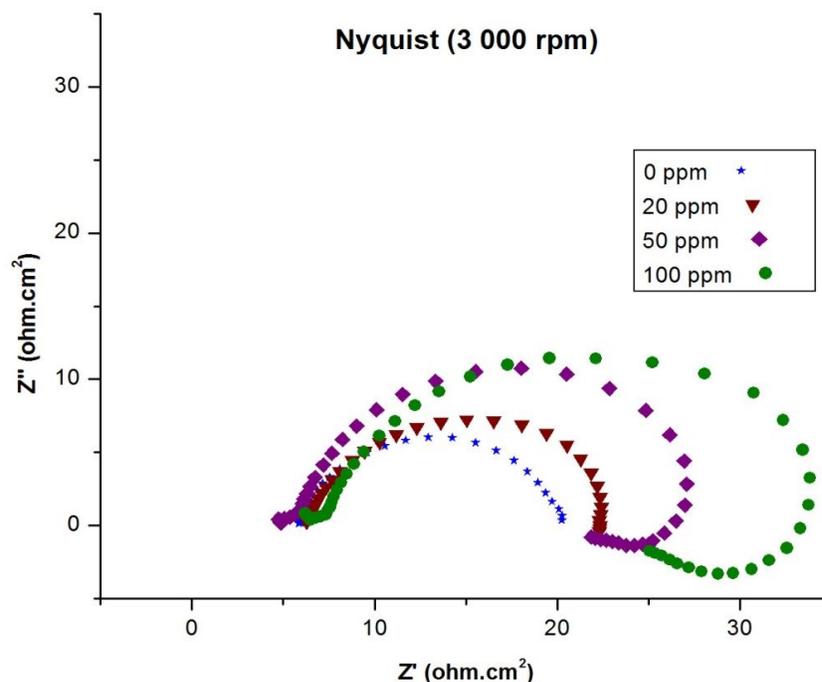


Figura 3.19 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 3000 rpm.

Se debe de enfatizar que en esta última parte de la experimentación el sistema se vuelve bastante agresivo bajo dos consideraciones de trabajo, las cuales son: la velocidad de trabajo (3000 rpm) y el medio, ya que es bastante conductor con la presencia de cloruros.

Las condiciones hidrodinámicas ven comprometida la persistencia de la película inhibidora sobre la superficie del metal debido a este tipo de flujo. Es decir, si la película inhibidora es parcialmente retirada, el electrodo presentará una celda de concentración presentando así, corrosión localizada. ^[60]

De igual forma, si una capa de óxido es parcialmente removida de la superficie del electrodo de trabajo se generará una celda de aireación diferencial, acelerando el deterioro del material.

Con la tabla 3.15 se puede apreciar que el inhibidor sigue actuando, a bajas eficiencias en comparación con las presentadas en modo estático.

Sin embargo, a pesar de todos los problemas presentados anteriormente debido a las condiciones hidrodinámicas, el inhibidor sigue actuando sobre la superficie del metal, presentando incluso la misma tendencia, de ir creciendo el semicírculo conforme se incrementa la concentración del inhibidor en la solución.

Se puede ver que en general, un incremento en la velocidad del movimiento relativo entre una solución corrosiva y la superficie metálica tiende a aumentar la velocidad de corrosión, puesto que se incrementa el transporte de los agentes corrosivos, incluyendo el oxígeno, hacia la superficie del metal.

Tabla 3.15 Valores de Velocidad de corrosión y eficiencia a 3 000rpm a partir de EIS_[z]

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	E (mV)	R _{sol} (Ω.cm ²)	R _{tc} [z] (Ω.cm ²)	C (F)	i _{corr} [z] (mA/cm ²)	Vel _{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
3 000	0	-513.19	5.88	15.19	8.38E-03	1.71E-03	20.07	----
	20	-497.84	5.75	24.50	3.03E-03	1.06E-03	12.44	38.01
	50	-491.02	7.13	29.19	2.48E-03	8.90E-04	10.44	47.96
	100	-485.28	11.24	41.11	6.00E-03	6.32E-04	7.41	63.05

En la Figura 3.20 a) se puede observar que las 4 curvas tienen un comportamiento muy similar entre sí. Sin embargo, para una concentración de 50 y 100 ppm de inhibidor de Aloe Vera se presenta un ligero cambio de pendiente a 10 y 1000 Hz correspondientemente, así como también el que a todas las diferentes concentraciones de trabajo se presenta el mismo cambio de pendiente a 10 Hz.

Para todas las curvas se ve una meseta casi completamente horizontal a bajas frecuencias, lo que podría significar que hay un descenso de los fenómenos de difusión. [55] además de observar un aumento continuo del ángulo de fase a frecuencias intermedias.

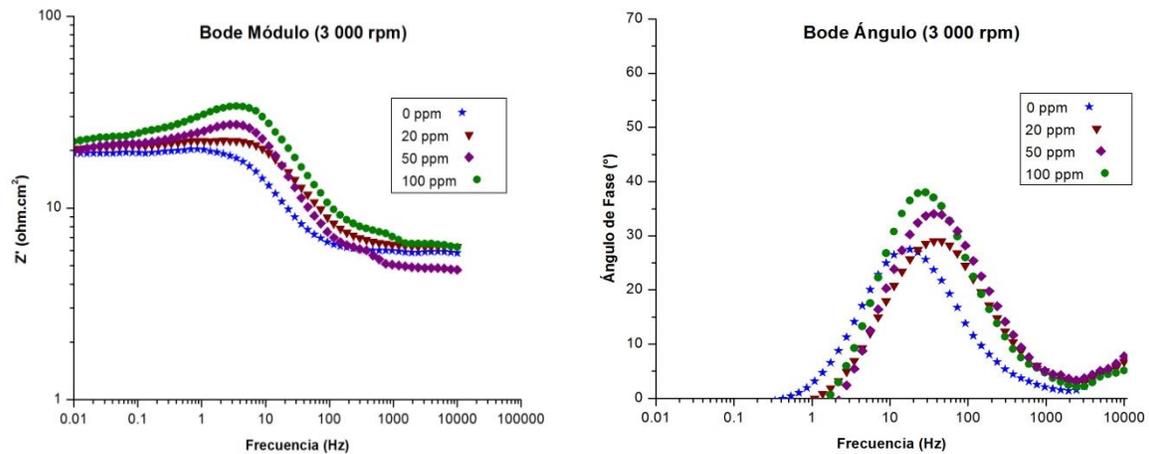


Figura 3.20 Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), a diferentes concentraciones del Aloe Vera a 3000 rpm.

Para las curvas de polarización (Figura 3.21) se puede ver en la rama catódica de la curva a 20 ppm de inhibidor que se presentan dos cambios de pendiente, uno hacia E_{corr} -595 mV y otro hacia E_{corr} -640 mV. En este intervalo de potenciales pareciera que la corriente está limitada por difusión, mientras que después de E_{corr} -640 mV este efecto desaparece. Lo anterior no se puede apreciar claramente, ya que el resto de las gráficas en la rama catódica están tan juntas que pareciera que se encuentran encimadas unas sobre otras.

Aumentos de la pendiente de Tafel hace más negativo el potencial de corrosión y por lo tanto, disminuye la velocidad de corrosión. Mientras más positivos son los valores del potencial de reposo mayor será la velocidad de corrosión. [62]

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A mayor densidad de corriente, mayor es la velocidad de corrosión, situación que se puede observar en las curvas de polarización a 3000 rpm, donde a pesar de tener eficiencias aparentemente buenas, únicamente son aplicables para esa condición de velocidad, ya que al ver la parte de velocidad de corrosión (mm/año), son números bastante altos a diferencia de los resultados presentados para velocidades menores.

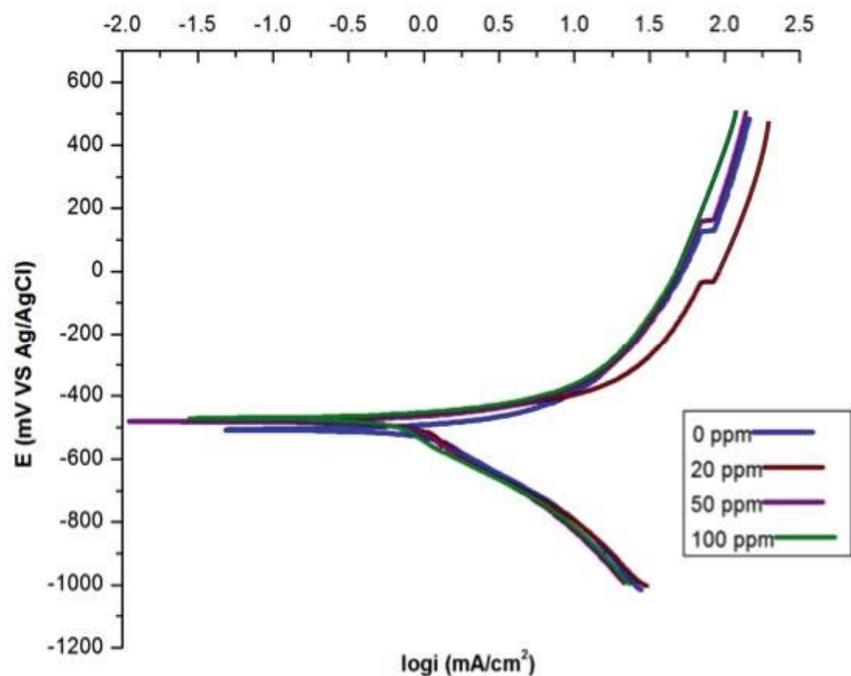


Figura 3.21 Curvas de Polarización para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % en peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para blanco, 20, 50 y 100 ppm de Aloe Vera a 3000 rpm.

Tabla 3.16 Datos de velocidad de corrosión y de eficiencia de inhibición para 3000 rpm a partir de las curvas de polarización.

Velocidad (rpm)	Concentración (ppm)	E (mV)	i_{corr} (A/cm ²)	V_{corr} (mm/año)	Eficiencia (%)
3 000	0	-479.75	4.8373	56.74	-----
	20	-472.01	2.7206	31.91	43.57
	50	-480.48	2.4240	28.43	49.88
	100	-507.59	1.7140	20.10	64.56

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas a las diferentes velocidades de rotación, se observó que la mejor concentración es de 100 ppm de inhibidor.

A partir de la gráfica de barras presentada (Figura 3.22) se puede observar que conforme se incrementa la velocidad de rotación en el sistema la eficiencia disminuye. Sin embargo, a una velocidad de 100 y 500 rpm no se presenta un gran cambio, lo que puede significar que este incremento de velocidad no afecta tanto en el sistema; es decir, que la película formada sobre el electrodo de trabajo aún logra mantenerse adsorbida sobre la superficie de este.

Caso contrario ocurre a 1000 rpm, dónde se puede ver un considerable descenso de la eficiencia de inhibición con respecto a las demás velocidades, incluso a esta condición la eficiencia es más baja que a 3000 rpm, teniendo así que la corrosión se ve más afectada por una velocidad de 1000 rpm que una de 3000 rpm, ya que los productos que podrían acumularse y minimizar de alguna forma la corrosión sobre la superficie metálica son completamente separados de esta a esa velocidad.

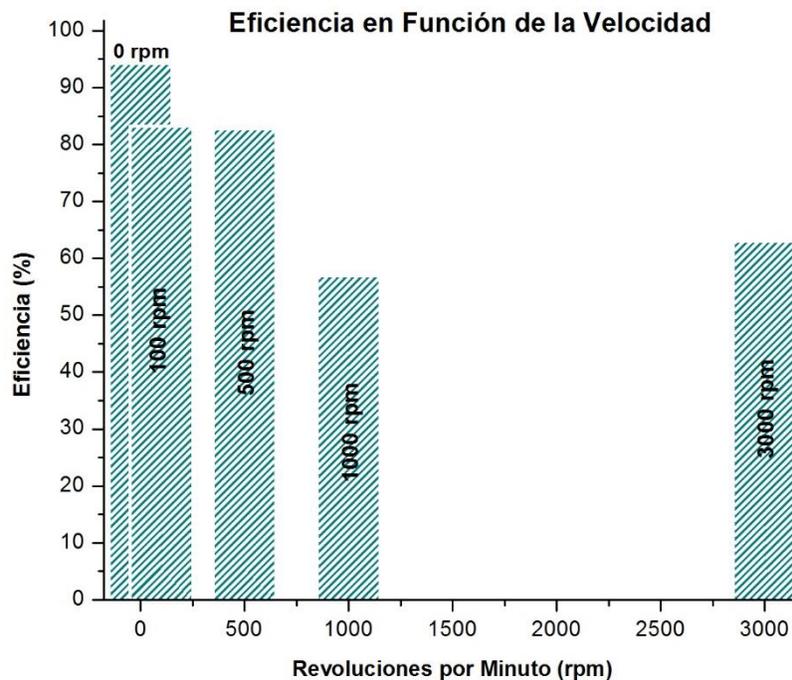


Figura 3.22 Eficiencia mediante EIS del Aloe Vera a 100 ppm de inhibidor a diferentes velocidades de rotación.

3.3 PRUEBAS DE IMPEDANCIA DURANTE 48 HRS

Un factor importante que marcó gran parte de la experimentación en cuanto a las eficiencias obtenidas fue el manejo del inhibidor, ya que, como se mencionó en la metodología experimental, no se puede tener un control de este, por lo que durante toda la experimentación se manejó la Sábila en estado natural, no como algún extracto de la misma.

Debido a los resultados obtenidos en condiciones estáticas, otro parámetro importante en el estudio de inhibidores de la corrosión es el efecto de la temperatura. Por lo que se optó por hacer pruebas de Impedancia Electroquímica (EIS) en modo estático a temperatura ambiente y en refrigeración (3°C) con 0, 50 y 100 ppm del inhibidor de Aloe Vera cada 2 hrs, durante 48 hrs contemplando su respectiva media hr de estabilización de potencial en cada medición.

3.3.1 Efecto del Aloe vera como inhibidor de la corrosión sobre el acero SAE 1018 en función del tiempo de inmersión a temperatura ambiente

En el diagrama de Nyquist (Figura 3.23) realizado en este apartado se observa que el diámetro de los semicírculos va disminuyendo conforme pasa el tiempo de exposición del electrodo de trabajo en la solución, es decir, las curvas con un color verde más intenso, son las curvas realizadas a un tiempo 0 y conforme se va degradando el color va indicando que ya son curvas más cercanas a un tiempo de 48 hrs de exposición en el medio.

Como se puede ver en la Figura 3.23, al hacer una comparación visual de estas a un tiempo 0 y a un tiempo de 48 hrs, el acero por sí solo, sin presencia alguna de inhibidor, el valor R_{tc} no disminuye considerablemente. La probeta logra crear una película finísima de óxido en la superficie de esta, impidiendo así, el contacto del resto de la masa con el medio, evitando que progrese la oxidación. ^[63]

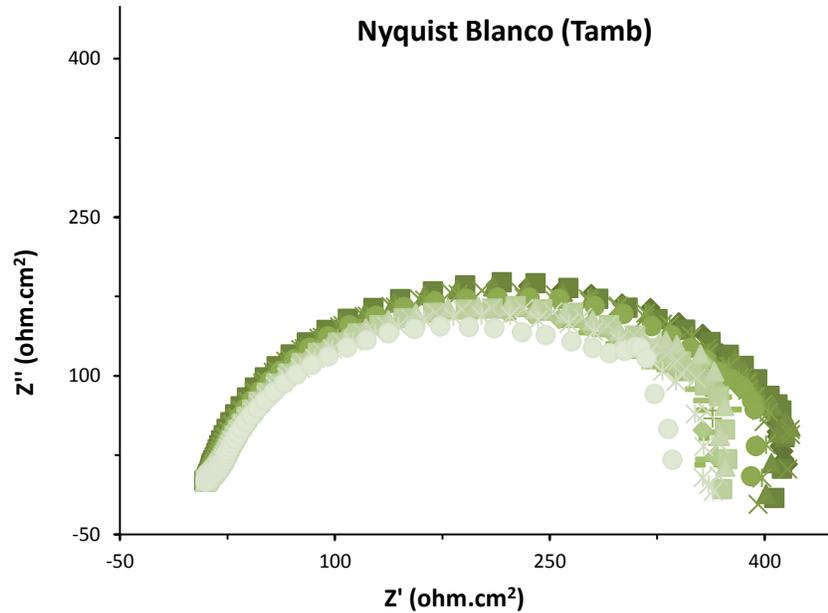


Figura 3.23 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para blanco, durante 48 hrs en modo estático a Tamb.

En la Figura 3.24 se puede ver que el módulo de la Impedancia se mantiene en el mismo orden de magnitud a los diferentes tiempos, así como que los ángulos de fase sufren un ligero desplazamiento hacia frecuencias más bajas, aunado a la disminución del ángulo de fase.

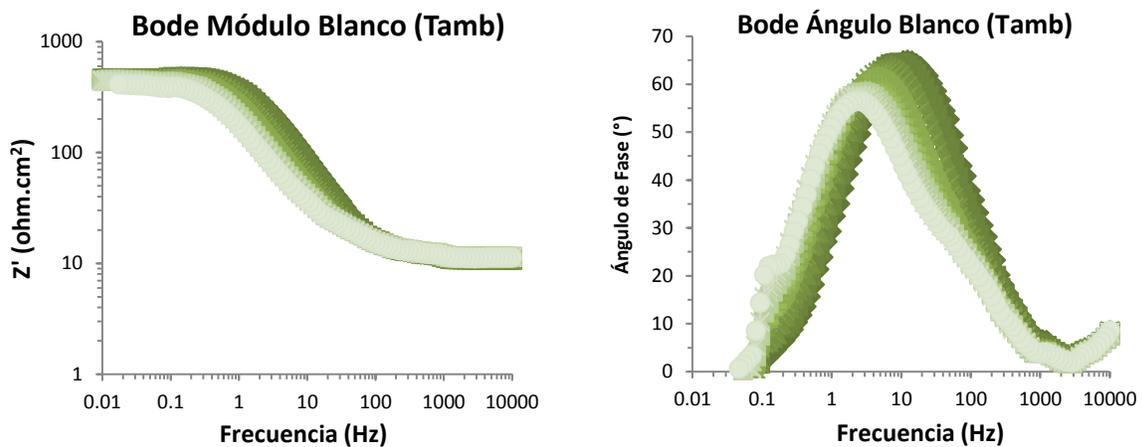


Figura 3.24 Diagramas Bode Módulo para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para blanco, durante 48 hrs en modo estático a Tamb.

Después de haber realizado las pruebas correspondientes al blanco, se evaluó la concentración de 50 ppm de inhibidor a base de Aloe Vera hasta 24 horas de inmersión.

En la figura 3.25 se puede ver el efecto que tiene el tiempo de exposición del metal en la solución con inhibidor a esta concentración, el cual se va atenuando con el paso de este. Esta ligera disminución se atribuye al resultado de la desorción de las moléculas adsorbidas del Aloe Vera debido al aumento de la solubilidad de los productos de corrosión, lo que sugiere una adsorción competitiva entre los iones de ácido agresivos y el inhibidor orgánico sobre la superficie metálica. ^[64]

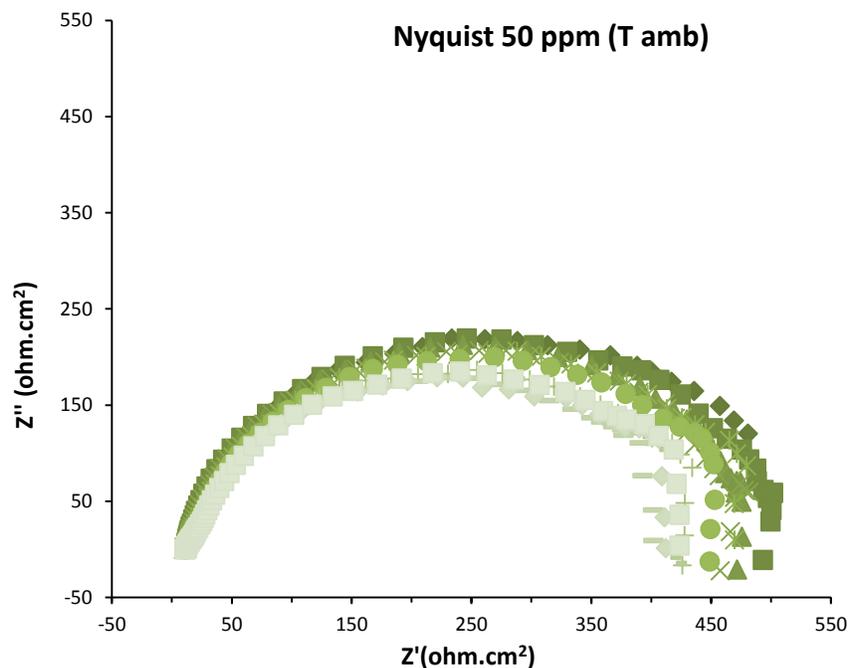


Figura 3.25 Diagramas de Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 con 50 ppm de inhibidor, durante 24 hrs en modo estático a Tamb.

Lo anterior se corrobora en el diagrama de Bode (Figura 3.26), ya que se mantiene en el mismo orden de magnitud el módulo de la Impedancia.

En el diagrama de Bode Ángulo de Fase, se puede observar como en un tiempo cero se tiene una constante de tiempo en frecuencias intermedias. Sin embargo, con el paso del tiempo estas se desplazan hacia frecuencias menores disminuyendo también el ángulo de fase.

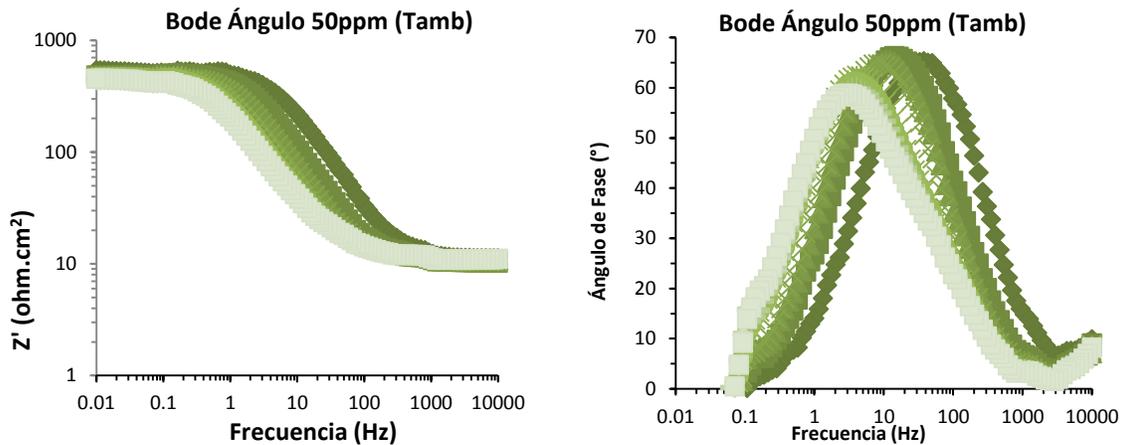


Figura 3.26 Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 con 50 ppm de inhibidor, durante 24 hrs en modo estático a Tamb.

Para el caso de 100 ppm (Figura 3.27), haciendo un seguimiento de la prueba electroquímica cada 2 hrs durante 48 hrs de inmersión se observa una disminución gradual del valor de Z' real de 710 Ω·cm² a 420 Ω·cm².

El diámetro del semicírculo en el diagrama de Nyquist sufre una reducción considerable, lo cual se traduce en una disminución de la resistencia de polarización (Rp) o lo que es lo mismo, de la resistencia a la corrosión que lleva asociado un aumento de la capacitancia (C), lo cual se relaciona con un aumento del área superficial efectiva. Lo que indica que la superficie es menos homogénea. Todos estos aspectos indican que la resistencia a la corrosión es menor conforme se incrementa el tiempo de exposición en la solución. [29]

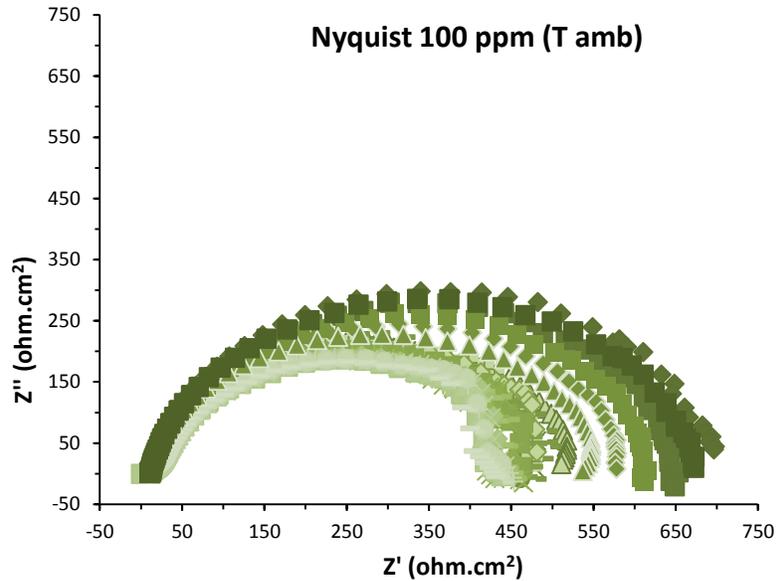


Figura 3.27 Diagramas Nyquist de Impedancia para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 con 100 ppm de inhibidor, durante 48 hrs en modo estático a T_{amb}.

Se puede ver en la Figura 3.28 que el módulo de la Impedancia no se mantiene siempre en el mismo orden de magnitud. Para Bode Ángulo de Fase se puede ver que las constantes de tiempo sufren un desplazamiento hacia frecuencias más bajas con el paso del tiempo, así como también se nota el cambio gradual en la disminución del ángulo de fase.

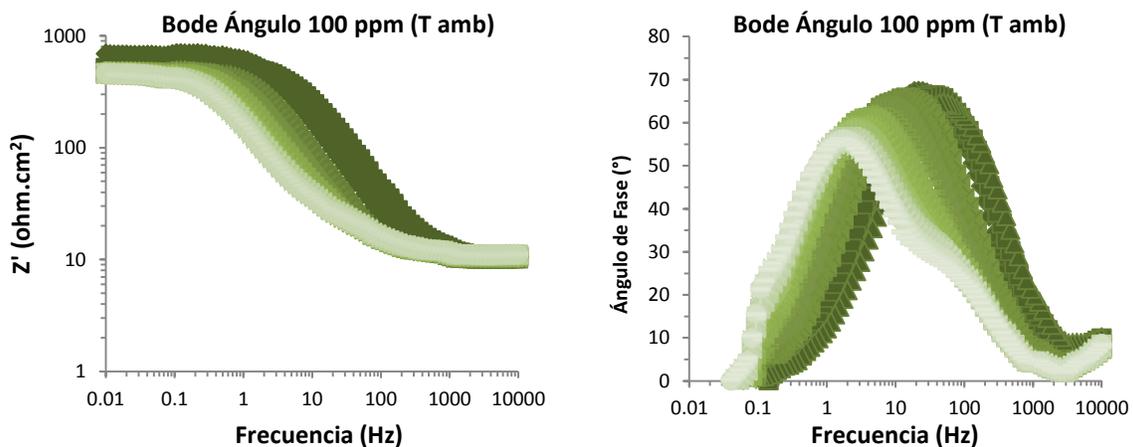


Figura 3.28 Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 con 100 ppm de inhibidor, durante 48 hrs en modo estático a T_{amb}.

Uno de los problemas más significativos de los inhibidores de corrosión orgánicos, es que no sobreviven a largos periodos de exposición en el medio corrosivo ^[65] y más en este caso si se considera que se trabajó el Aloe Vera en su forma natural, y como todo lo que se conoce en la naturaleza, con el paso del tiempo sufre descomposición, sin importar el medio en el que se encuentre.

Lo anteriormente analizado a partir de los diagramas de EIS se puede trabajar de mejor forma con la Tabla 3.17, dónde se puede ver cómo es que la pérdida de eficiencia por parte del Aloe Vera a 50 ppm después de 24 hrs es menor que para una concentración de 100 ppm después del mismo tiempo de exposición en el medio, es decir, con el paso del tiempo la R_{tc} disminuye, así como que la Capacitancia (C) disminuye a mayor tiempo de exposición en la solución.

Tabla 3.17 Parámetros obtenidos durante 48 hrs de inmersión en una solución tipo NACE TM0177, pH= 3 en modo estático a partir de EIS_[z]

Concentración (ppm)	Tiempo de Inmersión (hrs)	R_{sol} ($\Omega.cm^2$)	C (F)	$R_{tc[z]}$ ($\Omega.cm^2$)
0	2	10.06	7.03E-04	441.83
	48	16.29	4.41E-03	407.34
50	2	9.41	4.12E-04	569.55
	24	13.46	3.57E-03	472.26
100	2	9.94	5.47E-04	792.15
	24	17.06	5.64E-03	440.31
	48	16.90	3.30E-03	392.81

Generalmente estas sustancias se degradan debido a reacciones que se llevan a cabo dentro del sistema, ya sea por descomposición térmica, reacciones provocadas por especies del medio, o bien debido a que la superficie metálica actúa como catalizador contribuyendo en la desactivación de la reacción, esto quiere decir, que si el metal se encuentra polarizado puede cambiar la química del inhibidor, de esta manera comienza la acción corrosiva del medio. ^[66]

La pérdida de eficiencia de inhibición a 100 ppm es de un poco más del doble que a 50 ppm, lo que puede incluso dar a suponer que como se trata del doble de concentración de inhibidor empleada se descompone de igual forma en la misma cantidad de solución (1 L), o se desorbe de la superficie metálica, como ya se había mencionado anteriormente.

Con los valores obtenidos para $R_{tC_{[z]}}$ se puede apreciar que si se sacará la V_{corr} claramente se podría ver cómo es que el inhibidor, conforme más tiempo se encuentra en la solución, pierde completamente su efecto e incluso comienza a promover la corrosión.

Independientemente de la forma en que sea utilizada la planta, los mejores resultados se obtuvieron cuando el gel se utilizaba inmediatamente después de que se había cortado la hoja,

3.3.2 Efecto del Inhibidor sobre el acero SAE en tiempos largos de inmersión a Temperatura de Refrigeración ($\pm 3^{\circ}\text{C}$)

El diagrama de Nyquist se presenta de la misma forma que en las pruebas a 48 hrs a temperatura ambiente, es decir, las curvas con una tonalidad más oscuras son a tiempo 0 y se van degradando con el paso de este, hasta llegar a un tiempo de 48 hrs.

En la Figura 3.29 no se advierte la tendencia a cerrar un semicírculo que indique activación del proceso de corrosión. Se observa la predominancia de la variable imaginaria sobre la real, señal de un comportamiento capacitivo en la interfase del acero. [67]

Se puede observar también que a un tiempo cero el radio del semicírculo se ve reducido en comparación con los demás tiempos, lo cual se traduce en una disminución de la Resistencia a la Polarización (R_p) o lo que es lo mismo, de la resistencia a la corrosión, fenómeno que lleva asociado un aumento de Capacitancia (C), lo cual se relaciona con un aumento del área superficial efectiva.

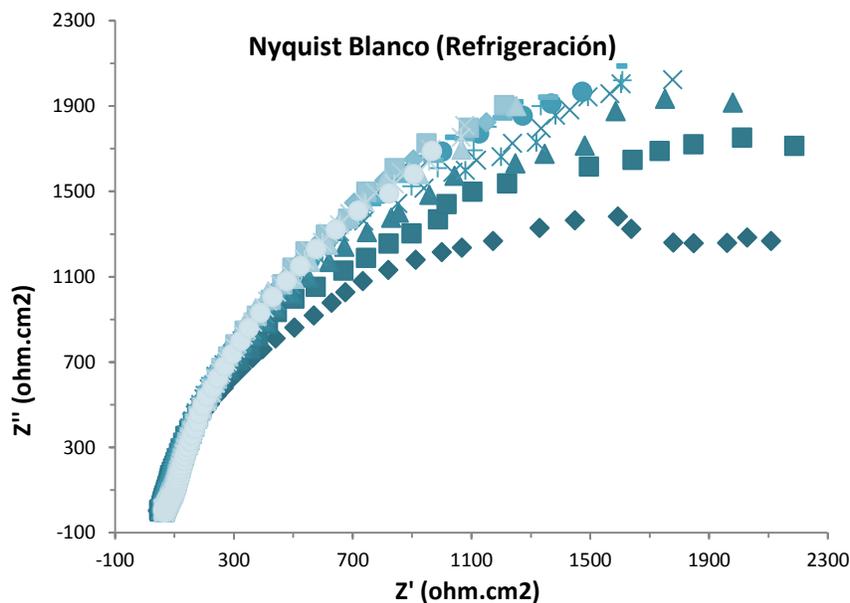


Figura 3.29 Diagramas Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH_3COOH glacial 5 % en peso), pH=3 para blanco durante 48 hr, modo estático, 3°C

En los diagramas de Bode (Figura 3.30) se puede observar que la Impedancia se mantiene casi siempre en el mismo orden de magnitud, así como que las constantes de tiempo se desplazan hacia frecuencias menores conforme pasa el tiempo, sin embargo el ángulo de fase se mantiene casi todo el tiempo en el mismo punto (70°).

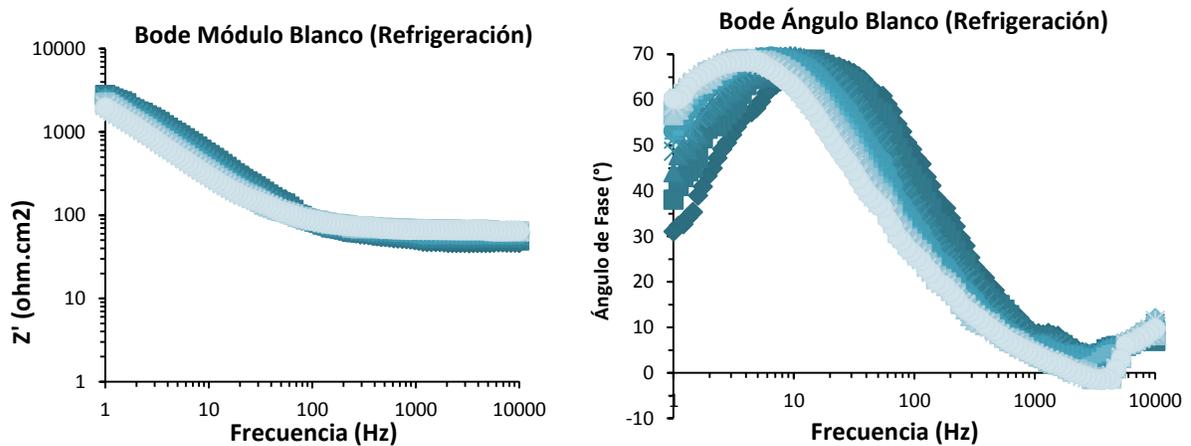


Figura 3.30 Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH_3COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para blanco durante 48 hrs, modo estático, 3°C .

El comportamiento de los diagramas de Nyquist presentados en la Figura 3.31 describe que inicialmente (tiempo 0) la presencia del Aloe Vera (a esas condiciones de temperatura) forma una película protectora heterogénea sobre la superficie del sustrato metálico que interviene directamente en las lecturas de EIS cuya capacidad protectora aumenta de forma continua con el paso del tiempo, lo que significa que durante el periodo de exposición hay una variación cinética electroquímica. ^[68]

Al adherirse el inhibidor de corrosión sobre la superficie expuesta del metal, al término de la prueba, para un tiempo de 48 hrs la R_{tc} final del sistema es mayor que la registrada en el tiempo 0.

En estos diagramas también se observa que a partir de un tiempo de 10 hrs las curvas presentan un segundo semicírculo, lo que indica que a partir de ese tiempo se presenta la existencia de un transporte de masa por difusión en el sistema. ^[68]

Los valores de R_{tc} se incrementan conforma aumenta el tiempo de exposición, ocasionando de forma directa que la velocidad de corrosión disminuya, caso contrario que ocurría con las pruebas a temperatura ambiente, donde conforme incrementaba el tiempo de exposición en la solución con inhibidor se iba favoreciendo la corrosión.

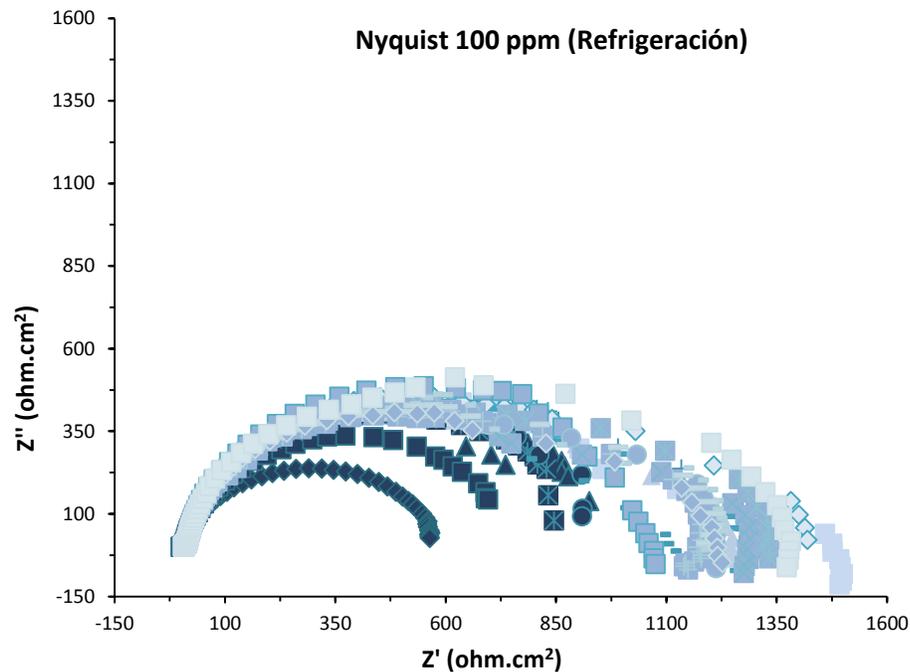


Figura 3.31 Diagramas Nyquist para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH_3COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para 100 ppm durante 48 hrs, modo estático en refrigeración.

En la Figura 3.32 se puede ver que el ángulo de fase evoluciona con el paso del tiempo, observándose un aumento del mismo, así como un ensanchamiento de la curva angular.

Existe un ángulo de fase en un rango más amplio de frecuencias conforme pasa el tiempo. El ensanchamiento de las curvas correspondientes a unos ensayos aún más tardíos (24 – 48 hrs), están menos amplias que las del tiempo cero.

Para el diagrama de Nyquist se podía apreciar la presencia de 2 semicírculos a partir de 10 hrs, lo que se vería reflejado en el diagrama de Bode, lo cual sucede.

Se puede apreciar también una segunda constante de tiempo en el rango de bajas frecuencias y un incremento continuo en el ángulo de fase con el tiempo durante el proceso de formación de una película.

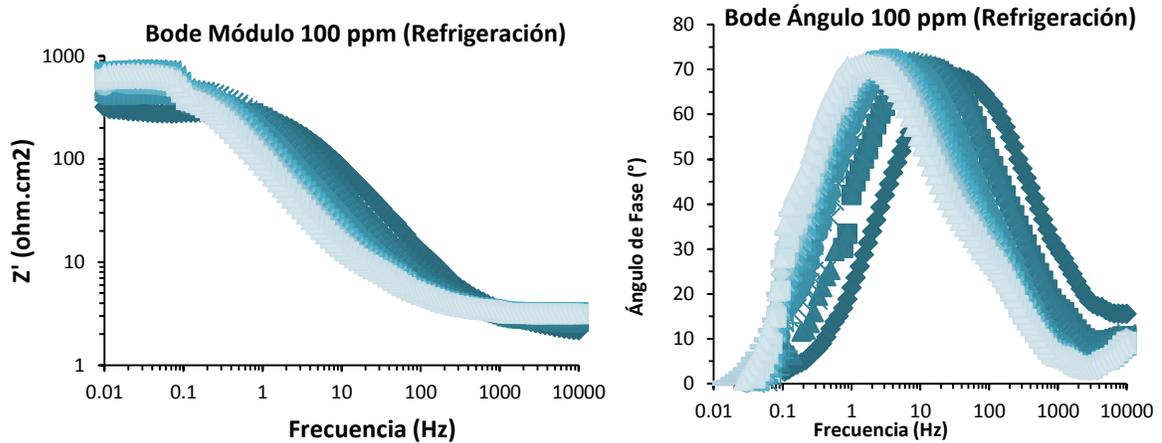


Figura 3.32 Diagramas Bode para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH₃COOH glacial 5 % en peso), pH= 3 para 100 ppm durante 48 hrs, modo estático en refrigeración.

Con estas pruebas en refrigeración se puede ver claramente cómo es que la temperatura afecta el grado de funcionalidad del inhibidor en los procesos de corrosión.

A partir de los resultados presentados en la Tabla 3.18, se observa que los valores de R_{tc} a 100 ppm de inhibidor se incrementan conforma aumenta el tiempo de exposición, ocasionando de forma directa que la velocidad de corrosión disminuya.

Tabla 3.18 Parámetros electroquímicos obtenidos durante 48 hrs de inmersión en una solución tipo NACE TM 0177, pH= 3 en modo estático a Temperatura de Refrigeración a partir de EIS_[z]

Concentración (ppm)	Tiempo de Inmersión (hrs)	R_{sol} ($\Omega.cm^2$)	C (F)	$R_{tc[z]}$ ($\Omega.cm^2$)
0	2	44.88	1.80E-04	3416.23
	48	62.69	3.71E-04	5195.40
100	2	1.98	1.37E-03	587.52
	48	0.79	8.85E-03	1651.41



CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES

4. CONCLUSIONES

Con este trabajo se pudo observar que la concentración óptima del inhibidor empleado de Aloe Vera, para cualquier condición hidrodinámica, es de 100 ppm.

A pesar de haber mostrado buenos resultados el inhibidor, únicamente cumple con la eficiencia requerida por la norma NRF-005-PEMEX-2009: "Protección Interior de Ductos con Inhibidores" [27], la cual era de un 90%, a condiciones estáticas con una eficiencia de 94.78% con 100 ppm y de 93.76% con 50 ppm de inhibidor.

En condiciones hidrodinámicas las máximas eficiencias obtenidas fueron de 83.25% a 100 rpm, 82.77% a 500 rpm, 56.89% a 1 000 rpm y de 63.05% a 3000rpm para 100 ppm.

Conforme se incrementa el tiempo de exposición en el medio corrosivo a temperatura ambiente, la eficiencia por parte del inhibidor disminuye como consecuencia a una degradación por parte del Aloe Vera.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kelly, R., Scully J., Shoesmith D., Buchheit R. (2003). *“Electrochemical techniques in corrosion science and engineering”*. New York: Marcel Dekker. pág.21 – 24.
- [2] López González, M. (2003). *“Resistencia a la corrosión de aceros inoxidables de última generación en medios que contienen cloruros y mezclas cloruro-floruro”*. Doctorado. Universidad Complutense, pág. 22 – 26.
- [3] Cabrera-Sierra, R., Sosa, E., Oropeza, M. and González, I. (2002). “Electrochemical study on carbon steel corrosion process in alkaline sour media”. *Electrochimica Acta*, 47(13-14), pp.2149-2158.
- [4] Alvarado Cortés, J. (2006). *“Selección Electroquímica de Compuestos Orgánicos como Inhibidores de Corrosión en Medio Ácido”*. Licenciatura. ICBI, pág. 25.
- [5] Cruz, J., Martínez, R., Genesca J., García-Ochoa, J. *“Programa de Mejoramiento Molecular, Instituto Mexicano del Petróleo”*, Eje Central Lázaro Cárdenas No. 152, San Bartolo Atepehuacan, C.P. 07730, México D.F., Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química, UNAM.
- [6] González Fernández, J. (1984). *“Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión”*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, pág. 236.
- [7] Andrade Perdrix, M. (1991). *“Corrosión y Protección Metálicas”*. 1. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. España: CSIC, pág. 167.
- [8] Marc, D. (2016). *LA CORROSIÓN EN EL CAMPO PETROLERO*. [online] Academia.edu. Available at: http://www.academia.edu/5817195/LA_CORROSIÓN_EN_EL_CAMPO_PETROLERO [Accessed 28 Sep. 2015].
- [9] Galván, J., Lory, A., Nolasco, J., Nava, Y. (1982). *“Tratamiento del agua de inyección”*. Boletín del Instituto Mexicano del Petróleo, México, pág. 1, 4.
- [10] Roberge, P.R. (2000). *“Handbook of Corrosion Engineering”*. Editorial Mc Graw-Hill, New York, pág. 19, 833.
- [11] Bradford, S. (1993). *“Corrosion control”*. New York: Van Nostrand Reinhold, pág. 17.
- [12] Uhlig, H. and Revie, R. (1985). *“Corrosion and corrosion control”*. New York: Wiley, pág.1089.

- [13] Gulbrandsen, E., Nestic, S., Stangeland, A., Buchart, T., Sundfaer, B., Hesjevik, S.M., Skjerve, S. (1998). "Corrosion". Houston, TX: NACE International, pág. 3.
- [14] Dougherty, J. (2000). "Laboratory studies comparing batch and continuous corrosion inhibitors treatments". USA: Bulletin Petrolit Corporation, pág. 10.
- [15] Campo Garrido C. (1999). "Inhibidores de Corrosión". México: Agrupación Mexicana de Ingenieros en Corrosión A.C. Primeras jornadas técnicas de ingeniería de corrosión, pág.12.
- [16] ASM Handbook Corrosion. (1992), American Society of Metals. 13. pág. 1045.
- [17] Fischer, H. (1996). "Sur les Inhibiteurs de Corrosion". Ferrara: Comptes Rendus de 2 eme Europeen Symp, pág.88 – 90.
- [18] Roncagliolo Barrera, P. (2013). "Evaluación de un inhibidor en fase vapor a través de ruido electroquímico". Maestría. UNAM, pág. 23.
- [19] Olvera Martínez, M.E. (2012). "Efecto del flujo turbulento, la condición superficial de ácido acético y un compuesto orgánico usando como inhibidor de corrosión, sobre la cinética electroquímica del acero API 5L X52 en soluciones con CO₂ disuelto". Doctorado. UNAM, pág. 66, 67.
- [20] Hernández Jhoacc, R., Paredes, A., and Mejía, S. (1998). "Protección superficial de los metales". México: SITESA, pág. 55.
- [21] Nnabuk, E., Stoyanov Stanislav, R., Ebenso Eno, E. (2010). "Fluoroquinolones as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Acidic Medium; Experimental and Theoretical Studies". *International Journal of Electrochemical Science*. 5, pág. 1127-1150.
- [22] Rani, B. and Basu B. (2012). "Green Inhibitors for Corrosion Protection of Metals and Alloys: An Overview". *International Journal of Corrosion*, pág. 2.
- [23] Praveen, B. and Venkatesha, T. (2009). "Metol as Corrosion Inhibitor for Steel". *International Journal of Electrochemical Science*. 4, pág. 267 – 275.
- [24] Singh, A., Lin, Y., Liu, W., Kuanhai, D., Pan, J., Huang, B., Ren, C. and Zeng, D. (2014). "A study on the inhibition of N80 steel in 3.5% NaCl solution saturated with CO₂ by fruit extract of *Gingko biloba*". *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(4), pág. 1922.

- [25] Umoren, S., Obot, I., Madhankumar, A. and Gasem, Z. (2015). "Performance evaluation of pectin as ecofriendly corrosion inhibitor for X60 pipeline steel in acid medium: Experimental and theoretical approaches". *Carbohydrate Polymers*, 124, pág. 284.
- [26] El ouariachi, E., Bouyanzer, A., Salghi, R., Hammouti, B., Desjobert, J., Costa, J., Paolini, J. and Majidi, L. (2013). "Inhibition of corrosion of mild steel in 1 M HCl by the essential oil or solvent extracts of *Ptychotis verticillata*". *Research on Chemical Intermediates*, 41(2),pág. 943.
- [27] Kamal, C. and Sethuraman, M. (2012). "Spirulina platensis – A novel green inhibitor for acid corrosion of mild steel". *Arabian Journal of Chemistry*, 5(2), pág. 159.
- [28] Raja, P., Qureshi, A., Rahim, A., Awang, K., Mukhtar, M., and Osman, H. (2012). "*Indole Alkaloids of Alstonia angustifolia var. latifolia as Green Inhibitor for Mild Steel Corrosion in 1 M HCl Media*". *Journal of Materi Eng and Perform*, 22(4), pág. 1074.
- [29] García Inzunza, R. (2014). "*Inhibidores de Corrosión de Acero en Medios Ácidos a partir de Extractos Naturales*". Doctorado. Universidad Autónoma de Baja California, pág. 132, 146.
- [30] Bustamante Sánchez, K., Reyes, A. (2006). "*Una metodología para el estudio del Aloe Vera. Agente inhibidor de la corrosión*". Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Caracas Venezuela: Larus. 12, pág. 228.
- [31] Dominguez-Fernández, R., Arzate-Vázquez, I., Chanoa-Pérez, J., Welti-Chanes, J., Alvarado-González, J., Calderon-Dominguez, G., Garibay-Febles V., Gutierrez López, G. (2012). "*Aloe Vera gel: Structure, chemical composition, processing, biological activity and importance in pharmaceutical and food industry*". UAM Iztapalapa, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, pág. 1, 3, 8.
- [32] Cheng Y. y Chen F. (2009). "*Aloe vera glove and its manufacturing method*". Patent: Us007579028b1. United States Patent, pág. 89, 92.
- [33] "*Farmacopea Herbolaria de los Estados Unidos Mexicanos*". (2013) 2° Edición, pág. 158, 159.
- [34] Kuklinski C. (2000). "*Farmacognosia, Estudio de las drogas y sustancias medicamentosas de origen natural*". Barcelona: Omega, pág. 279 – 281.
- [43] Fontana, M. (1986). "*Corrosion Engineering*". New York: McGraw Hill, pág. 16 – 17.

- [68] González Fernández J. (1989). "Control de Corrosión Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas", Madrid: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, pág. 407 – 446.
- [35] Aljourani, J., Golozar, M. and Raeissi, K. (2010). "The inhibition of carbon steel corrosion in hydrochloric and sulfuric acid media using some benzimidazole derivatives". *Materials Chemistry and Physics*, 121(1-2), pág.320 – 325.
- [36] Morales-Gil, P., Negrón-Silva, G., Romero-Romo, M., Ángeles-Chávez, C. and Palomar-Pardavé, M. (2004). "Corrosion inhibition of pipeline steel grade API 5L X52 immersed in a 1 M H₂SO₄ aqueous solution using heterocyclic organic molecules". *Electrochimica Acta*, 49(26), pág. 4733 – 4741.
- [37] Cao, C. (1996). "On electrochemical techniques for interface inhibitor research". *Corrosion Science*, 38(12), pág. 2073 – 2082.
- [38] Anon, (2016). [online] Available at:
<https://lopei.files.wordpress.com/2011/07/corrosion-por-co2-y-h2s-1.pdf>
[Accessed 1 Oct. 2015].
- [39] NRF-005-PEMEX-2009: *Protección Interior de Ductos con Inhibidores*. (2000)
- [40] Scully, J. (2000). "Polarization resistance method for determination of instantaneous corrosion rates". *Corrosion*, 56(2), pág. 205.
- [41] Zhang, S., Tao, Z., Liao, S. and Wu, F. (2010). "Substitutional adsorption isotherms and corrosion inhibitive properties of some oxadiazol-triazole derivative in acidic solution". *Corrosion Science*, 52(9), pág.3126-3132.
- [42] Hladky, K., Callow, L. and Dawson, J. (1980). "Corrosion Rates from Impedance Measurements: An Introduction". *British Corrosion Journal*, 15(1), pág. 20 – 25.
- [44] Mills, K. (1985). "*Metallography and microstructures*". Metals Park, Ohio: American Society for Metals, pág. 354.
- [45] Videm, K., Dugstad, A. (1989). "Corrosion of Carbon Steel in an Aqueous Carbon Dioxide Environment". *Materials Performance*. 28, pág. 63 – 67.
- [46] ASTM E3 – 01, "*Estándar Practice for Preparation of Metallographic Specimens*".
- [47] NACE Standard TM0177-86, "*Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments*".
- [48] Electrochemical calendar. (1990). *Electrochimica Acta*, 35(9), pp.1479-1482.

- [49] Ogundele, G. and White, W. (1986). "Some Observations on the Corrosion of Carbon Steel in Sour Gas Environments: Effects of H₂S and H₂S/CO₂/CH₄/C₃ H₈ Mixtures". *Corrosion*, 42(7), pp.398-408.
- [50] Thirumalairaj, B. and Jaganathan, M. (2015). "Corrosion protection of mild steel by a new binary inhibitor system in hydrochloric acid solution". *Egyptian Journal of Petroleum*, pág. 5.
- [51] Kosari, A., Moayed, M., Davoodi, A., Parvizi, R., Momeni, M., Eshghi, H. and Moradi, H. (2014). "Electrochemical and quantum chemical assessment of two organic compounds from pyridine derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in HCl solution under stagnant condition and hydrodynamic flow". *Corrosion Science*, 78, pág. 138 – 150.
- [52] Allam, A., Ateya, B. and Pickering, H. (1997). "Effect of Chloride Ions on Adsorption and Permeation of Hydrogen in Iron". *Corrosion*, 53(4), pág. 284.
- [53] Sekine, I., Hatakeyama, S. and Nakazawa, Y. (1987). "Effect of water content on the corrosion behaviour of type 430 stainless steel in formic and acetic acids". *Electrochimica Acta*, 32(6), pág. 915.
- [54] Crolet, J., Thevenot, N. and Nestic, S. (1998). "Role of Conductive Corrosion Products in the Protectiveness of Corrosion Layers". *Corrosion*, 54(3), pág. 194.
- [55] Singh, M. and Gupta, A. (2000). "Corrosion Behavior of Mild Steel in Acetic Acid Solutions". *Corrosion*, 56(4), pág. 371 – 374.
- [56] Aperador, W., Delgado, A. and Vera, E. (2011). "Monitoreo mediante EIS del acero embebido en un concreto de escoria activada alcalinamente expuesto a carbonatación". *Rev. ing. constr.*, 26(1), pág. 84.
- [57] McCafferty, E., Hackerman, N. (1972). "Kinetics of iron corrosion in concentrated acidic chloride solutions", *Journal of Electrochemical Society*. 119, pág. 199.
- [58] Bonnel, A. (1983). "Corrosion Study of a Carbon Steel in Neutral Chloride Solutions by Impedance Techniques". *Journal of The Electrochemical Society*, 130(4), pág. 753.
- [59] EL-Haddad, M. (2014). "Hydroxyethylcellulose used as an eco-friendly inhibitor for 1018 c-steel corrosion in 3.5% NaCl solution". *Carbohydrate Polymers*, 112, pág. 595 – 602.
- [60] Choi, Y. and Kim, J. (2000). "Aqueous Corrosion Behavior of Weathering Steel and Carbon Steel in Acid-Chloride Environments". *Corrosion*, 56(12), pág. 1202 – 1204.

- [61] Cid, M. (1981). Discussion of "Reaction Model for Iron Dissolution Studied by Electrode Impedance I. Experimental Results and Reaction Model" [M. Keddam, O. R. Mattos, and H. Takenouti (pp. 257–266, Vol. 128, No. 2)]. *Journal of The Electrochemical Society*, 128(12), pág. 257- 260.
- [62] Cabrera-Sierra, R., Sosa, E., Oropeza, M. and González, I. (2002). "Electrochemical study on carbon steel corrosion process in alkaline sour media". *Electrochimica Acta*, 47(13-14), pág.2149-2158.
- [63] Yan, L., Niu, L., Lin, H., Wu, W. and Liu, S. (1999). "Quantum chemistry study on the effect of Cl⁻ ion on anodic dissolution of iron in H₂S-containing sulfuric acid solutions". *Corrosion Science*, 41(12), pág. 2303.
- [64] Chidiebere, M., Oguzie, E., Liu, L., Li, Y. and Wang, F. (2015). "Ascorbic acid as corrosion inhibitor for Q235 mild steel in acidic environments". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 26, pág.182 – 192.
- [65] Raichev R., Veleva, L., Valdez, B. (2009). "Corrosión de metales y degradación de materiales". Mexicalli: Departamento de Editorial Universitaria, pág. 58 – 61.
- [66] Khaled, K. (2010). "Studies of iron corrosion inhibition using chemical, electrochemical and computer simulation techniques". *Electrochimica Acta*, 55(22), pág. 6523 – 6532.
- [67] Jüttner, K. (1990). "Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) of corrosion process on inhomogeneous surfaces". *Electrochimica Acta*, 35(10), pág. 1501 – 1508.
- [69] Ehteram Noor A. (2007). "Temperature Effects on the Corrosion Inhibition of Mild Steel in Acidic Solutions by Aqueous Extract of Fenugreek Leaves". *International Journal Electrochemical Science*, pág. 996 – 1017.

*Textos adicionalmente consultados, no referidos en el texto, pero de gran apoyo para realizar la interpretación de los resultados aquí obtenidos.

Veloz Rodríguez, M. (2003) "Mecanismos de corrosión de acero al carbono en una solución amortiguadora de ácido acético, cloruros y H₂S", Tesis Doctoral, UAMI.

Veloz, M., Cruz, J., Rodríguez, A. N., González, I., Estrada, A., García Cruz I., (2000). "Correlación estructura-eficiencia de inhibición de la corrosión de compuestos piridínicos", Memorias del XV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y XIV Congreso Internacional de la Sociedad Iberoamericana de Electroquímica, SIBAE 2000, Oaxaca, México, Mayo.

Duarte H., See, D., Popov M., White, R. (1998). "Organic compounds as effective inhibitors for hydrogen permeation of type 1010 steel", Corrosion.

Consulta de red, "Inhibitors for the petroleum industry", dirección: <http://www.intercorr.com/inhibitors.htm>.

NACE TM0169-2000 "Laboratory Corrosion Testing of Metals", Houston TX: NACE, (2000)

ASTM Standard G4-95 "Standard Guide for conducting corrosion coupon Test in Field Applications", ASTM International".

ASTM Standard G1-90 (Reapproved 1994), "Standard Practice for Preparing Cleaning, and Corrosion Testy Specimens", ASTM International."

ASTM G-59 "Practice for conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurement"

ASTM G-185-06 "Standard Practice for Evaluating and Qualifying Oil Field and Refinery Corrosion Inhibitors Using the Rotating Cage"



A N E X O S

ANEXO A1

- Gráficas de Potencial de Corrosión vs Tiempo para un acero al carbono SAE 1018 en una solución de tipo NACE TM 0177 (NaCl 50 % peso y CH₃COOH glacial 5% en peso), pH=3, a temperatura ambiente.

Figura A1.1. Curvas de potencial vs tiempo en modo estático.

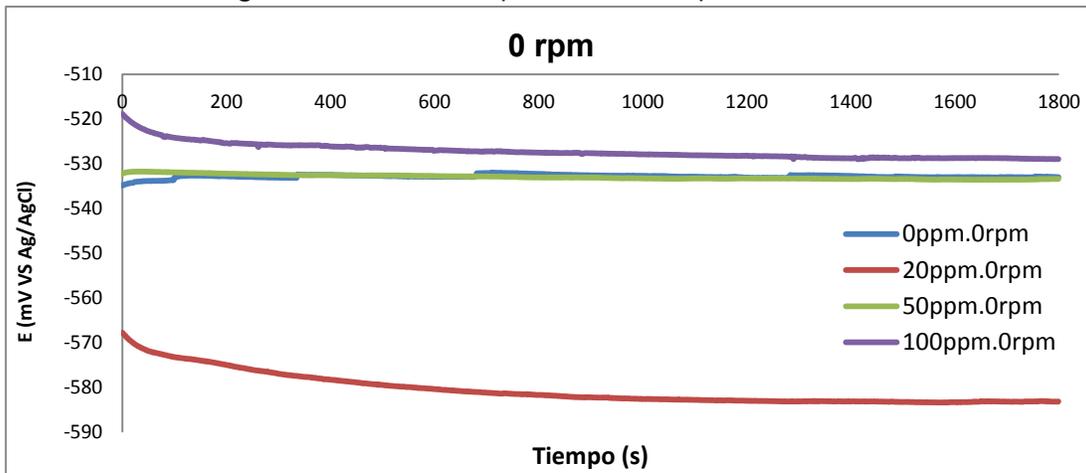


Figura A1.2. Curvas de potencial de corrosión vs tiempo a 100 rpm.

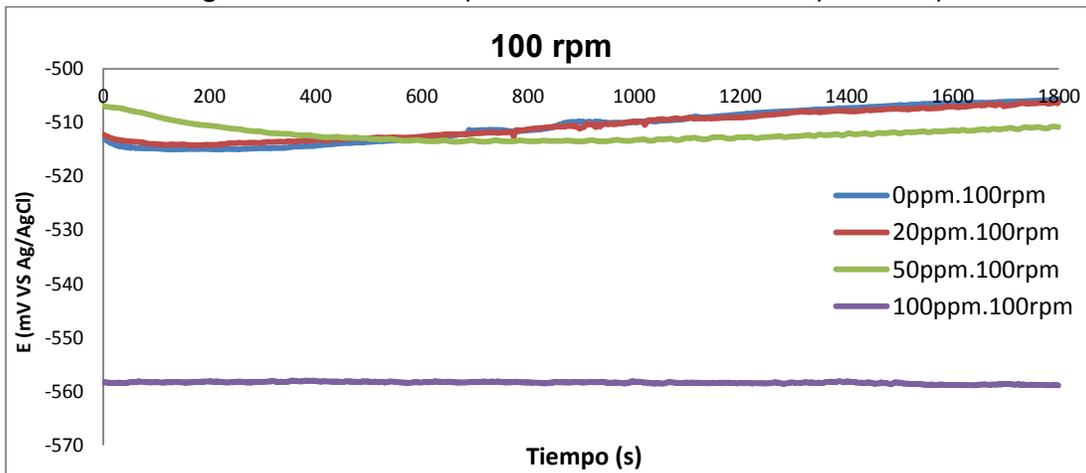


Figura A1.3. Curvas de potencial vs tiempo a 500 rpm.

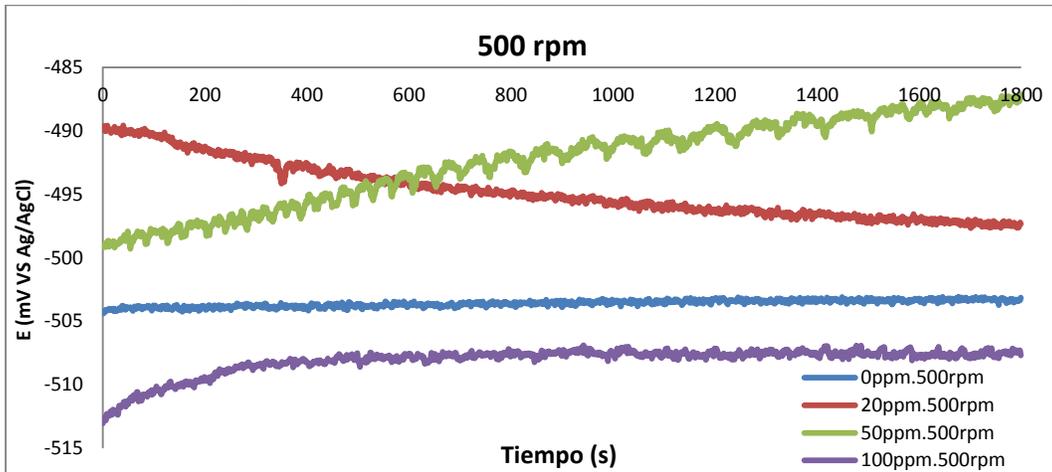


Figura A1.4. Curvas de potencial vs tiempo a 1000 rpm.

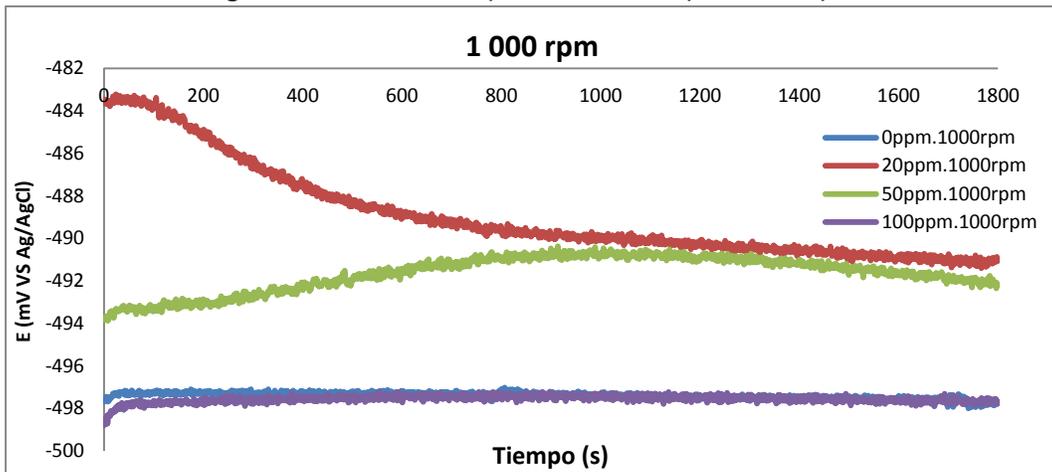
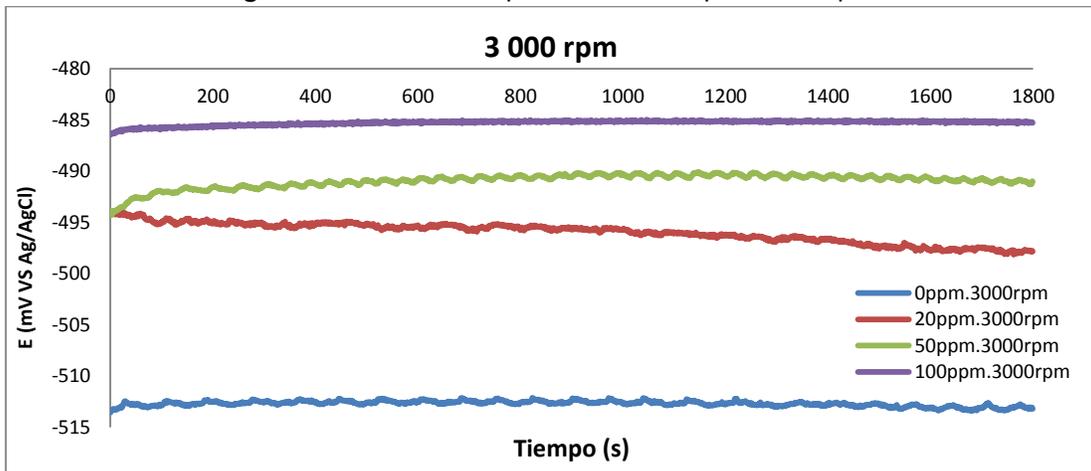


Figura A1.5. Curvas de potencial vs tiempo a 3000 rpm.



ANEXO A2.

- Simulación de datos experimentales con los datos calculados a 100 ppm de inhibidor de *Áloe Vera* a diferentes velocidades de rotación.

Figura A2.1. Diagrama de Nyquist del *Áloe Vera* en condiciones estáticas.

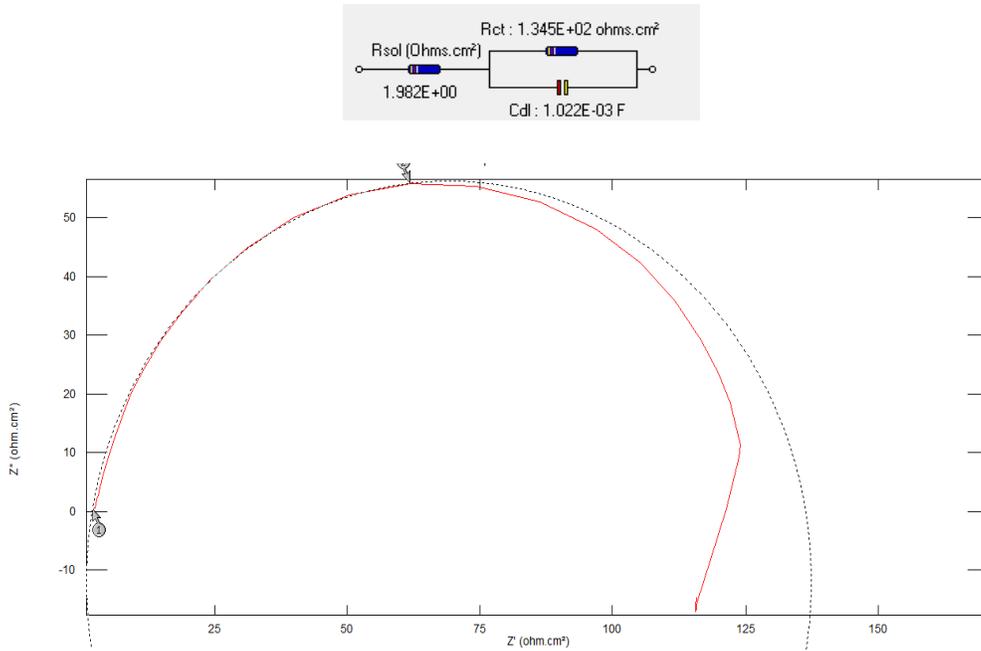


Figura A2.2. Diagrama de Nyquist del *Áloe Vera* a 100 rpm.

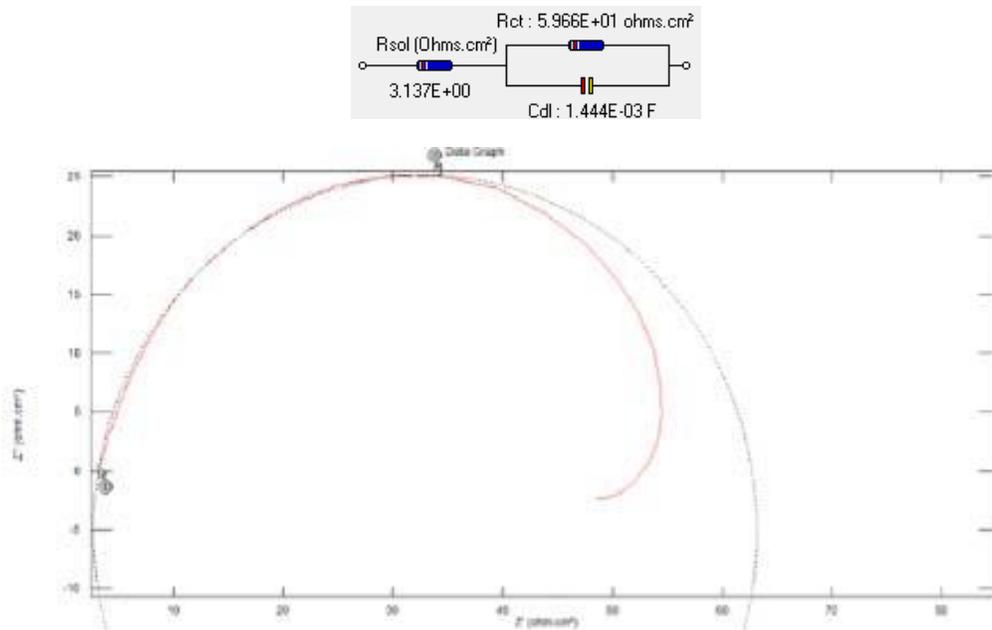


Figura A2.2. Diagrama de Nyquist del Aloe Vera a 500 rpm.

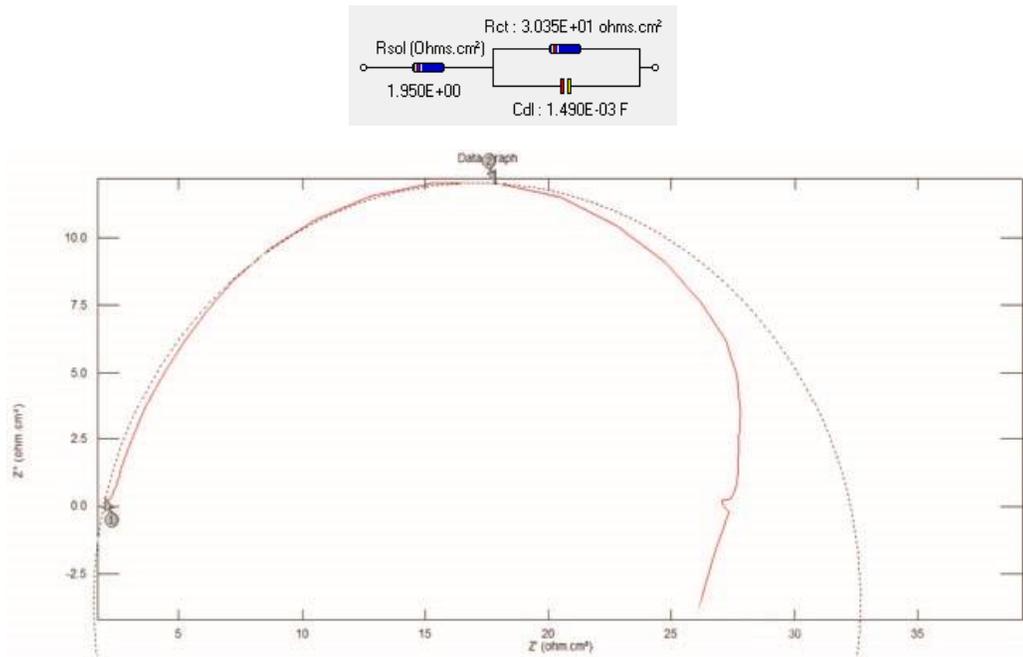


Figura A2.2. Diagrama de Nyquist del Aloe Vera a 1000 rpm.

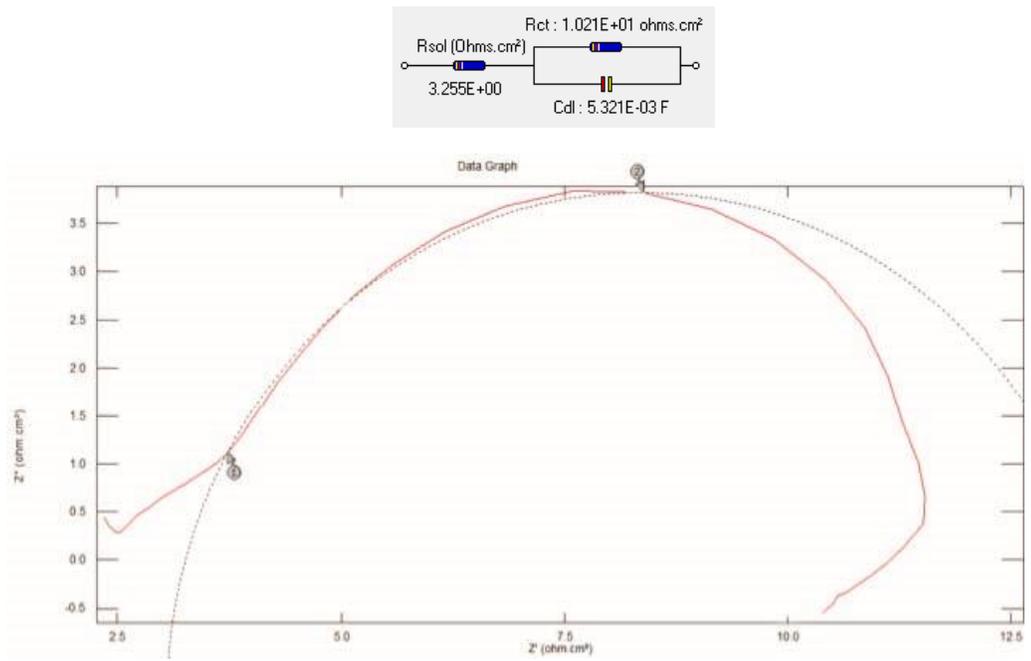


Figura A2.2. Diagrama de Nyquist del Aloe Vera a 3000 rpm.

