



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

EVALUACION DE UN INHIBIDOR DE CORROSION MEDIANTE TECNICAS ELECTROQUIMICAS (POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO, RESISTENCIA A LA POLARIZACION Y CURVAS DE POLARIZACION)

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERA QUIMICA METALURGICA

P R E S E N T A ,

VIRGEN JIMENEZ BLONDIE IXCHEL



MEXICO, D. F.



EXAMENES PROFESIONALES FACULTAD DE QUIMICA

2005

m. 347119



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. JUAN GENESCA LLONGUERAS
Vocal	Dr. FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ
Secretario	I. Q. M. CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
1er. Suplente	M. en C. MARCO ANTONIO TALAVERA ROSALES
2do. Suplente	I. Q. M. EDGAR ONOFRE BUSTAMANTE

Sitio donde se realizó el tema:

Facultad de Química, Edificio "D"  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
U.N.A.M.

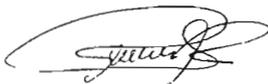
Asesor del Tema:



---

I. Q. M. CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

Supervisor Técnico:



---

I. Q. M. CARLOS RODRÍGUEZ RIVERA

Sustentante:

VIRGEN JIMÉNEZ  
BLONDIE IXCHEL

---

BLONDIE IXCHEL VIRGEN JIMÉNEZ

## AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la mejor formación profesional que alguien puede tener.*

*A mi Jurado:*

*Al Dr. Juan Genescá Llongueras, el Dr. Francisco Javier Rodríguez Gómez y el I. Q. M. Carlos Rodríguez Rivera.*

*Gracias por su tiempo, comprensión y apoyo que me otorgaron, para poder llevar a cabo éste trabajo.*

*A mi Asesor:*

*Al I. Q. M. Carlos Alberto González Rodríguez, sobre todo por tu amistad, por tu disposición, por tus consejos, por tu tiempo, por tu comprensión, por escucharme, por entenderme, por creer en mí, infinitamente Gracias.*

## DEDICATORIAS

*A mi mamá, Antonia Jiménez Ordaz:*

*Por ser la persona más importante en mi vida y en mi corazón, que sin importar nada siempre me ha dado lo mejor.*

*Gracias por ser tan inteligente, fuerte, trabajadora por tu familia, pero sobre todo gracias por ser el mejor ejemplo.*

*Te quiero mucho*

*A mi hermana, Brenda Michell Virgen Jiménez:*

*A quien admiro por su fortaleza, tenacidad y coraje.*

*Por su apoyo incondicional, por su compañía, por sus deseos de salir adelante y ser la mejor.*

*Recuerda siempre que te quiero.*

*A mi papá, Abel Virgen Zurita:*

*Que a pesar de todo, tiene un lugar en mi corazón, tiene mi respeto, cariño y agradecimiento.*

*A mis Tíos:*

*Que me han dado siempre todo su apoyo y se preocupan por mi bienestar, especialmente gracias Tía Clemen.*

*A Laura y Andrea:*

*Por enseñarme, qué es la verdadera amistad.*

*A Norma, Lorena y Esmeralda:*

*Por su amistad incondicional, por su apoyo, compañía, por sus consejos, sus regaños, por escucharme, y por que son las mejores personas de las que alguien puede estar rodeado.*

*A Carlos F. y Pancho:*

*Gracias por su amistad*

*A Ángeles, Ulises y Antonio:*

*Gracias por su amistad, compañía y por las buenas experiencias que compartimos.*

*A Bernardo:*

*Porque fuiste, eres y serás alguien importante en mi vida,*

*Gracias por tu compañía.....*

---

<b>ÍNDICE</b>	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b>	2
<b>OBJETIVO</b>	4
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	6
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 COSTOS DE LA CORROSIÓN	8
2.2 INGENIERÍA DE LA CORROSIÓN	8
2.3 DEFINICIÓN DE CORROSIÓN	8
2.4 MECANISMO DE LA CORROSIÓN	9
2.5 CORROSIÓN EN TUBERÍAS	9
2.5.1 Causas de la corrosión interna	10
2.5.2 Métodos de control	10
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>ANTECEDENTES</b>	
3.1 INHIBIDORES DE CORROSIÓN	13
3.2 DEFINICIÓN DE INHIBIDOR DE CORROSIÓN	13
3.3 CLASIFICACIÓN DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN	14
3.3.1 Inhibidores de adsorción	14
3.3.2 Pasivadores	15
3.3.3 Inhibidores en fase vapor	15
3.4 TÉCNICAS DE EVALUACIÓN DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN	16
3.4.1 Técnicas Electroquímicas	16
3.4.2 Otras Técnicas de Evaluación	22

---

3.5 FACTORES AMBIENTALES	23
3.5.1 Efecto De La Temperatura	23
3.5.2 Efecto Del Oxígeno	23
3.5.3 Efecto de la Concentración	24
3.5.4 Efecto del pH	24
3.6 TÉCNICAS DE INYECCIÓN	25
3.6.1 Inyección Continua	25
3.6.2 Tratamiento por Lote	25
3.6.3 Tratamiento Squeeze	25
3.6.4 Capas	25
3.7 EFICIENCIA DEL INHIBIDOR	26
3.8 APLICACIONES	26
3.9 TOXICIDAD	27

---

## CAPÍTULO IV

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

---

4.1 ANÁLISIS METALGRÁFICO Y QUÍMICO DEL ACERO	30
4.2 PREPARACIÓN DE PROBETAS	30
4.3 PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN DE EXPOSICIÓN	31
4.4 PREPARACIÓN DE INHIBIDOR	32
4.5 ELIMINACIÓN DE OXÍGENO	33
4.5.1 Eliminación mecánica con Nitrógeno	33
4.5.2 Eliminación química con Sulfito de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )	34
4.6 METODOLOGÍA DE LA PARTE ELECTROQUÍMICA	35
4.6.1 Matriz Experimental	35
4.6.2 Preparación del dispositivo para el control de la temperatura	36
4.6.3 Evaluación del sistema, mediante las Técnicas Electroquímicas	37
@ Potencial a Circuito Abierto	37
@ Resistencia a la Polarización	37
@ Curvas de Polarización	38

---

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

---

5.1. Análisis Metalográfico y Químico del acero APIX- 52	40
5.2. Estabilización de Potencial	41
5.2.1. Tabla y Gráficas de Estabilización de Potencial para un acero APIX-52 en agua de mar sintética aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	41
5.2.2. Tabla y Gráficas de Estabilización de Potencial para un acero APIX-52 en agua de mar sintética deaireada con Nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	43
5.2.3. Tabla y Gráficas de Estabilización de Potencial para un acero APIX-52, en agua de mar sintética con Secuestrante de Oxígeno (Sulfito de Sodio) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	45
5.3. Resistencia a la Polarización (Rp)	47
5.3.1. Resultados y Gráficas de Resistencia a la Polarización para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	49
5.3.2. Resultados y Gráficas de Resistencia a la Polarización para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, deaireada con Nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	50
5.3.3. Resultados y Gráficas de Resistencia a la Polarización para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, con Secuestrante de Oxígeno (Sulfito de Sodio) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	51
5.4. Curvas de Polarización	52
5.4.1. Gráficas de Curvas de Polarización para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, aireada, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	53
5.4.2. Gráficas de Curvas de Polarización para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, deaireada con Nitrógeno, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	55
5.4.3. Gráficas de Curvas de Polarización para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, con Secuestrante de Oxígeno (Sulfito de Sodio), a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	57

5.4.4. Resultados y Gráficas de $t_{corr}$ para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas de estudio y concentraciones de inhibidor	59
5.4.5. Resultados y Gráficas de $t_{corr}$ para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, deaireada con Nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	60
5.4.6. Resultados y Gráficas de $t_{corr}$ para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, con Secuestrante de Oxígeno (Sulfito de Sodio) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	61

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISI METALOGRÁFICO Y QUÍMICO DEL ACERO APIX-52 USADO COMO ELECTRODO DE TRABAJO	63
6.2 REGISTRO DEL POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO DE LOS SISTEMAS EN ESTUDIO	63
6.2.1 Estabilización de Potencial a circuito abierto del acero APIX-52 en agua de mar sintética en presencia y ausencia de oxígeno a diferentes temperaturas y diferentes concentraciones de inhibidor de corrosión	64
6.3 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN DEL ACERO APIX-52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA EN PRESENCIA DE OXÍGENO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y CONCENTRACIONES DE INHIBIDOR	66
6.3.1 Tablas y Gráficas de Velocidades de Corrosión obtenidas mediante $R_p$ , para un acero APIX-52, en agua de mar sintética con y sin oxígeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	66
6.4 CURVAS DE POLARIZACIÓN DE UN ACERO APIX-52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA CON Y SIN OXÍGENO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y CONCENTRACIONES DE INHIBIDOR	70
6.4.1 Tablas y Gráficas de Velocidades de Corrosión obtenidas por Extrapolación de Tafel, de un acero APIX-52, en agua de mar sintética con y sin oxígeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor	71
6.5 EVALUACIÓN DE UN INHIBIDOR	75
6.6 EFECTO DE LA TEMPERATURA	76

6.7 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN	76
--------------------------------	----

6.8 EFECTO DEL OXÍGENO	77
------------------------	----

---

## CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES	79
--------------	----

---

## CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA	81
--------------	----

---

---

## RELACIÓN DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Arreglo de la instrumentación para los experimentos de polarización electroquímicos.	16
<b>Figura 2.</b> Típica celda de polarización electroquímica que ilustra la ubicación del electrodo auxiliar y de trabajo, y los elementos asociados a la celda.	17
<b>Figura 3.</b> Esquema de la curva de polarización de activación mostrando los procesos pertinentes para la interfase metal/solución bajo las condiciones de FEM impresionadas.	18
<b>Figura 4.</b> Relación corriente-potencial anódica y catódica en un sistema corroyéndose.	20
<b>Figura 5.</b> Inhibición: (superior) inhibición catódica; (inferior) inhibición anódica.	21
<b>Figura 6.</b> Inhibición, ambas anódica y catódica.	22
<b>Figura 7.</b> Diagrama de flujo del desarrollo experimental a seguir en el estudio del inhibidor AT-3026.	29
<b>Figura 8.</b> Probetas utilizadas en las pruebas electroquímicas.	31
<b>Figura 9.</b> Celda electroquímica con dispersor para la eliminación del oxígeno con nitrógeno.	34
<b>Figura 10.</b> Celda electroquímica con sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), para la eliminación del oxígeno, disuelto con la ayuda de un agitador magnético.	35
<b>Figura 11.</b> Dispositivo para el control de la temperatura.	36

**Figura 12.** Microestructura del acero APIX-52 vista a 1000X mediante el MEB, atacando con nital 5 durante 8 seg. \_\_\_\_\_ 40

---

## RELACIÓN DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Cantidades en g/L, que se necesitan para preparar 1 L de agua de mar sintética. _____	31
<b>Tabla 2.</b> Alicuotas de inhibidor a 10000 ppm, que se deben tomar, para tener las diferentes concentraciones de estudio. _____	33
<b>Tabla 3.</b> Matriz experimental para la evaluación del inhibidor AT-3026, mediante técnicas electroquímicas (OCP, Resistencia a la polarización y Curvas de polarización). _____	35
<b>Tabla 4.</b> Composición química del acero APIX-52 mediante la técnica de espectrofotometría de emisión. _____	40
<b>Tabla 5.</b> Tabla de estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. _____	41
<b>Tabla 6.</b> Estabilización de potencial para un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. _____	43
<b>Tabla 7.</b> Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. _____	45
<b>Tabla 8.</b> Valores de resistencia a la polarización [ $\Omega\cdot\text{cm}^2$ ] de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. _____	49
<b>Tabla 9.</b> Valores de resistencia a la polarización [ $\Omega\cdot\text{cm}^2$ ] de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. _____	50
<b>Tabla 10.</b> Valores de resistencia a la polarización [ $\Omega\cdot\text{cm}^2$ ] de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a diferentes temperaturas y concentraciones inhibidor. _____	51

<b>Tabla 11.</b> Resultados de $i_{corr}$ [mA/cm <sup>2</sup> ] de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	59
<b>Tabla 12.</b> Resultados de $i_{corr}$ [mA/cm <sup>2</sup> ] de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	60
<b>Tabla 13.</b> Resultados de $i_{corr}$ [mA/cm <sup>2</sup> ] de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno (Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	61
<b>Tabla 14.</b> Resultados de velocidades de corrosión [mpy], obtenidas mediante Rp de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	67
<b>Tabla 15.</b> Resultados de velocidades de corrosión [mpy], obtenidas mediante Rp de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	68
<b>Tabla 16.</b> Resultados de velocidades de corrosión [mpy], obtenidas mediante Rp de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con sulfito de sodio (Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	69
<b>Tabla 17.</b> Resultados de velocidades de corrosión [mpy], obtenidas por extrapolación de Tafel de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	71
<b>Tabla 18.</b> Resultados de velocidades de corrosión [mpy], obtenidas por extrapolación de Tafel de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	72
<b>Tabla 19.</b> Resultados de velocidades de corrosión [mpy], obtenidas por extrapolación de Tafel de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno (Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	73

## RELACIÓN DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a temperatura ambiente, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	42
---	----

<b>Gráfica 2.</b> Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a 30 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	42
<b>Gráfica 3.</b> Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a 40 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	43
<b>Gráfica 4.</b> Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a temperatura ambiente, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	44
<b>Gráfica 5.</b> Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a 30 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	44
<b>Gráfica 6.</b> Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a 40 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	45
<b>Gráfica 7.</b> Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a temperatura ambiente, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	46
<b>Gráfica 8.</b> Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a 30 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	46
<b>Gráfica 9.</b> Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a 40 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	47
<b>Gráfica 10.</b> Resistencia a la polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada, a las diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	50
<b>Gráfica 11.</b> Resistencia a la polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno, a las diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	51
<b>Gráfica 12.</b> Resistencia a la polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), a las diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	52

<b>Gráfica 13.</b> Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a temperatura ambiente, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	53
<b>Gráfica 14.</b> Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a 30 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	54
<b>Gráfica 15.</b> Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a 40 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	54
<b>Gráfica 16.</b> Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a temperatura ambiente, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	55
<b>Gráfica 17.</b> Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a 30 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	55
<b>Gráfica 18.</b> Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a 40 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	56
<b>Gráfica 19.</b> Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a temperatura ambiente, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	57
<b>Gráfica 20.</b> Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a 30 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	57
<b>Gráfica 21.</b> Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a 40 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.	58
<b>Gráfica 22.</b> $i_{\text{corr}}$ obtenidas por extrapolación de Tafel, de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	59
<b>Gráfica 23.</b> $i_{\text{corr}}$ obtenidas por extrapolación de Tafel, de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.	60

- Gráfica 24.**  $i_{\text{corr}}$  obtenidas por extrapolación de Tafel, de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. \_\_\_\_\_ 61
- Gráfica 25.**  $V_{\text{corr}}$  obtenidas mediante  $R_p$ , de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. \_\_\_\_\_ 67
- Gráfica 26.**  $V_{\text{corr}}$  obtenidas mediante  $R_p$ , de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. \_\_\_\_\_ 68
- Gráfica 27.**  $V_{\text{corr}}$  obtenidas mediante  $R_p$ , de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. \_\_\_\_\_ 69
- Gráfica 28.**  $V_{\text{corr}}$  obtenidas mediante extrapolación de Tafel, de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. \_\_\_\_\_ 72
- Gráfica 29.**  $V_{\text{corr}}$  obtenidas mediante extrapolación de Tafel, de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. \_\_\_\_\_ 73
- Gráfica 30.**  $V_{\text{corr}}$  obtenidas mediante extrapolación de Tafel, de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. \_\_\_\_\_ 74

---

**RESUMEN**

---

El presente trabajo de tesis evaluó el inhibidor comercial de corrosión AT-3026 mediante las técnicas electroquímicas de potencial a circuito abierto, resistencia a la polarización y curvas de polarización, utilizando como electrodo de trabajo acero APIX-52, ya que las tuberías que se utilizan en la industria petrolera en nuestro país regularmente son de este acero, y regularmente se usa en ambientes marinos, por lo cual se utilizó agua de mar sintética (ASTM D1141-98) para la evaluación.

Se realizaron pruebas en presencia y ausencia de oxígeno, a 3 diferentes temperaturas y 5 concentraciones de inhibidor de corrosión, con el fin de conocer el efecto de estas variables sobre el sistema. Para eliminar el oxígeno presente en el agua de mar, se realizó de dos maneras, la primera es remover en forma mecánica al oxígeno burbujeando Nitrógeno en el medio el cual desplaza al  $O_2$ , y la segunda es la de secuestrar al oxígeno mediante la reacción química de este gas con Sulfito de Sodio ( $Na_2SO_3$ ). De acuerdo a los resultados obtenidos mediante ésta, se encontró que el exceso en la concentración calculada para secuestrar el oxígeno en la solución, contamina el electrodo de referencia (Electrodo de Calomelanos) obteniendo datos inconsistentes, por lo que es una consideración que debe tomarse en cuenta de agregar la cantidad correcta de sulfito de sodio. Ahora bien, con los resultados obtenidos de resistencia a la polarización y curvas de polarización se observa que el oxígeno tiene un efecto corrosivo en el sistema, aún en presencia de inhibidor de corrosión, y al elimina éste, la velocidad de corrosión disminuye. El efecto de la temperatura y de la concentración del inhibidor, presenta modificaciones importantes en el comportamiento electroquímico, pero no una tendencia al incremento o disminución de estas variables, por lo que no es recomendable el uso de este inhibidor en las condiciones ambientales propuestas.

## **OBJETIVO**

---

- Evaluar mediante técnicas electroquímicas un inhibidor de corrosión del tipo filmico en agua de mar sintética, en presencia y ausencia de oxígeno, a diferentes temperaturas.
  - Determinar el mecanismo del inhibidor mediante técnicas electroquímicas (Potencial a circuito abierto, resistencia a la polarización, y curvas de polarización) .
  - Determinar el efecto de la concentración del inhibidor en la velocidad de corrosión.
  - Determinar el efecto del oxígeno sobre la eficiencia del inhibidor.
  - Determinar el efecto de la temperatura en la eficiencia del inhibidor.

**CAPÍTULO I.-**  
**INTRODUCCIÓN**

---

## INTRODUCCIÓN

---

La producción y distribución del petróleo representa una de las principales actividades de la economía del país. Esta distribución se lleva a cabo por medio de sistemas de ductos, los cuales representan hasta ahora la forma más versátil de transmisión, ya que pueden transportar hidrocarburos en forma masiva y cubrir grandes distancias. En México existen más de 55 000 kilómetros de ductos, lo cual es un ejemplo de su gran importancia y versatilidad. Sin embargo, debido a las grandes distancias que cubren, obliga a que dichos sistemas estén sometidos desde su construcción a condiciones agresivas del producto que transportan, así como a condiciones ambientales, de operación y factores externos, que causan que se deterioren con el tiempo. Este deterioro puede causar que el sistema falle en una determinada zona, o punto de la línea, ocasionando grandes pérdidas económicas y en el peor de los casos, pérdidas humanas y daño severo al medio ambiente.

La corrosión es una de las principales causas que originan fallas en una determinada sección de los ductos que transportan fluidos. En México, la falla por corrosión representa el 33% de pérdidas económicas y aproximadamente, el 40 % de los sistemas de ductos de cada país tienen más de 20 años de operación, y a pesar del constante mantenimiento, ocurren problemas provocados por la corrosión.

La industria petrolera, al igual que la del aceite, producción de gas, la industria química, tratamiento de aguas y la industria de aditivos, usan inhibidores de corrosión para evitar problemas por la corrosión. El consumo total de inhibidores de corrosión en los Estados Unidos ha doblado aproximadamente de 600 millones de dólares en 1982 a casi 1.1 mil millones de dólares en 1998.<sup>Ref. 1</sup>

Uno de los métodos más importantes para reducir al mínimo la corrosión es el uso de los inhibidores de corrosión, ya que al agregarlo en concentraciones pequeñas a un ambiente, eficazmente reduce la corrosión de un metal expuesto a ese ambiente, pero si se utiliza el inhibidor en concentraciones altas, o en condiciones no favorables para éste, puede acelerar el proceso de corrosión, por lo tanto se debe hacer una evaluación previa que indique la eficiencia de éste. Una ventaja particular de los inhibidores de corrosión es que puede llevarse a cabo in situ, o se puede retirar o cambiar sin romper un proceso.

**CAPÍTULO II.-**  
**MARCO TEÓRICO**

## **MARCO TEÓRICO**

---

### **2.1 COSTOS DE LA CORROSIÓN**

El costo anual de corrosión y de protección contra la corrosión en los Estados Unidos se estima en 276 billones de dólares por año.<sup>Ref. 1</sup> Este costo no nos debería sorprender si tomamos en cuenta que la corrosión se da donde se utilicen metales y otros materiales.

La corrosión es inevitable, está en todas partes, por ejemplo, los automóviles, las tuberías subterráneas, los aparatos electrodomésticos, en el mar, hasta en los vehículos aeroespaciales, lo cierto es que si todo esto no requiriera ningún cuidado contra la corrosión, nuestra economía cambiaría drásticamente si no hubiera ésta.

Aparte de los costos para su prevención, la corrosión es un problema serio porque contribuye definitivamente al agotamiento de nuestros recursos naturales, un ejemplo, es el acero que se obtiene del mineral de hierro.

### **2.2 INGENIERÍA DE LA CORROSIÓN**

La ingeniería de la corrosión es el uso de la ciencia y del arte para prevenir o controlar el daño de la corrosión de una forma segura y económicamente, para esto se debe tener el dominio de las prácticas y los principios de la corrosión; las características químicas, metalúrgicas, físicas; pruebas de corrosión, etc. El Ingeniero debe solucionar los problemas de corrosión seleccionando métodos que maximicen beneficios.

### **2.3 DEFINICIÓN DE CORROSIÓN**

La palabra corrosión se deriva del latín “corrosus”, significa corroer algo. La corrosión se puede definir más a fondo como la destrucción gradual ya sea de un material, de una sustancia, o de una entidad, generalmente por la interacción con una solución u otros medios atribuidos a un proceso químico.

## 2.4 MECANISMO DE LA CORROSIÓN

Para que la corrosión ocurra se debe tener los siguientes elementos: , (1) un electrolito, (2) un área o una región en una superficie metálica con una carga negativa en lo referente a una segunda área (ánodo), y (3) la segunda área con una carga positiva (cátodo).

Cuando el oxígeno libre disuelto en agua se deairea, el agua es prácticamente es menos corrosiva, a menos que llegue a ser ácida o que algunas bacterias anaerobias inciten la corrosión. Si el agua libre de oxígeno es levemente alcalina, será prácticamente anticorrosivo al acero.

## 2.5 CORROSIÓN EN TUBERÍAS

La primera *tubería que llevaba productos de petróleo refinados* empezó a funcionar en 1893, pero la industria realmente comenzó en 1929 con Tuscarora Pipe Line Company, Ltd.<sup>Ref. 2</sup>

Antes de 1934, el problema de la corrosión interna fue reconocido como factor serio en causar aspereza de la superficie interna y la reducción de la capacidad de estas tuberías. Una reunión informal para discutir la corrosión interna fue celebrada por los operadores de las tuberías en St. Louis en el verano de 1935.<sup>Ref. 2</sup>

La investigación y los programas desarrollados fueron comenzados para controlar la corrosión interna. Atlantic Refining Company comenzaron a inyectar experimentalmente una solución de agua con cromato de sodio en el sistema de Keystone-Buffalo como inhibidor de corrosión en 1935; la compañía petrolera Socony Vacuum construyó su primer deshidratador en 1936; Phillips Petroleum Company divulgó el uso de un inhibidor soluble en aceite, mercaptobenzothiazole, en 1939.<sup>Ref. 2</sup>

API (American Petroleum Institute) organizó un subcomité de corrosión interna de las líneas de tubería de los productos en mayo de 1941.<sup>Ref. 2</sup>

Una encuesta de las prácticas de la industria que se hizo en 1946 que cubría dieciocho compañías que funcionaban demostraron que dos tuberías utilizaban el mercaptobenzothiazole, cuatro utilizaban el cromato de sodio, seis utilizaban el nitrito de sodio y siete no utilizaba ningún inhibidor. Un operador divulgó que el sulfito de sodio había sido demandado como limpiador de oxígeno a partir de 1936 a 1941 y entonces un inhibidor fue aplicado.<sup>Ref. 2</sup>

### **2.5.1 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 y oxígeno está disponible en el aire disuelto en el producto.

La solubilidad del aire en productos varía, el aire es introducido en los productos por los mezcladores del tanque, la turbulencia, el tanque normal que respira, etc.

### **2.5.2 Métodos de control**

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 es una manera eficaz de controlar la corrosión interna de una tubería de los productos.

Hay una variedad amplia de experiencias con la corrosión en las *tuberías que llevan el petróleo crudo*.<sup>Ref. 3</sup> 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 aparecen 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 coloca, blindo la tubería y las picaduras tienden a ocurrir debajo del sedimento. Cuando el petróleo crudo es amargo, el sedimento contiene sulfuro de hierro. Esto agrava la corrosión porque, además del efecto de blindaje, el sulfuro de hierro es fuertemente catódico al acero. Así, el sulfuro de hierro y el acero producen un tipo de batería cuya acción destruye el acero con una velocidad rápida.

**CAPÍTULO III.-**  
**ANTECEDENTES**

---

## ANTECEDENTES

---

### 3.1 INHIBIDORES DE CORROSIÓN

No hay manera de determinar exactamente cuando la inhibición comenzó a ser considerada como tecnología separada.

Se ha observado por muchos años que en el interior de las tuberías se forma una capa calcárea que llevan ciertas aguas naturales son protectoras de las tuberías, y es práctica común para los operadores de abastecimiento de agua, ajustar el contenido mineral del agua, para que esta capa beneficiosa se deposite en el interior de las tuberías y las proteja, estas ventajas se pasan por alto a menudo, otro ejemplo es cuando se necesita tratar el agua de plantas de desalación con calcio para proteger la tubería, y el tratamiento de cal es una práctica bien conocida desde hace 65 años.<sup>Ref. 4</sup>

H. E. Waldrip en un artículo de corrosión de 1948 se refirió a un informe de 1943, en su discusión de la inhibición de pozos de petróleo.<sup>Ref. 4</sup>

Los tratamientos usando hexametáfosfatos en agua, inhibidores en tuberías, en sistemas ácidos y en otras partes, eran prácticas establecidas antes de que NACE (National Association of Corrosion Engineers) fuera fundado en 1945. En un periodo de diez años de 1945-54, se tienen referencias de inhibidores en aviones, en el equipo de proceso de aluminio, calderas, motores diesel, sistemas de enfriamiento de agua, refinerías de petróleo, y otros numerosos.

### 3.2 DEFINICIÓN DE INHIBIDOR DE CORROSIÓN

Un inhibidor es una sustancia química que retarda o retrasa una reacción química. Por lo tanto un inhibidor de corrosión es una sustancia que, cuando está agregada en concentraciones pequeñas a un ambiente, disminuye con eficacia la reacción del metal con el ambiente.<sup>Ref. 5</sup>

### 3.3 CLASIFICACIÓN DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN

El uso de los inhibidores de corrosión va en aumento por ser uno de los primeros métodos para combatir la corrosión. Para utilizarlos con eficacia el Ingeniero, primero debe identificar los problemas de corrosión que se pueden solucionar con inhibidores. En segundo lugar, debe considerar el factor económico, tomando en cuenta si la pérdida debido a la corrosión excede el costo del mantenimiento y operación del sistema de inyección del inhibidor. Tercero, la compatibilidad de los inhibidores con el proceso se debe considerar para evitar efectos nocivos tales como hacer espuma, disminución de la actividad catalítica, degradación de otro material, pérdida de traspaso químico y finalmente, el inhibidor se debe aplicar bajo condiciones que produzcan efecto máximo.<sup>Ref. 5</sup>

Existen varias maneras de clasificar a los inhibidores de corrosión, por ejemplo, los dividen en anódicos, catódicos y mixtos, es decir, en función de la o las reacciones que inhiben preferencialmente,<sup>Ref. 6</sup> de acuerdo a su naturaleza química, es decir orgánicos e inorgánicos, en base a su mecanismo de acción como pasivadores e inhibidores de adsorción y de acuerdo a su uso como los inhibidores en fase vapor.<sup>Ref. 7</sup>

#### 3.3.1 Inhibidores de adsorción

Este tipo de compuestos dependen para su acción de la afinidad que tienen por la superficie metálica. El tipo de afinidad puede ser de carácter eléctrico. Es decir, si la superficie metálica está cargada negativamente y el inhibidor tiene una carga positiva puede esperarse una atracción física o electrostática. Otro tipo de atracción es la química por medio de la cual un compuesto toma una posición en la superficie al formar un enlace de tipo químico con uno o varios átomos en la superficie.

La investigación se ha enfocado a tratar de explicar el porqué de la adsorción de compuestos orgánicos da lugar a la protección del material. A este respecto se han propuesto dos modos de inhibición. El primero se refiere al hecho de que el adsorbato (en compuesto adsorbido) por tomar una posición en la superficie bloquea o aísla al metal del medio agresivo. Otra corriente de estudio ha mostrado que los inhibidores protegen al metal en base a argumentos eléctricos, ya que al tomar una posición junto al metal alteran la doble capa y

con ello la velocidad de corrosión. Es comúnmente aceptado que un inhibidor es capaz de actuar por la contribución de los dos argumentos arriba mencionados: el bloqueo físico de la superficie y la alteración de la doble capa.<sup>Ref. 6</sup>

### 3.3.2 Pasivadores

Éstos inhibidores son producto de la oxidación de sustancias, tales como cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) y nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), o sustancias tales como  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  o  $\text{NaBrO}_7$ . Estos materiales favorecen la adsorción en la superficie del metal del oxígeno disuelto. Los inhibidores pasivantes se utilizan y son extensamente los más eficaces de todos los inhibidores. Los cromatos son los inhibidores menos costosos para los sistemas de agua y se utilizan extensamente en los sistemas de enfriamiento de agua que recirculan de los motores de combustión interna, de los rectificadores, y de las torres de enfriamiento. Aunque éstos son los inhibidores más eficaces, deben ser utilizados con precaución porque son tóxicos y pueden causar una erupción en contacto prolongado con la piel. Si los inhibidores pasivantes no se utilizan en suficientes cantidades (concentraciones por debajo de límites mínimos) aceleran la corrosión y puede causar picaduras.<sup>Ref. 7</sup>

### 3.3.3 Inhibidores en fase vapor

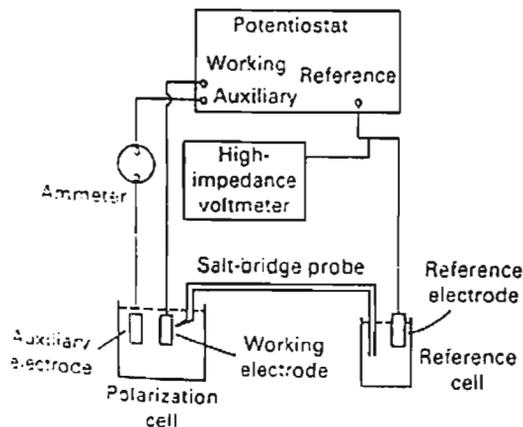
En los últimos años se ha generalizado el empleo de estos inhibidores. Son productos de muy alta presión de vapor que se incluyen en los recipientes o cajas de embalaje del material que se quiere proteger. Su uso se limita casi exclusivamente a materiales ferrosos. Su acción puede ser debida a la liberación de aniones inhibidores al ser absorbidos por las películas superficiales húmedas. De esta manera producen una inhibición local en zonas que de otro modo serían corroídas. Los productos liberados serían benzoatos, carbonatos o nitritos.<sup>Ref. 8</sup>

### 3.4 TÉCNICAS DE EVALUACIÓN DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

#### 3.4.1 Técnicas Electroquímicas

Cuando se empezaron a utilizar las técnicas electroquímicas, eran muy atractivas porque ofrecían un método directo de acelerar un proceso de corrosión, agregando un oxidante fuerte o aumentando temperaturas. Sin embargo, los avances recientes han hecho de la técnica más que una herramienta para la evaluación de fenómenos de corrosión y de las velocidades de reacción, sino una posibilidad de llevar a cabo la prueba en campo como en el laboratorio. Así, las técnicas electroquímicas se pueden utilizar para medir velocidades de corrosión “in situ”. Esta capacidad ofrece ventajas distintas sobre pérdida de peso y métodos de prueba visuales.<sup>Ref. 9</sup>

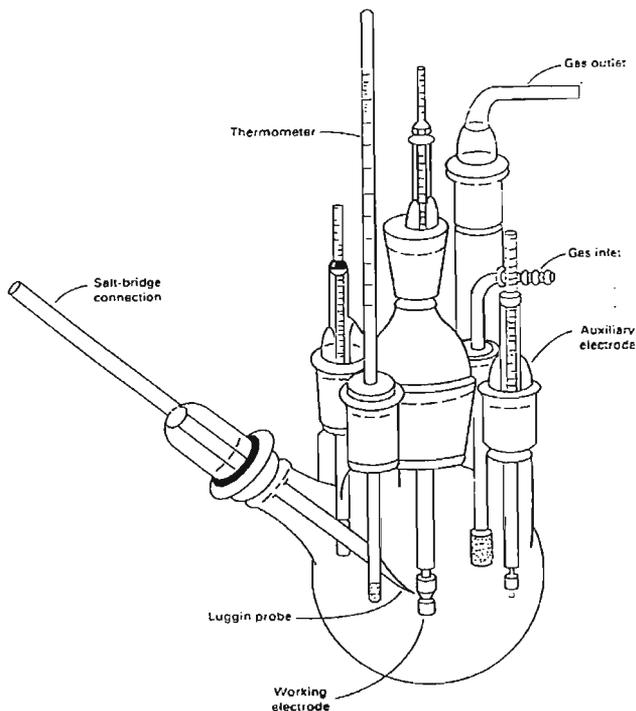
Una comprensión de los Curvas de Polarización es útil en el estudio de inhibidores.<sup>Ref.</sup>  
<sup>10</sup> La polarización electroquímica se logra con una fuente de alimentación conocida como potencióstato. Un electrodo auxiliar provee la corriente al electrodo de trabajo (especimen de prueba) para polarizarlo.



**Figura 1.** Arreglo de la instrumentación para los experimentos de polarización electroquímicos.

La Figura 1 ilustra esquemáticamente un arreglo experimental típico. Se diseña el sistema de modo que solamente una corriente extremadamente pequeña pueda pasar entre el electrodo de referencia y el electrodo de trabajo, y el necesario para polarizar el electrodo de trabajo se provee del electrodo auxiliar. El potenciostato contiene un amplificador operacional para proporcionar la regeneración de la corriente necesaria para mantener el potencial fijo entre el electrodo de trabajo y el de referencia.

La Figura 2 ilustra una celda electroquímica.<sup>Ref. 9</sup>



**Figura 2.** Típica celda de polarización electroquímica que ilustra la ubicación del electrodo auxiliar y de trabajo, y los elementos asociados a la celda.

Los datos de programas de pruebas de laboratorio se pueden graficar para indicar la eficacia relativa con la cual los inhibidores controlan reacciones de corrosión.

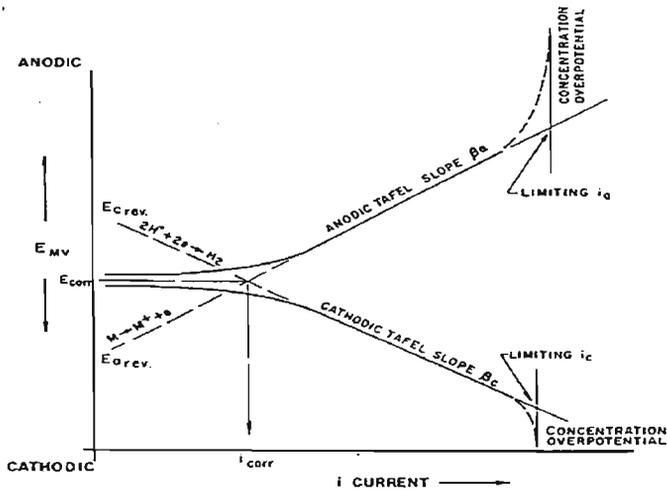
En 1905, Tafel descubrió una relación empírica entre la densidad de corriente y el sobrevoltaje, que se expresa con la siguiente ecuación:

$$\eta = a + b \log(i_p) \quad (1)$$

Donde (a) es una constante empírica y (b) es conocida como pendiente de Tafel. Las derivaciones detalladas de la cinética electroquímica y la polarización de activación se reducen para simplificar y entender la determinación matemática de las pendientes de Tafel de datos experimentales:

$$\frac{d\eta}{d \log i_p} = \beta \quad (2)$$

La pendiente de Tafel ( $\beta$ ) es obtenida trazando el registro de la corriente aplicada,  $i_p$ , contra el sobrepotencial,  $\eta$ . Estas pendientes se pueden medir para la polarización catódica ( $\beta_c$ ) o la polarización anódica ( $\beta_a$ ) (Figura 3).



**Figura 3.** Esquema de la curva de polarización de activación mostrando los procesos pertinentes para la interfase metal/solución bajo las condiciones de EFM impresionadas.

Cuando un electrodo del metal está en equilibrio con el electrolito que lo rodea, las corrientes anódicas ( $i_a$ ) y las corrientes catódicas ( $i_c$ ) son iguales ninguna corriente neta ocurre. Si este equilibrio es alterado por una FEM (Fuerza electromotriz) externa, la

superficie del metal se polariza. El metal se puede polarizar anódicamente (los electrones se retiran del metal y una corriente anódica neta fluiría), o se polariza catódicamente (los electrones se empujan en el metal).

La polarización se asocia a dos procesos: Un flujo neto de la corriente y un cambio neto del potencial del electrodo de equilibrio. Estos fenómenos son la base de la cinética electroquímica de la corrosión. La polarización electroquímica se puede derivar en

1. Polarización por activación,
2. Polarización por concentración, y
3. Polarización óhmica.

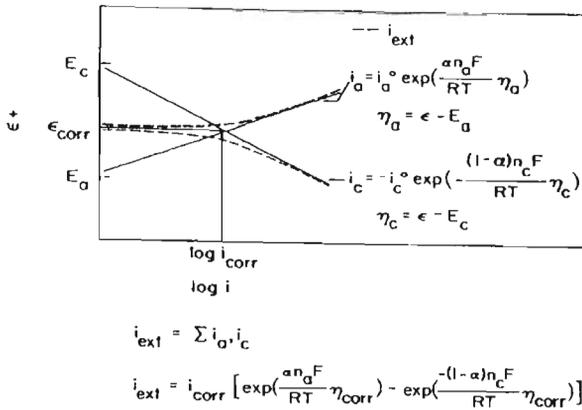
Otros investigadores creen pertinente que la electroquímica del proceso de la corrosión es la resistencia a la Polarización (Rp) (no se debe confundir con la polarización de la resistencia). Esta resistencia se relaciona con la facilidad con la cual un electrón se puede transferir a través de una interfase solución-electrodo.

Stern and Geary publicaron una ecuación que expresa  $\beta_a$ ,  $\beta_c$  y Rp como función pertinente en la determinación de la corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ).

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(Rp)(\beta_a + \beta_c)} \quad (3)$$

Para una interfase metal-solución, las pendientes de Tafel ( $\beta_a$  y  $\beta_c$ ) se pueden asumir como constantes y la corriente de corrosión ser proporcional al recíproco de la Resistencia a la Polarización,  $1/Rp$ .<sup>Ref. 10</sup>

Otra cosa que se puede visualizar en las curvas de polarización son las densidades de corriente anódicas ( $i_a$ ) y catódicas ( $i_c$ ) parciales, expresadas en funciones exponenciales del sobrepotencial ( $\eta_a$ ,  $\eta_c$ ), que es la diferencia entre el potencial de corrosión ( $\epsilon$ ) y el potencial de equilibrio ( $E_a$ ,  $E_c$ ) de la reacción parcial particular. Estas relaciones se demuestran en la Figura 4.



**Figura 4.** Relación corriente-potencial anódica y catódica en un sistema corroyéndose.

Donde:

$i_a$  = Densidad de corriente anódica

$i_c$  = Densidad de corriente catódica

$\eta_a$  = Sobrepotencial anódico

$\eta_c$  = Sobrepotencial catódico

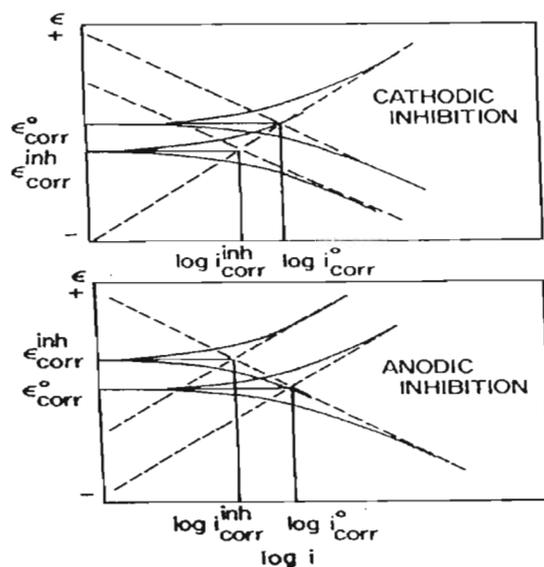
$\alpha$  = Coeficiente de transferencia de carga

$R$  = Constante de los gases

$F$  = Constante de Faraday

$T$  = Temperatura

Uno de los fenómenos más interesantes y quizá el más difícil de entender en la inhibición de la corrosión es que los inhibidores no afectan reacciones anódicas y catódicas al mismo grado. Así uno encuentra, según lo demostrado en la Figura 5, que en algunos casos la velocidad catódica de la reacción se reduce mientras que la velocidad anódica de la reacción sigue siendo igual o viceversa.



**Figura 5.** Inhibición: (superior) inhibición catódica; (inferior) inhibición anódica.

La inhibición catódica da lugar a un cambio de potencial de la corrosión en la dirección anódica o negativa mientras que los resultados de la inhibición anódica dan un cambio de potencial en la dirección catódica o más positiva. Otros sistemas pueden demostrar ambos efectos, es decir, una combinación de la inhibición anódica y catódica (Figura 6). Por lo tanto, mientras que el potencial de corrosión puede dar una indicación preliminar del mecanismo del inhibidor, las curvas de polarización se deben de registrar para un análisis más completo de su modo de acción.<sup>Ref. 11</sup>

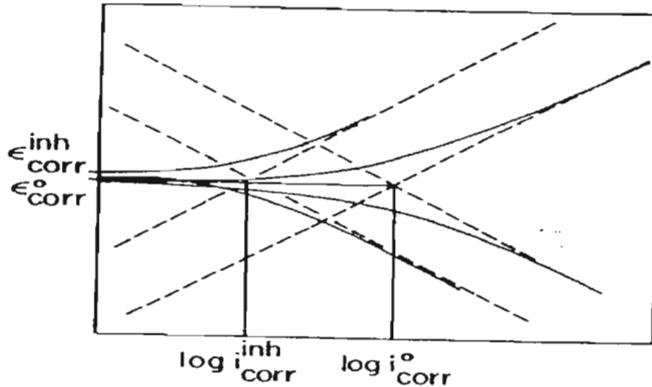


Figura 6. Inhibición, ambas anódica y catódica.

### 3.4.2 Otras Técnicas de Evaluación

Un nuevo método de evaluación del inhibidor mide directamente el espesor de la película en la superficie del metal por una técnica conocida como elipsometría.

Este método es óptico en el cual un cambio en el carácter de un rayo de luz polarizado reflejado de una superficie se utiliza para medir el espesor de la película. Aunque esto puede ser una herramienta interesante para los estudios mecánicos en el laboratorio, no es actualmente útil para la evaluación rápida, en el campo de inhibidores.

Los métodos similares relacionados directamente con las películas superficiales están implicados en las técnicas de la "capacitancia de la doble capa", de la "capacitancia diferenciada" y de la "resonancia magnética nuclear", como en elipsometría, las ventajas son sensibilidad en medidas, pero los requisitos de equipo limitan estas técnicas al uso del laboratorio y sobre todo para los estudios altamente teóricos.

La prueba de la dislocación del ión cobre, es otro método que mide directamente el efecto de la barrera de una película del inhibidor. En esta técnica, los cupones de acero se sumergen en la solución inhibida para desarrollar una película protectora formada bajo condiciones del ambiente. Entonces el cupón se quita y se sumerge en una solución

acidificada de sulfato de cobre. Si la película del inhibidor no es protectora, las placas de cobre salen sobre la superficie del acero y se ven fácilmente. El método tiene algunas desventajas en que la película del inhibidor debe ser resistente a las condiciones ácidas de la solución de la galvanoplastia y que las correlaciones para cada ambiente en particular deben ser comprobadas. Una evaluación del método indica que trabaja bien bajo condiciones fuertes. El método se ha utilizado como prueba de investigación de laboratorio para determinar persistencia del inhibidor.<sup>Ref. 12</sup>

### **3.5 FACTORES AMBIENTALES**

#### **3.5.1 Efecto de la temperatura**

El grado al cual la temperatura afecta la eficiencia del inhibidor se puede determinar a menudo solamente después de las pruebas en el medio corrosivo real que es estudiado.<sup>Ref. 4</sup> Por ejemplo, como la mayoría de las reacciones químicas, la corrosión del hierro y el acero por el oxígeno en soluciones acuosas aumenta con la temperatura.<sup>Ref. 10</sup> En algunos casos, las características de los inhibidores orgánicos se han explorado tan completamente que los límites de la temperatura de funcionamiento máximo para su uso son bien sabidos.<sup>Ref. 4</sup>

Un aumento en la temperatura producirá un aumento en la velocidad de corrosión en la mayoría de los sistemas.<sup>Ref. 10</sup> El factor de la temperatura es siempre importante y es siempre una consideración del diseño.<sup>Ref. 4</sup>

#### **3.5.2 Efecto del oxígeno**

La aireación o la presencia de oxígeno disuelto en un ambiente líquido puede tener influencia profunda en las velocidades de reacción. Por consiguiente, este factor debe considerarse cuidadosamente en un programa de prueba de corrosión. Generalmente, algunos metales y aleaciones se atacan más rápidamente en la presencia de oxígeno mientras que otros pueden demostrar una resistencia a la corrosión mejor.<sup>Ref. 13</sup> La corrosión del acero en agua sobre pH 6.0 es debido a la presencia de oxígeno disuelto que despolariza la reacción catódica y aumenta la corrosión. Agua neutral, con bajo contenido en sal en equilibrio con aire a 21 °C contendrán cerca de 8 ppm de oxígeno disuelto. Solamente 0.1 ppm de oxígeno se requiere para aumentar las velocidades de corrosión seriamente en un sistema dinámico. En sistemas

estáticos, una concentración más alta de oxígeno se requiere para aumentar la velocidad de corrosión seriamente porque la reacción de corrosión pronto agota la fuente del oxígeno.

Los limpiadores o secuestrantes de oxígeno ayudan a inhibir la corrosión previniendo la despolarización catódica causada por el oxígeno. Los limpiadores de oxígeno se agregan al agua, solos o con un inhibidor de corrosión.

Los limpiadores más comunes de oxígeno usados en agua a temperatura ambiente son el sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) y dióxido de sulfuro ( $\text{SO}_2$ ). A temperaturas elevadas, la hidracina se utiliza para quitar el oxígeno.<sup>Ref. 5</sup>

Es absolutamente difícil excluir el oxígeno totalmente de una operación de planta. La prueba mecánica quizá más simple y extensamente usada consiste simplemente en burbujear nitrógeno a través de la solución.<sup>Ref. 13</sup>

### 3.5.3 Efecto de la concentración

Para saber con que concentraciones de inhibidor se debe trabajar no existe un reporte exacto de ello, ya que la mayor parte de los estudios relacionados con la inhibición es experimental, pero se ha encontrado que si se tienen concentraciones que no son las óptimas los inhibidores pueden acelerar la velocidad de corrosión y por lo tanto ser destructivas.

### 3.5.4 Efecto del pH

En estos sistemas juega un papel de gran importancia, ya que caracteriza la actividad de disociación de los productos de corrosión. De tal manera que los cambios de pH en ciertos intervalos de E (potencial) pueden suprimir la corrosión mediante la pasivación del metal o protegiendo catódicamente.

La cinética de reacciones dependen del pH desde el  $\text{H}_3\text{O}^+$  y  $\text{OH}^-$  que participan directamente en la formación de productos.<sup>Ref. 14</sup> De acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\log K = a - bpH$$

donde K es la velocidad de corrosión, la constante b depende de la naturaleza de el metal.

Considerando que el efecto del pH en la corrosión de los metales es complicado por los cambios cinéticos de las reacciones, los inhibidores presentan un rango en el cual su efecto es eficiente y en algunas ocasiones debe de controlarse esté, para asegurar su efectividad.

### **3.6 TÉCNICAS DE INYECCIÓN**

#### **3.6.1 Inyección Continua**

Los inhibidores líquidos se inyectan con una bomba de inyección química. Estas bombas son extremadamente confiables y requieren de poco mantenimiento. La mayoría de las bombas de inyección química se pueden ajustar para entregar a la velocidad deseada de inyección.<sup>Ref. 5</sup>

#### **3.6.2 Tratamiento por Lote**

El ejemplo más familiar del tratamiento por lote es el sistema de enfriamiento del automóvil. Una cantidad de inhibidor se agrega contemporáneamente para proporcionar la protección por un período extendido. El inhibidor adicional se puede agregar periódicamente, o el líquido se puede drenar y substituir por una nueva fuente.<sup>Ref. 5</sup>

#### **3.6.3 Tratamiento “Squeeze”**

Es un método continuo de alimentar un inhibidor, bombeando una cantidad en un pozo de petróleo. Se ha sabido que la protección de este modo dura por un año.<sup>Ref. 5</sup>

#### **3.6.4 Capas**

Los inhibidores se utilizan en las capas expuestas a la atmósfera abierta. Cuando la humedad entra en contacto con la pintura, un poco de inhibidor se lixivia hacia fuera para proteger el metal. Así, el inhibidor debe ser bastante soluble para ser lixiviado hacia fuera en suficientes cantidades para proteger el metal, pero no tan soluble que se perderá rápidamente.<sup>Ref. 5</sup>

### 3.7 EFICIENCIA DEL INHIBIDOR

Los inhibidores de corrosión se comparan generalmente en base a su eficiencia, donde el porcentaje es que tanto baja la velocidad de corrosión en presencia de un inhibidor con respecto a la velocidad de corrosión en ausencia de un inhibidor. La eficiencia del inhibidor se calcula con la fórmula:

$$E = \frac{R_o - R_i}{R_o} * 100 \quad (4)$$

donde:

E = eficiencia del inhibidor

$R_o$  = velocidad de corrosión en ausencia de inhibidor

$R_i$  = velocidad de corrosión en presencia de inhibidor

Una causa frecuente de la ineficiencia del inhibidor es pérdida del inhibidor antes de que tenga ocasión de entrar en contacto con las superficies del metal o de efectuar los cambios deseados en el ambiente. Un inhibidor puede ser perdido por la precipitación, adsorción, por la reacción con un componente del sistema o por su baja solubilidad.<sup>Ref. 5</sup>

### 3.8 APLICACIONES

Las aplicaciones de inhibidores son muy variadas, por ejemplo, los ácidos son ampliamente utilizados en la industria siendo los campos de aplicación más importantes la limpieza industrial, la acidificación de pozos petroleros, la limpieza de superficies metálicas y en numerosos procesos de manufactura. Debido a la gran agresividad de las soluciones ácidas, la utilización de inhibidores es comúnmente encontrada. De este modo, los metales que han de recibir un tratamiento, tal como pintado, galvanizado, electroplateado, recubrimiento de fosfatos, etc., deben tener una superficie libre de sales y óxidos. Para removerlos, la pieza metálica es inmersa en una solución ácida denominada "Baño de decapado". La solución ácida ataca y disuelve el depósito. Una vez removido el depósito, el ácido puede atacar al metal mismo. Para reducir la disolución del metal y el consumo del

ácido, el inhibidor es agregado. Por otro lado, equipos en plantas de poder, en plantas químicas, en fábricas de papel, en ingenios de azúcar, en aire acondicionado de edificios, en estaciones de compresión y en muchos otros medios industriales, están sujetos a la formación de depósitos por la circulación de agua o fluidos de proceso.

Los inhibidores de corrosión son ampliamente utilizados en la industria automotriz, en procesos de planta y durante el almacenamiento y transporte de piezas, Son también agregados a diversos fluidos del automóvil tales como gasolina, aceites y fluidos de freno para prevenir la corrosión. Asimismo los inhibidores son utilizados en el sistema de enfriamiento agregados a la mezcla de etilenglicol-agua.

Otras áreas de aplicación de inhibidores de corrosión son en medios alcalinos, como protección temporal de materiales, como parte de recubrimientos orgánicos, para la prevención de la corrosión microbiológica y en sistemas de desalado y en el transporte, almacenamiento y procesamiento de crudos.<sup>Ref. 6</sup>

### **3.9 TOXICIDAD**

Aunque es difícil determinar el efecto de un añadido en el ambiente, es necesario, tener cierta información sobre este mecanismo de reacción. Si el sistema tratado va a ser ingerido por los seres humanos o los animales, los añadidos deben estar libres de toxicidad. Cuando el inhibidor se desecha a las alcantarillas o a las corrientes naturales del agua, el efecto contaminante sobre el ambiente debe ser mínimo. Está más allá del alcance de la mayoría de la gente en el campo de la corrosión evaluar efectos tóxicos, pero los suministradores de inhibidores deben hacer las evaluaciones apropiadas.

Es también la responsabilidad del suministrador y del usuario estar enterado de regulaciones del gobierno con respecto al uso de productos químicos.<sup>Ref. 12</sup>

## **CAPÍTULO IV.-**

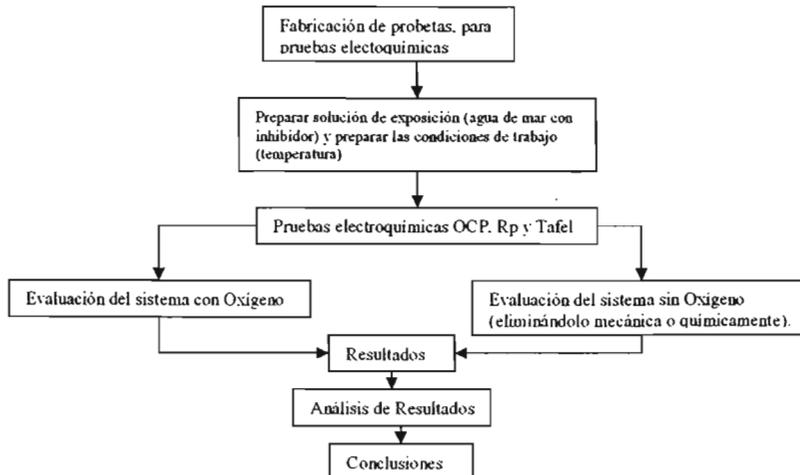
### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

**DESARROLLO EXPERIMENTAL**

Para estudiar el inhibidor de corrosión AT-3026 se plantean las siguientes pruebas:

- 1) Evaluación electroquímica del inhibidor de corrosión en presencia de agua de mar sintética (Norma D 1141-98) en presencia y ausencia de oxígeno, utilizando como electrodo de trabajo al acero APIX-52 a distintas temperaturas, mediante potencial a circuito abierto.
- 2) Evaluación electroquímica del inhibidor de corrosión en presencia de agua de mar sintética (Norma D 1141-98) en presencia y ausencia de oxígeno, utilizando como electrodo de trabajo al acero APIX-52 a distintas temperaturas, mediante la técnica de resistencia a la polarización.
- 3) Evaluación electroquímica del inhibidor de corrosión en presencia de agua de mar sintética (Norma D 1141-98) en presencia y ausencia de oxígeno, utilizando como electrodo de trabajo al acero APIX-52 a distintas temperaturas, mediante la técnica de curvas de polarización.

En la figura 7 se muestra el diagrama de flujo del desarrollo experimental que se siguió para el estudio del inhibidor de corrosión AT-3026 :



**Figura 7.** Diagrama de flujo del desarrollo experimental seguido en el estudio del inhibidor AT-3026.

Primeramente, para el desarrollo de este trabajo de investigación se prepararon las probetas de acero, solución (agua de mar sintética) y se acondicionó el lugar de trabajo para el control de las variables.

#### **4.1 ANÁLISIS METALOGRAFICO Y QUÍMICO DEL ACERO**

Se utilizó el acero APIX-52, ya que es el acero más utilizado en México en las tuberías de la industria petrolera.

Para el análisis metalográfico se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido utilizando un microscopio JEOL 35-CF, se determinó la microestructura del acero, y por medio de la técnica de absorción de rayos X se analizó la composición química de los aceros.

Procedimiento:

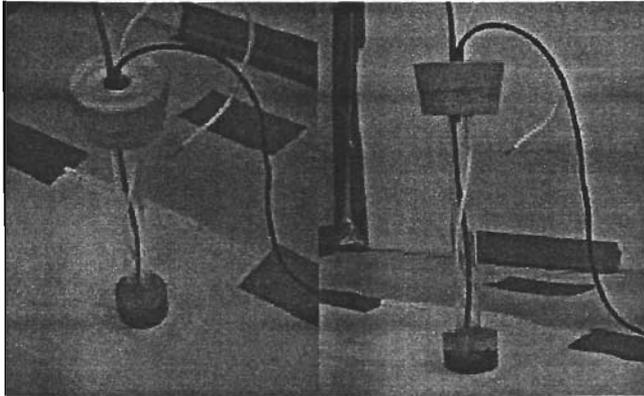
- A las muestras proporcionadas por el Laboratorio de Corrosión se les realizó el pulido a espejo.
- El ataque químico se realizó con NITAL (solución de  $\text{HNO}_3$ -3% $\text{CH}_3$ - $\text{CH}_2\text{OH}$ ), durante un tiempo de 8 seg., posteriormente se enjuagó con agua destilada y se quitó el exceso de agua con aire.
- Las piezas son observadas y fotografiadas en el microscopio metalográfico para determinar de esta manera su estructura.

#### **4.2 PREPARACIÓN DE PROBETAS**

La preparación de estas probetas están restringidas en forma, tamaño, puesto que se usa un matraz de cinco bocas.

Las probetas utilizadas se fabricaron de resina poliéster (Resina cristal), ya que soporta temperaturas de hasta 60 °C, y en este trabajo la temperatura máxima que se utiliza es 40 °C. Se utilizó alambre de cobre para que se tenga contacto eléctrico entre el acero y la fuente que va a dar corriente y dicho alambre se introduce en un tubo de vidrio para que no haya interferencia entre el electrolito (agua de mar sintética) y el alambre y se afecten las mediciones.

Antes de cada prueba electroquímica, se debe lijar la probeta para que quede libre de impurezas, solo basta con la lija 600.



**Figura 8.** Probetas utilizadas en las pruebas electroquímicas.

#### 4.3 PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN DE EXPOSICIÓN

Para este trabajo se utilizó como solución de exposición agua de mar sintética, la cual se preparó de acuerdo a la norma ASTM D 1141-98. Para preparar 1 L de solución se necesita pesar:

Compuesto	Concentración (g/L)
NaCl	24.53
MgCl <sub>2</sub>	5.20
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.09
CaCl <sub>2</sub>	1.16
KCl	0.695
NaHCO <sub>3</sub>	0.201
KBr	0.101
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.027
SrCl <sub>2</sub>	0.025
NaF	0.003

**Tabla 1.** Cantidades en g/L, que se necesitan para preparar 1L de agua de mar sintética, ya que en la industria petrolera se usa ésta para inyectarla en los pozos petroleros.

Es importante que se utilice una balanza analítica, debidamente calibrada para que no se tengan errores.

#### 4.4 PREPARACIÓN DE INHIBIDOR

En este caso se utiliza un matraz de cinco bocas, al cual se le agrega 850 mL de agua de mar sintética, la cual se desea que tenga una concentración de inhibidor definida en partes por millón (ppm).

El procedimiento para la obtención de la concentración del inhibidor fue la siguiente:

En un matraz aforado de 100 mL, se prepara una solución de inhibidor 1/100 mL, quiere decir 1 mL de inhibidor por 99 mL de agua destilada.

Si:

$$1\text{mL/L} = 1000 \text{ ppm}$$

Entonces:

$$C_1V_1=C_2V_2$$

$$C_1 = 1000 \text{ ppm}$$

$$V_1 = 1000 \text{ mL}$$

$$C_2 = X$$

$$V_2 = 100 \text{ mL}$$

$$C_2 = \frac{C_1V_1}{V_2} = \frac{(1000 \text{ ppm})(1000\text{mL})}{100\text{mL}}$$

$$C_2 = 10000 \text{ ppm}$$

El volumen que se debe tomar para tener 5 ppm de inhibidor en 850 mL de agua de mar sintética es:

$$C_1 = 10000 \text{ ppm}$$

$$V_1 = X$$

$$C_2 = 5 \text{ ppm}$$

$$V_2 = 850 \text{ mL}$$

$$V_1 = \frac{C_2 V_2}{C_1} = \frac{(5 \text{ ppm})(850 \text{ mL})}{10000 \text{ ppm}} = 0.425 \text{ mL}$$

A continuación se presenta la Tabla 2, que muestra que alícuota se debe tomar de la solución que tiene 10000 ppm de inhibidor, de inhibidor, para tener la concentración que se quiere.

Concentración de inhibidor	Alícuota en mL
5 ppm	0.425
10 ppm	0.850
20 ppm	1.700
50 ppm	4.250

**Tabla 2.** Alícuotas que se deben tomar de la solución con 10000 ppm de inhibidor, para tener las diferentes concentraciones de estudio.

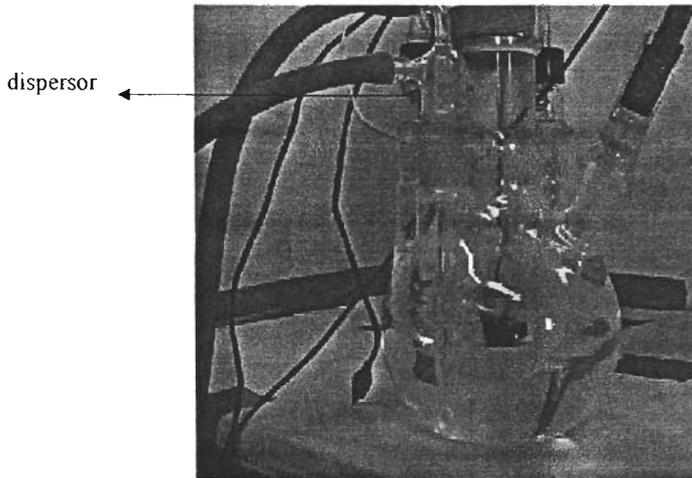
## 4.5 ELIMINACIÓN DE OXÍGENO

Para este trabajo se decidió eliminar de forma mecánica con nitrógeno y de forma química utilizando como secuestrante sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ).

En el matraz de cinco bocas, se coloca la probeta (electrodo de trabajo), un termómetro, platino como contraelectrodo y un capilar de Luggin en donde se coloca el electrodo saturado de calomel (electrodo de referencia).

### 4.5.1 Eliminación mecánica con nitrógeno

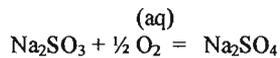
Para eliminar el oxígeno a 850 mL de solución, en la boca libre se coloca un dispersor, por donde se hace pasar un flujo de nitrógeno por un tiempo de 15 minutos, se saca el dispersor y se pone un tapón y se sella con teflón al igual que las otras cuatro bocas, para que no entre aire. Por lo tanto al terminar de eliminar el oxígeno se comienza enseguida la prueba electroquímica.



**Figura 9.** Celda electroquímica con dispersor para la eliminación del oxígeno con nitrógeno.

#### 4.5.2 Eliminación química con sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )

El agua tiene aproximadamente 8 mg/L de oxígeno, y para eliminar el oxígeno se necesita 80 mg/L de Sulfito de Sodio, llevándose a cabo la reacción:

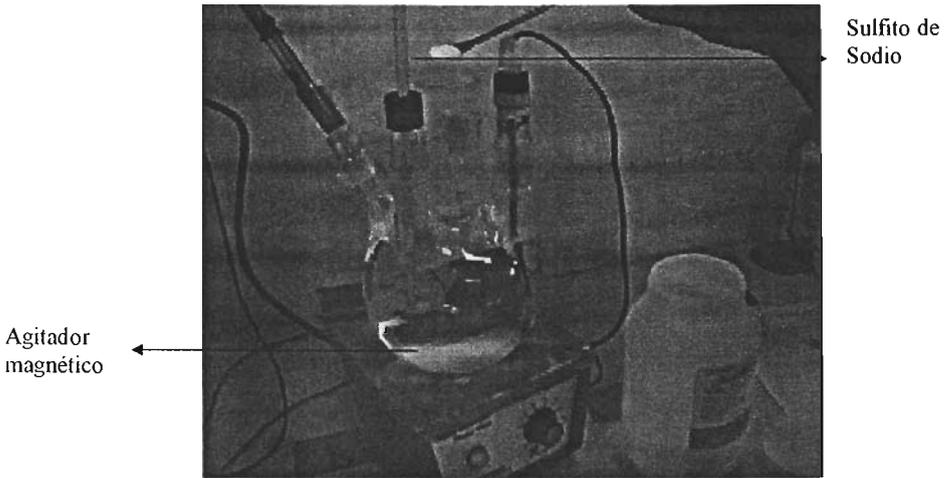


Para 850 mL de solución se necesita:

$$W_{\text{Na}_2\text{SO}_3} = 850\text{mL} \left( \frac{80\text{mg Na}_2\text{SO}_3}{1000\text{mL}} \right) \left( \frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \right) = 0.068\text{g}$$

Con un exceso  $0.068\text{g} * 2 = 0.136\text{g}$ , para asegurar la remoción del oxígeno.

A 850 mL de agua de mar sintética, se le agrega 0.136 g de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  y con la ayuda de un agitador magnético se disuelve en su totalidad aproximadamente en 5 minutos, se sellan con teflón todas las bocas para evitar la entrada de aire.



**Figura 10.** Celda electroquímica con Sulfito de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), para la eliminación del oxígeno, disuelto con la ayuda de un agitador magnético.

## 4.6 METODOLOGÍA DE LA PARTE ELECTROQUÍMICA

### 4.6.1 Matriz Experimental

A continuación se presenta la matriz experimental a seguir para la evaluación del Inhibidor AT-3026.

Prueba	Aereada	Eliminación de oxígeno		Temperatura (°C)			Concentración (ppm)				
		Nitrógeno	( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )	Amb.*	30	40	0	5	10	20	50
1	○			ooo			oooo	oooo	oooo	oooo	oooo
2	○				ooo		oooo	oooo	oooo	oooo	oooo
3	○					ooo	oooo	oooo	oooo	oooo	oooo
4		X		Xxx			xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx
5		X			Xxx		xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx
6		X				xxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx
7			Δ	ΔΔΔ			ΔΔΔΔ	ΔΔΔΔ	ΔΔΔΔ	ΔΔΔΔ	ΔΔΔΔ
8			Δ		ΔΔΔ		ΔΔΔΔ	ΔΔΔΔ	ΔΔΔΔ	ΔΔΔΔ	ΔΔΔΔ
9			Δ			ΔΔΔ	ΔΔΔΔ	ΔΔΔΔ	ΔΔΔΔ	ΔΔΔΔ	ΔΔΔΔ

**Tabla 3.** Matriz Experimental para la evaluación del inhibidor AT-3026, mediante técnicas electroquímicas (OCP, Resistencia a la Polarización y Curvas de Polarización).

\* La temperatura ambiente es  $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ .

#### 4.6.2 Preparación del dispositivo para el control de la temperatura.

La Figura 11 muestra el dispositivo que se utilizó, y consta de un circuito cerrado que recircula el agua mediante una bomba sumergible de 1/8 de caballo de fuerza. Mediante un baño de calentamiento se puede variar la temperatura. El matraz de cinco bocas que es la celda electroquímica utilizada en este trabajo se coloca dentro de un recipiente de unisol que permite que el agua recircule y se mantenga la temperatura de ésta, ya que este material evita pérdidas de calor.

La celda electroquímica está conectada al potencióstato Gill 802 ACM Instruments, que permite que se realicen las pruebas electroquímicas (OCP, Resistencia a la Polarización y Curvas de Polarización) y a su vez el potencióstato está conectado a una computadora lo cual permite que los datos de los resultados se almacenen en la computadora.



**Figura 11.** Dispositivo para el control de la temperatura

### 4.6.3 Evaluación del sistema mediante las técnicas electroquímicas

En esta etapa de la investigación se evaluó el acero APIX-52 sumergido en agua de mar sintética, sin inhibidor y a distintas concentraciones de inhibidor de corrosión (las recomendadas por el proveedor son 10ppm y 20 ppm, se decidió utilizar una concentración por debajo y otra por arriba de las recomendadas, 5 ppm y 50 ppm respectivamente), en presencia y ausencia de oxígeno a diferentes temperaturas (temperatura ambiente, 30 °C y 40 °C).

Antes de que se inicie cada prueba se tiene que pulir la probeta (electrodo de trabajo), con lija 600 para que esté completamente limpia, y adicionar la cantidad de inhibidor necesaria para tener la concentración a estudiar.

Como dato inicial el programa pide el área de exposición del electrodo de trabajo, ya que para realizar las diferentes técnicas se necesita este dato. Para este caso el área expuesta es de 0.7854 cm<sup>2</sup> y antes de cada prueba se deja un tiempo de 3 minutos.

Área expuesta:

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$A = \pi(0.5 \text{ cm})^2$$

$$A = 0.7854 \text{ cm}^2$$

#### ➤ Potencial a circuito abierto

Para esta prueba, el programa es el de Current & Voltage/time, donde se pone el tiempo que se crea pertinente para que se dé la estabilización, y se pone en segundos. Para este caso es a 3300 segundos (55 minutos), según lo establecido por la norma ASTM G-102, y que el programa registre un valor cada 0.5 segundos hasta los 3300 segundos.

#### ➤ Resistencia a la polarización

Se utiliza el programa Long Term-LPR sweep, se aplica un barrido de -20 mV catódicos a 20 mV anódicos con respecto al potencial de estabilización y con una velocidad de barrido de 5 mV por minuto y esta prueba se realiza por duplicado.

Los resultados obtenidos se grafican para ver el comportamiento que se tiene y obtener las ecuaciones de las pendientes de cada sistema estudiado y determinar la velocidad de corrosión que se tiene en cada caso.

➤ **Curvas de polarización**

El programa es Cyclic Sweep, y se aplica un barrido de -300 mV catódicos a 500 mV anódicos con respecto al potencial de estabilización y con una velocidad de barrido de 60 mV por minuto.

Los resultados obtenidos se grafican para saber el comportamiento que tiene el inhibidor en cada uno de los diferentes sistemas de estudio. De cada curva que se tiene se sacan las pendientes por extrapolación de Tafel, y se obtienen las velocidades de corrosión mediante las densidades de corriente obtenidas por la extrapolación de Tafel.

## **CAPÍTULO V.-**

### **RESULTADOS EXPERIMENTALES**

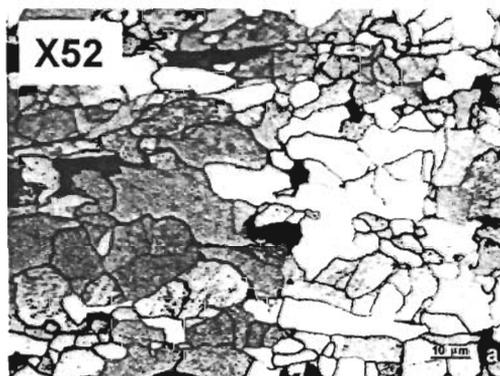
## RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, partiendo del análisis metalográfico y químico del acero APIX-52 y después los resultados de las técnicas electroquímicas (potencial a circuito abierto, resistencia a la polarización y curvas de polarización), teniendo las velocidades de corrosión para saber cuál es el comportamiento del inhibidor de corrosión AT-3026.

### 4.1. Análisis metalográfico y químico del acero APIX- 52.

Se utilizó el microscopio electrónico de barrido a 1000 aumentos para observar la metalografía y se determinó la composición química nominal del acero APIX-52 (Tabla 4) mediante la técnica de Espectrofotometría de Emisión.

Acero APIX-52



**Figura 12.** Microestructura del acero APIX-52 vista a 1000X mediante el MEB, atacado con Nital 5 durante 8 seg.

	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>
<i>APIX-52</i>	0.071	0.29	0.97	0.013	0.002	0.12	0.23	0.02	0.02	0.008

**Tabla 4.** Composición química del acero APIX-52 mediante la técnica de espectrofotometría de emisión.

De acuerdo a la designación de este acero, tiene alta resistencia y es utilizado en la industria petrolera, y comprende tres grados cuya nomenclatura es la letra X seguida por los dos primeros dígitos del límite elástico aparente. Su composición química depende del método de fabricación del acero, así como del tubo. Las propiedades físicas de un acero grado X-52 son un límite elástico de 52000 lb/pulg<sup>2</sup>, esfuerzo unitario a la rotura de 66000 lb/pulg<sup>2</sup>, además, el tubo será o no expandido en frío, mecánica o hidráulicamente.

El acero cumple con la característica de la serie 5L del American Petroleum Institute grado X-52, donde se determinan los elementos críticos, que en este caso son Mn, S y P, ya que cumplen con el estándar establecido.

### 5.2. Estabilización de Potencial

De acuerdo con el desarrollo experimental propuesto en este trabajo de investigación, en la primera parte se obtienen los potenciales a circuito abierto (con un tiempo de estabilización de 55 minutos de acuerdo a la norma ASTM G-102) de cada una de las pruebas realizadas, que se establecieron en la matriz experimental indicando las diferentes condiciones de cada sistema evaluado que son: temperatura, concentración de inhibidor, solución con oxígeno o sin oxígeno, para este caso puede ser eliminado de forma mecánica haciendo pasar un flujo de Nitrógeno en el agua de mar sintética, o de forma química agregando a la solución sulfito de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>).

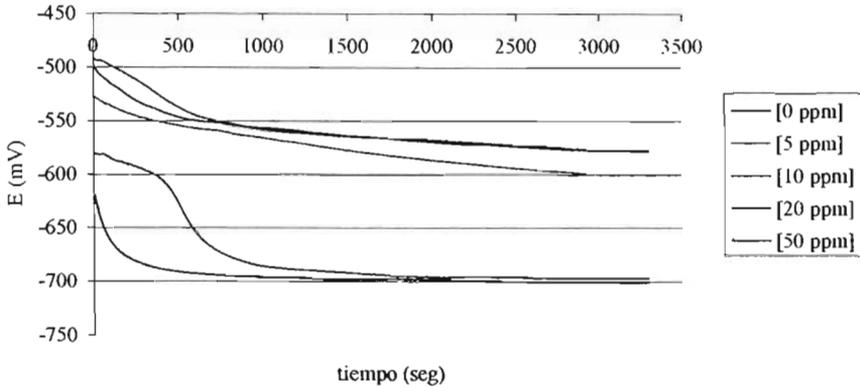
#### 5.2.1. Tabla y Gráficas de estabilización de potencial (mV) para un acero APIX-52 en agua de mar sintética aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor

##### Presencia de oxígeno.

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	-577.88	-688.22	-701.50
5 ppm	-600.08	-687.85	-689.96
10 ppm	-577.84	-681.18	-608.93
20 ppm	-697.21	-657.90	-603.51
50 ppm	-700.96	-669.73	-692.51

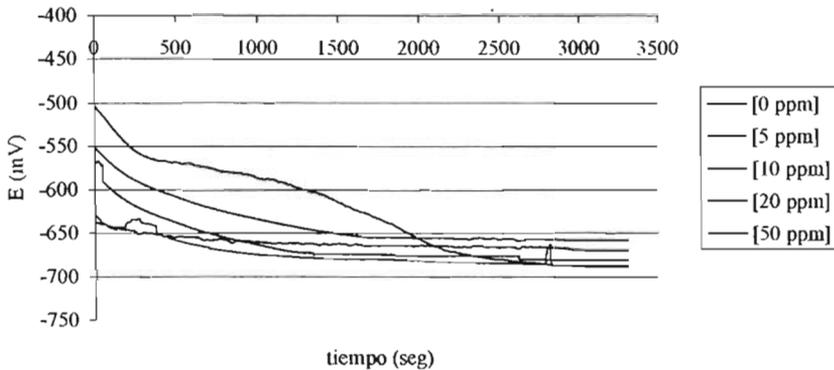
**Tabla 5.** Tabla de estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

ESTABILIZACIÓN DE POTENCIAL DE UN ACERO APIX 52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA, AIREADA, T ambiente, A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



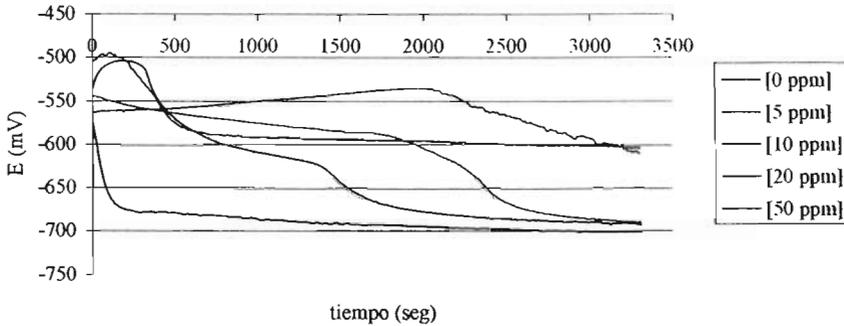
**Gráfica 1.** Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a temperatura ambiente, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

ESTABILIZACIÓN DE POTENCIAL DE UN ACERO APIX 52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA, AIREADA, T (30°C), A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



**Gráfica 2.** Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a 30 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

ESTABILIZACIÓN DE POTENCIAL DE UN ACERO APIX 52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA, AIREADA, T (40°C), A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



**Gráfica 3.** Estabilización de potencial de un acero APIX-52 en agua de mar sintética aireada a 40 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

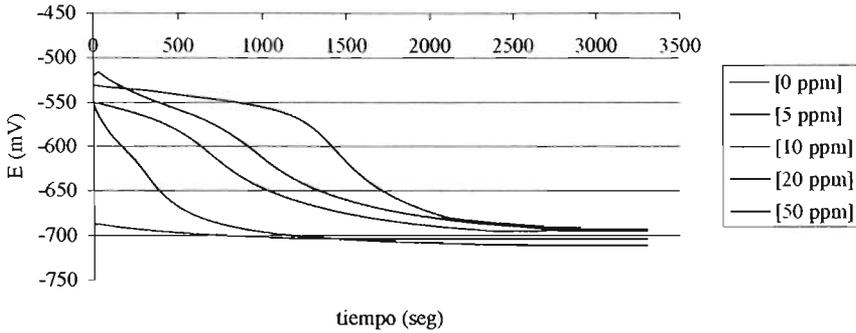
**5.2.2. Tabla y gráficas de estabilización de potencial (mV) para un acero APIX-52 en agua de mar sintética deaireada con nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor**

**Eliminación de oxígeno del medio con nitrógeno**

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	-693.352	-719.63561	-731.58174
5 ppm	-704.0284	-675.91882	-711.81116
10 ppm	-695.5326	-698.64094	-724.7787
20 ppm	-711.87588	-701.19259	-730.56453
50 ppm	-695.77767	-688.03468	-658.90666

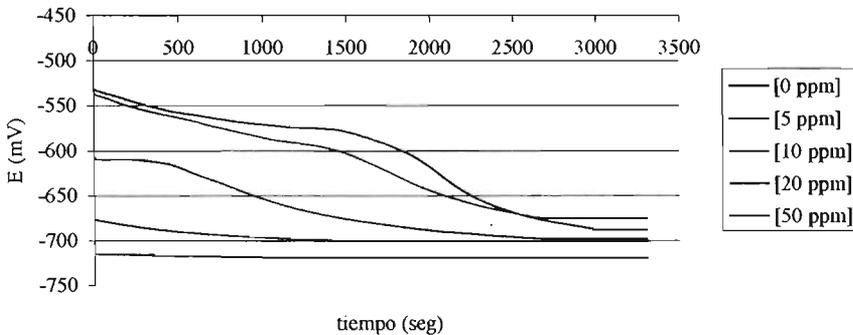
**Tabla 6.** Estabilización de potencial para un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

ESTABILIZACIÓN DE POTENCIAL DE UN ACERO APIX 52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA, DEAIREADA CON NITRÓGENO, T ambiente, A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



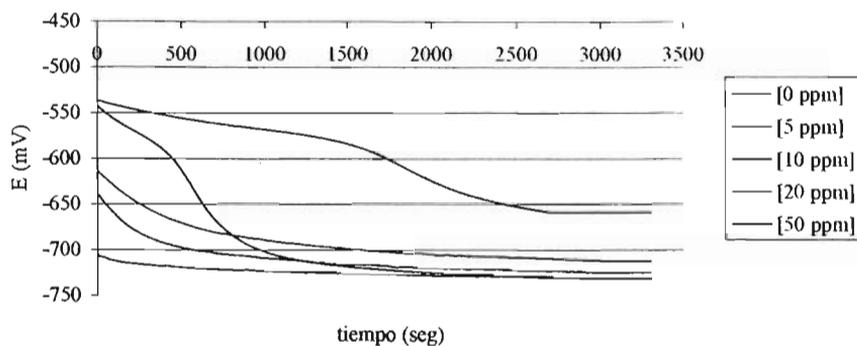
**Gráfica 4.** Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a temperatura ambiente, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

ESTABILIZACIÓN DE POTENCIAL DE UN ACERO APIX 52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA, DEAIREADA CON NITRÓGENO, T (30°C), A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



**Gráfica 5.** Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a 30 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

ESTABILIZACIÓN DE POTENCIAL DE UN ACERO APIX 52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA, DEAIREADA CON NITRÓGENO, T (40°C), A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



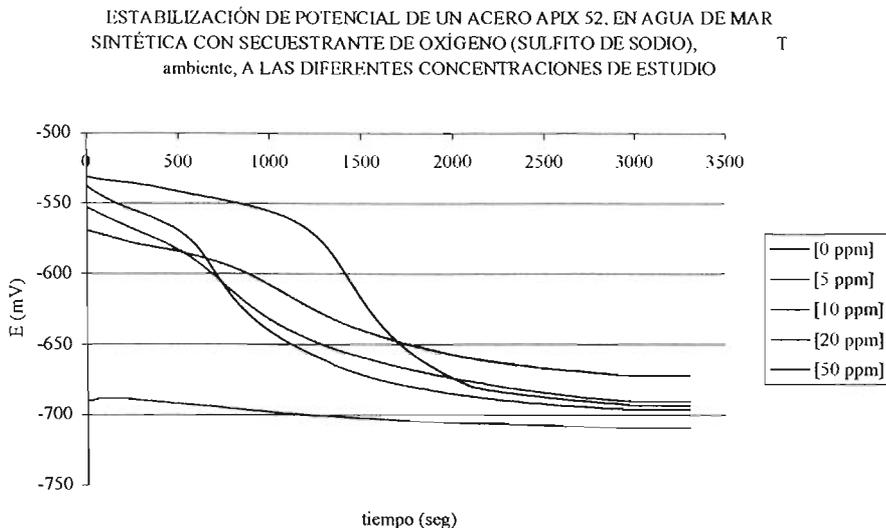
**Gráfica 6.** Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a 40 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

**5.2.3 Tabla y gráficas de estabilización de potencial (mV) para un acero APIX-52, en agua de mar sintética con secuestrante de oxígeno (sulfito de sodio) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor**

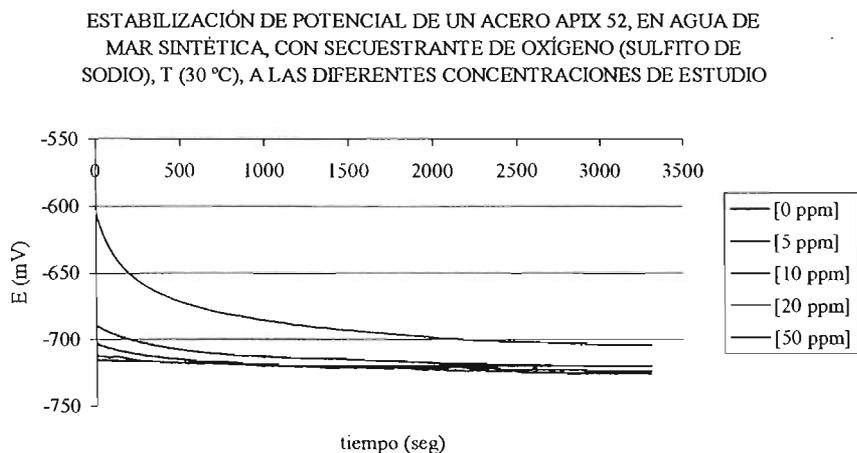
**Eliminación de oxígeno del medio con sulfito de sodio**

Concentración	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	-697.12	-700.37	-724.73
5 ppm	-709.33	-704.10	-710.91
10 ppm	-690.67	-725.58	-706.64
20 ppm	-672.37	-720.04	-769.70
50 ppm	-696.46	-723.77	-694.10

**Tabla 7.** Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

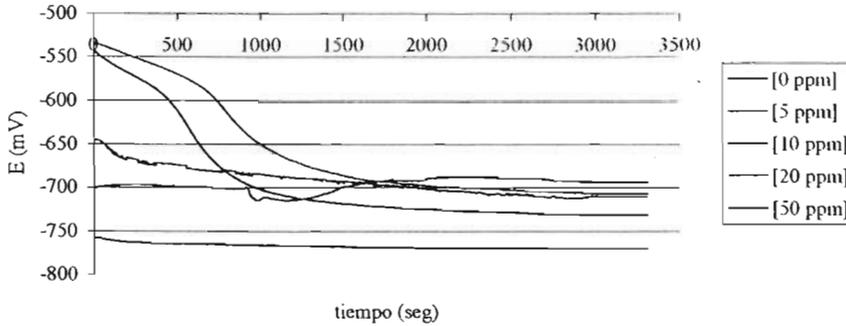


**Gráfica 7.** Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a temperatura ambiente, a las diferentes concentraciones de inhibidor.



**Gráfica 8.** Estabilización de potencial de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a 30 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

ESTABILIZACIÓN DE POTENCIAL DE UN ACERO APIX 52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA, CON SECESTRANTE DE OXÍGENO (SULFITO DE SODIO), T (40 °C), A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



**Gráfica 9.** Estabilización de potencial de un acero APIX 52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) a 40 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

### 5.3. Resistencia a la Polarización (Rp)

Para tener resultados más confiables independientemente de seguir la norma ASTM G-59, se decidió realizar la prueba por duplicado y se realizó un barrido de 20 mV catódicos a 20 mV anódicos, después se trazó una gráfica E (mV) vs.  $i$  (mA/cm<sup>2</sup>) con los resultados de cada prueba, y se calculó la pendiente de cada una de las evaluaciones.

Para obtener las pendiente de cada evaluación, la metodología fue la siguiente:

La ecuación de la recta es:

$$y = mx + b$$

donde m = pendiente

Por ejemplo, se toma la prueba aireada a Temperatura ambiente sin inhibidor, cuya fórmula de la línea de tendencia es:

$$y = 1861.6x - 582.33$$

$$m = 1861.6$$

Si el valor de Rp es la pendiente (m), por lo tanto el valor de la Resistencia a la Polarización de esta prueba es:

$$Rp = 1861.6$$

Las unidades correspondientes para Rp son [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ], cuyo análisis dimensional es:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{mV}{\frac{mA}{\text{cm}^2}} = \frac{mV \cdot \text{cm}^2}{mA}$$

$$\text{Si } \Omega = \frac{mV}{mA}$$

Por lo tanto  $R_p = \Omega \cdot \text{cm}^2$

Entonces el valor es:

$$R_p = 1861.6 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

Para obtener la velocidad de corrosión para cada uno de los sistemas es necesario tener el valor de  $t_{\text{corr}}$ , lo cual para esta técnica en específico, la fórmula es:

$$t_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

donde B en este caso se puede tomar la aproximación siguiente:

$$B = 0.026 \text{ V}$$

$$B = 26 \text{ mV}$$

Se sustituye el valor de B y se divide entre el valor de Rp obtenido, para tener como resultado  $t_{\text{corr}}$  para cada sistema.

El análisis dimensional para  $t_{\text{corr}}$  es:

$$t_{\text{corr}} = \frac{mV}{\frac{mV \cdot \text{cm}^2}{mA}} = \frac{mA}{\text{cm}^2}$$

Siguiendo con el ejemplo :

$$t_{\text{corr}} = \frac{26mV}{1861.6\Omega \cdot \text{cm}^2} = 1.39 * 10^{-2} \frac{mA}{\text{cm}^2}$$

Entonces se puede calcular  $V_{corr}$  a partir de la  $t_{corr}$  mediante el siguiente cálculo dimensional:

$$V_{corr} = \frac{mA}{cm^2} * \frac{1 * 10^{-3} A}{1 mA} * \frac{1 C}{A \cdot s} * \frac{1 eq}{96500 C} * \frac{1 mol Fe}{2 eq} * \frac{55.8 g Fe}{1 mol Fe} * \frac{1 cm^3}{7.86 g Fe} * \frac{1 pu lg}{2.54 cm} * \frac{10^3 mp}{1 pu lg} * \frac{3600 s}{1 hr} * \frac{24 hr}{1 día} * \frac{365 días}{1 año} = \frac{mp}{y} = mpy$$

Donde: mpy = milipulgadas por año

Por lo tanto, se puede calcular  $V_{corr}$  de la siguiente forma:

$$V_{corr} = \left[ \frac{mA}{cm^2} \right] * 456.69 = mpy$$

Siguiendo con el ejemplo:

$$V_{corr} = 1.39 * 10^{-2} * 456.69$$

$$V_{corr} = 6.37 \text{ mpy}$$

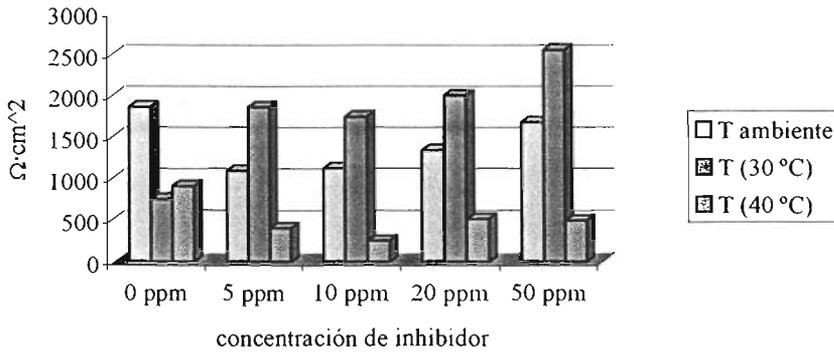
### 5.3.1 Resultados y gráficas de resistencia a la polarización para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

#### Presencia de oxígeno.

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	1861.6	755.08	910.08
5 ppm	1095.7	1867.2	404.46
10 ppm	1124	1752.4	252.94
20 ppm	1340.8	2004.2	516.63
50 ppm	1680.6	2559.3	499.94

**Tabla 8.** Valores de resistencia a la polarización [ $\Omega \cdot cm^2$ ] de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN DE UN ACERO APIX-52. EN AGUA DE MAR SINTÉTICA. AIREADA



Gráfica 10. Resistencia a la polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada, a las diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

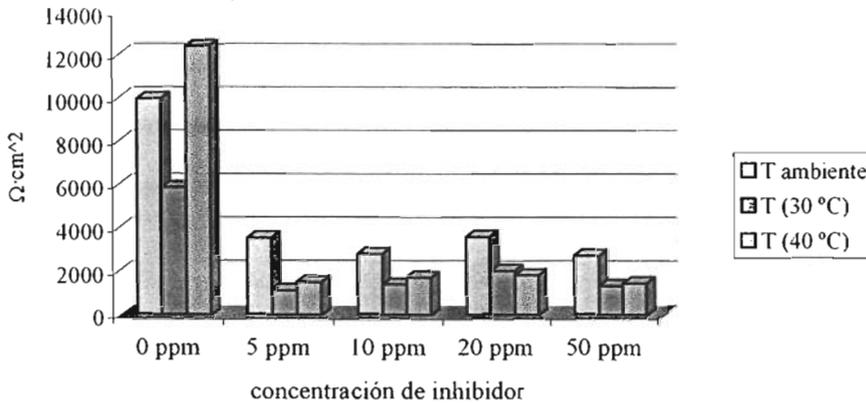
**5.3.2 Resultados y gráficas de resistencia a la polarización para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.**

**Eliminación de oxígeno del medio con nitrógeno**

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	9984.6	5875.8	12431
5 ppm	3560.2	1145.9	1514.7
10 ppm	2832.3	1413.8	1724
20 ppm	3603	2053.6	1845.9
50 ppm	2742.8	1357.3	1471

Tabla 9. Valores de resistencia a la polarización [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

## RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN DE UN ACERO APIX-52. EN AGUA DE MAR SINTÉTICA. DEAIREADA CON NITRÓGENO



**Gráfica 11.** Resistencia a la polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaerada con nitrógeno, a las diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor .

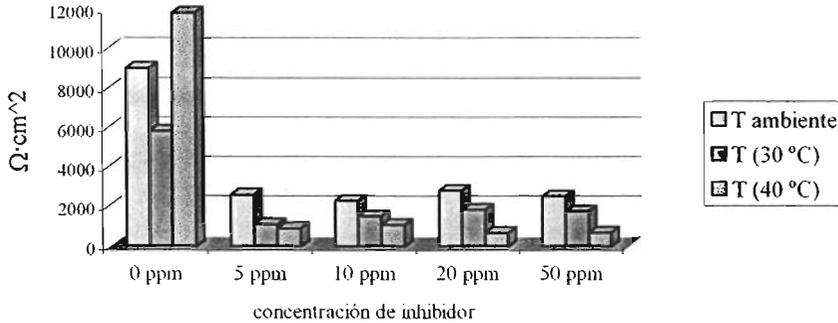
### 5.3.3 Resultados y gráficas de resistencia a la polarización para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno (sulfito de sodio) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

#### Eliminación de oxígeno del medio con sulfito de sodio

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	9023.9	5834.3	11819.05
5 ppm	2599.5	1104.4	902.75
10 ppm	2286.7	1513.8	1068
20 ppm	2809.1	1859.2	668.16
50 ppm	2514.9	1741.2	688.53

**Tabla 10.** Valores de resistencia a la polarización [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN DE UN ACERO APIX-52. EN  
AGUA DE MARA SINTÉTICA. CON SECUESTRANTE DE OXÍGENO  
(SULFITO DE SODIO)



**Gráfica 12.** Resistencia a la polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), a las diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor .

#### 5.4. Curvas de Polarización

De acuerdo al desarrollo experimental propuesto para este trabajo, la última técnica electroquímica de evaluación para el inhibidor en las diferentes condiciones de estudio, son las Curvas de Polarización ( $E(\text{mV})$  vs.  $\log |i|$ ) para cada prueba, siguiendo la norma ASTM G-102 y realizando un barrido de  $-300$  mV catódicos a  $500$  mV anódicos, de las cuales se obtiene  $i_{\text{corr}}$ , tomando el criterio de que a partir del Potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ), se traza una línea recta  $120$  mV por arriba de  $E_{\text{corr}}$ , teniendo la Zona Tafeliana anódica y otra línea  $120$  mV por debajo de  $E_{\text{corr}}$ , teniendo la Zona Tafeliana catódica; en estas Zonas se trazan líneas rectas a la parte de la Curva de Polarización que se tiene, dichas líneas rectas por lo menos deben durar 1 década a esto se le llama Extrapolación de Tafel, que al intersectar la línea horizontal trazada en  $E_{\text{corr}}$  se sube al Eje y que pertenece a los valores del logaritmo del valor absoluto de la densidad de corriente ( $\log |i|$ ) y sacándole antilogaritmo de éste valor se obtiene la  $i_{\text{corr}}$  catódica o anódica dependiendo de la Zona Tafeliana a la que corresponda.

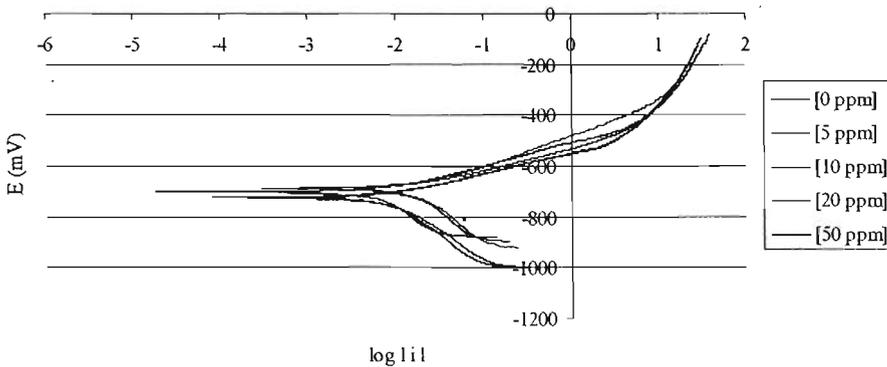
Una vez que se tenga el valor de  $t_{corr}$ , se utiliza la expresión:

$$V_{corr} = i \left( \frac{mA}{cm^2} \right) * 456.69 = mpy$$

Cuyo cálculo dimensional se hizo en el apartado 5.3.

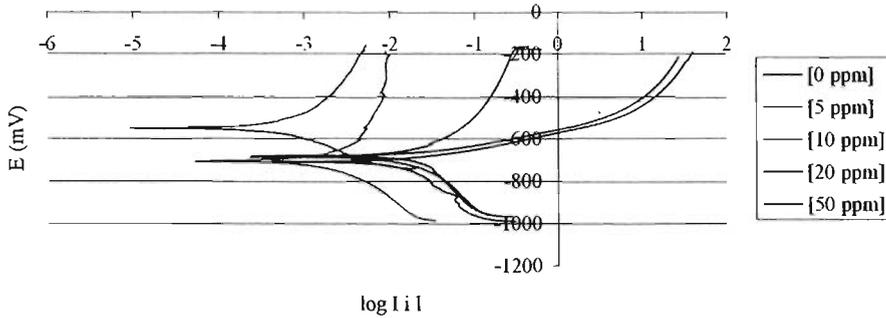
**5.4.1. Curvas de polarización para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, aireada, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.**

CURVA DE POLARIZACIÓN DE UN ACERO APIX 52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA, AIREADA, T ambiente, A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



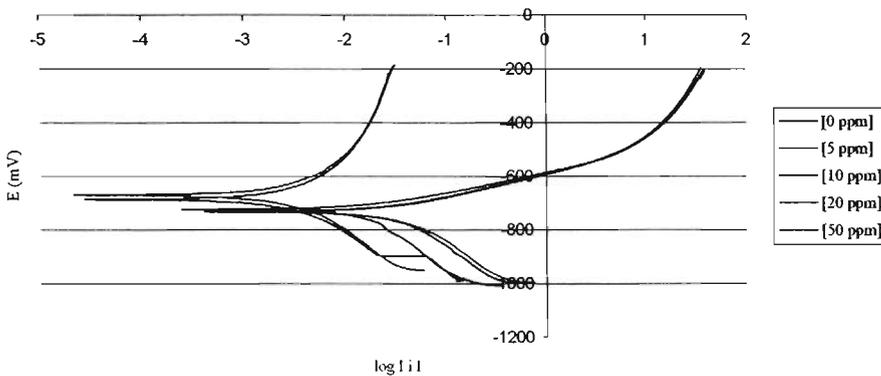
**Gráfica 13.** Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a temperatura ambiente, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

CURVA DE POLARIZACIÓN DE UN ACERO APIX 52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA, AIREADA, T (30 °C), A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



**Gráfica 14.** Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a 30 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

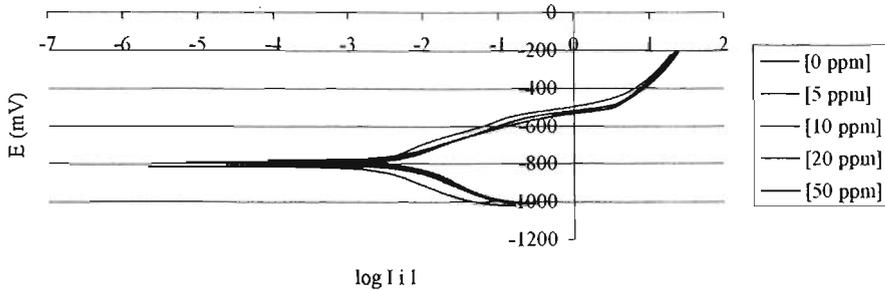
CURVA DE EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL DE UN ACERO APIX 52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA, AIREADA, T (40 °C), A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



**Gráfica 15.** Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a 40 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

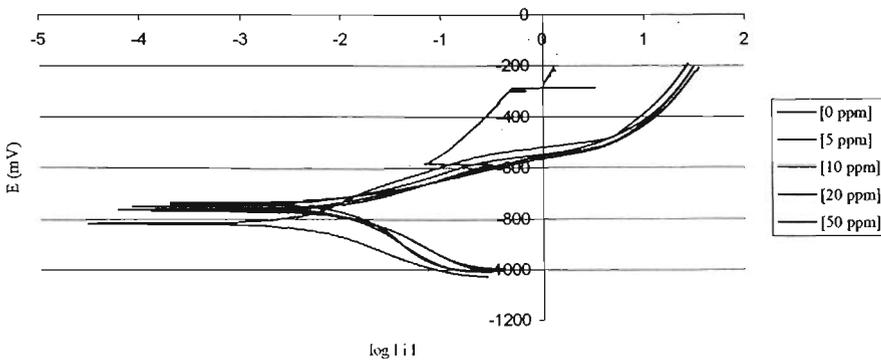
5.4.2. Curvas de polarización para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

CURVA DE POLARIZACIÓN DE UN ACERO APIX 52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA, DEAIREADA CON NITRÓGENO, T ambiente, A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



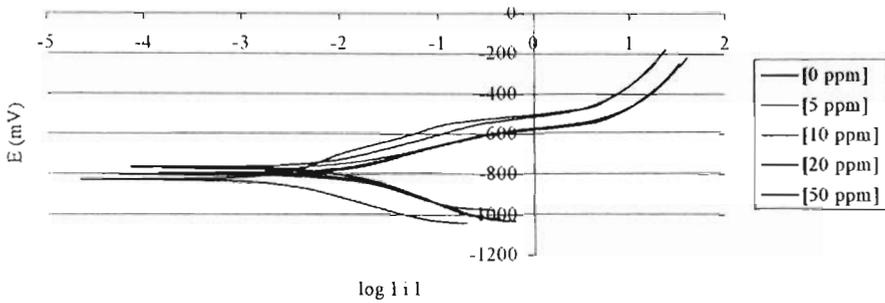
Gráfica 16. Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a temperatura ambiente, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

CURVA DE EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL DE UN ACERO APIX 52. EN AGUA DE MAR SINTÉTICA. DEAEREADA CON NITRÓGENO. T (30 °C). A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



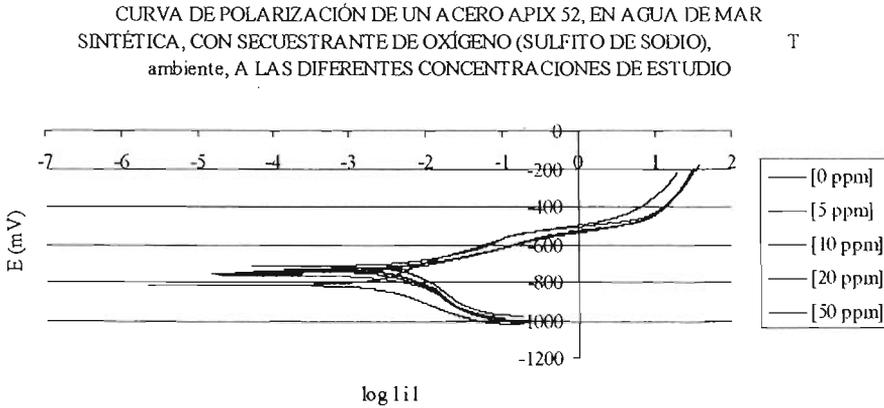
Gráfica 17. Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a 30 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

CURVA DE POLARIZACIÓN DE UN ACERO APIX 52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA, DEAREADA CON NITRÓGENO, T (40 °C), A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO

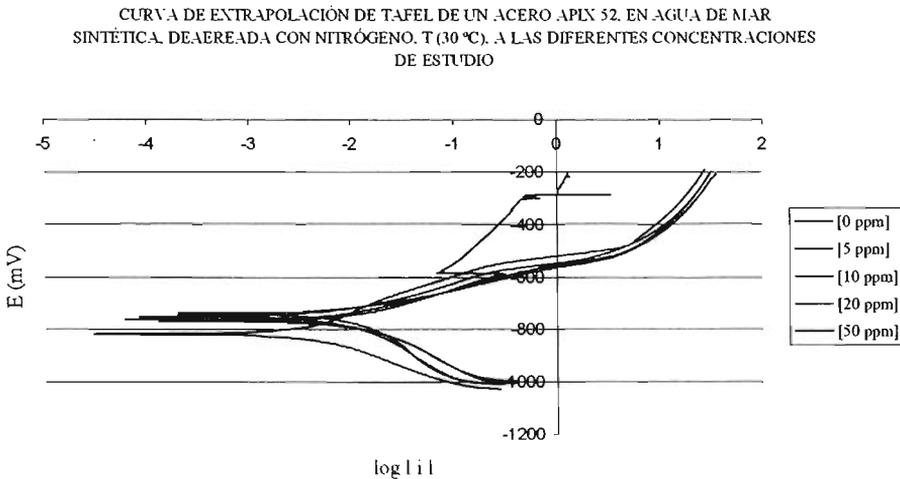


**Gráfica 18.** Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a 40 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

5.4.3. Curvas de polarización para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno (sulfito de sodio), a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

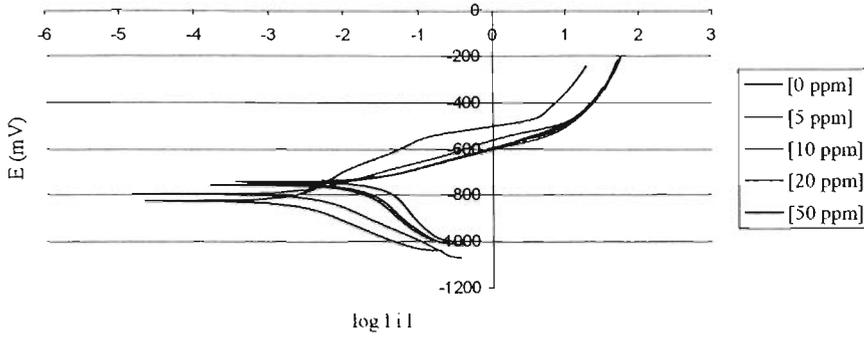


**Gráfica 19.** Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a temperatura ambiente, a las diferentes concentraciones de inhibidor.



**Gráfica 20.** Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a 30 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

CURVA DE POLARIZACION DE UN ACERO APIX 52. EN AGUA DE MAR SINTÉTICA. CON SECUESTRANTE DE OXÍGENO (SULFITO DE SODIO). T (40 °C). A LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ESTUDIO



**Gráfica 21.** Curva de polarización de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar *sintética*, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a 40 °C, a las diferentes concentraciones de inhibidor.

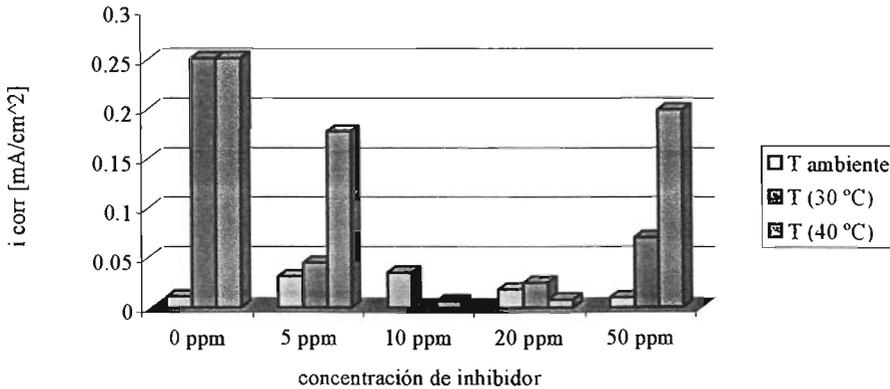
5.4.4. Resultados y gráficas de  $i_{corr}$  para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas de estudio y concentraciones de inhibidor.

Presencia de oxígeno

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	0.0112	0.2511	0.2511
5 ppm	0.0316	0.0446	0.1778
10 ppm	0.0354	0.0012	0.0066
20 ppm	0.0186	0.0251	0.0079
50 ppm	0.0100	0.0707	0.1995

Tabla 11. Resultados de  $i_{corr}$  [ $\text{mA}/\text{cm}^2$ ] de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

$i_{corr}$  en [ $\text{mA}/\text{cm}^2$ ] obtenidas por Extraplación de Tafel, para un acero APIX 52, en agua de mar sintética, aireada



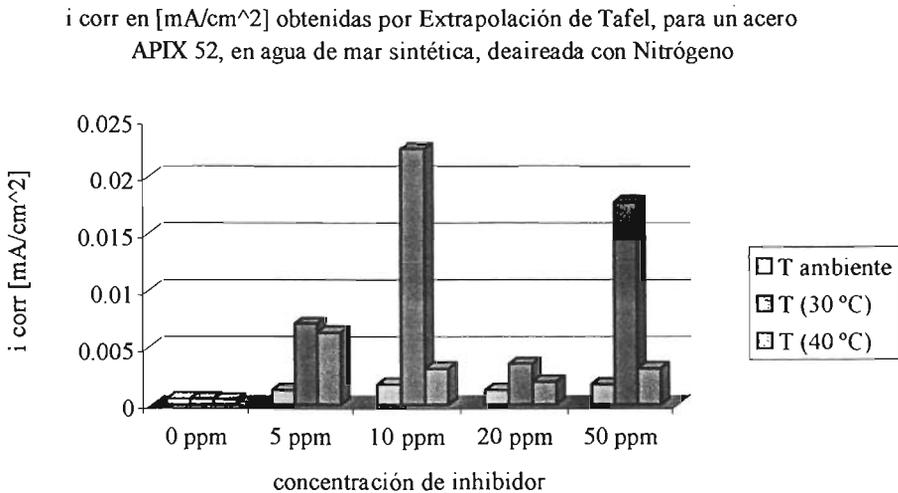
Gráfica 22.  $i_{corr}$  obtenidas por extrapolación de Tafel, de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

5.4.5. Resultados y gráficas de  $t_{corr}$  para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

Eliminación de oxígeno del medio con nitrógeno

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	0.0005	0.0005	0.0004
5 ppm	0.0012	0.0070	0.0063
10 ppm	0.0017	0.0223	0.0031
20 ppm	0.0012	0.0035	0.0019
50 ppm	0.0017	0.0177	0.0031

Tabla 12. Resultados de  $t_{corr}$  [mA/cm<sup>2</sup>] de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.



Gráfica 23.  $t_{corr}$  obtenidas por extrapolación de Tafel, de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

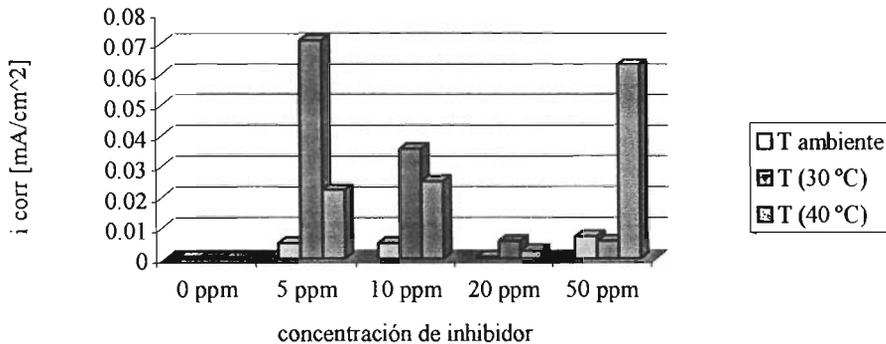
5.4.6. Resultados y gráficas de  $t_{corr}$  para un acero APIX-52, en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno (sulfito de sodio) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

Eliminación de oxígeno del medio con sulfito de sodio

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	0.0005	0.0005	0.0003
5 ppm	0.0050	0.0707	0.0223
10 ppm	0.0050	0.0354	0.0251
20 ppm	0.0005	0.0056	0.0025
50 ppm	0.0070	0.0056	0.0630

Tabla 13. Resultados de  $t_{corr}$  [ $\text{mA}/\text{cm}^2$ ] de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

$i_{corr}$  en [ $\text{mA}/\text{cm}^2$ ] obtenidas por Extrapolación de Tafel, para un acero APIX 52, en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno (Sulfito de Sodio)



Gráfica 24.  $t_{corr}$  obtenidas por extrapolación de Tafel, de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

## **CAPÍTULO VI.-**

# **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

---

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

En el presente capítulo se analizan los resultados de las pruebas electroquímicas obtenidos en el desarrollo de este trabajo, de esta manera se pretende ver los efectos de las variables como la temperatura, la concentración de oxígeno y la concentración del inhibidor comercial AT-3026 en presencia de agua de mar sintética y usando como electrodo de trabajo al acero APIX-52 utilizado en este tipo de ambientes corrosivos.

### **6.1 ANÁLISIS METALGRÁFICO Y QUÍMICO DEL ACERO APIX-52 USADO COMO ELECTRODO DE TRABAJO.**

En esta parte de la investigación se analizó el acero APIX-52. Este material se escogió para la evaluación del inhibidor de corrosión AT-3026, puesto que aparte de ser muy utilizado en la industria petrolera, es muy comercial. En el análisis metalográfico de este acero (figura 12) se observan granos equiaxiales típicos del proceso de fabricación de los tubos, aunque éstos no tienen un tamaño homogéneo, por lo que se puede hacer mención que a este material no se le realizó el proceso térmico de normalizado para homogenizar los granos en su fabricación. En lo que se refiere a la composición química obtenida mediante el espectrofotómetro de emisiones, que se observa en la tabla 4, se puede mencionar que este acero cumple con los estándares de la serie 5L del American Petroleum Institute grado X-52.

### **6.2 REGISTRO DE LA ESTABILIZACIÓN DE POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO DE LOS SISTEMAS EN ESTUDIO.**

En esta etapa de la investigación se registró el potencial a circuito abierto durante un periodo de tiempo de 55 minutos, para el acero APIX-52 inmerso en agua de mar sintética en presencia y ausencia de oxígeno, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor de corrosión, de acuerdo con el diseño de experimentos propuesto. Cabe mencionar que el oxígeno fue removido de dos maneras; la primera se realiza en forma mecánica inyectando nitrógeno al agua de mar desplazando al  $O_2$  y la segunda es utilizando sulfito de sodio ( $Na_2SO_3$ ) para que reaccione con el gas y de esta manera el medio quede libre de oxígeno.

### 6.2.1 Estabilización de potencial a circuito abierto del acero APIX-52 en agua de mar sintética en presencia y ausencia de oxígeno a diferentes temperaturas y diferentes concentraciones de inhibidor de corrosión.

La estabilización de potencial ( $E(mV)$ ) a circuito abierto se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM G-102, se varió la temperatura ( $T_{ambiente}$ , 30 °C y 40 °C) y la concentración de inhibidor de corrosión (0 ppm, 5 ppm, 10 ppm, 20 ppm y 50 ppm). En este sistema en el cual se cuenta con la presencia de oxígeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor, los resultados se encuentran en la Tabla 5, en la cual se visualiza la variación del potencial de acuerdo a la concentración de inhibidor y a las temperaturas en las que fueron realizadas las pruebas.

En el sistema a temperatura ambiente (gráfica 1) y diferentes concentraciones de inhibidor se observa que al comenzar la prueba el potencial es más positivo que al finalizar la pruebas. El intervalo de potencial se ubica entre los -470 mV y -620 mV, teniendo una diferencia de potencial de 150 mV entre ellos. Ahora bien, al finalizar la prueba en los sistemas sin inhibidor, 5 ppm y 10 ppm el potencial se estabiliza a los 8 minutos aproximadamente, teniendo una diferencia de potencial entre ellos de 23 mV, y para las concentraciones de 50 ppm y 20 ppm, el tiempo de estabilización se reduce a 6 min., teniendo una diferencia de potencial de sólo 3 mV.

A 30 °C, (Gráfica 2) al inicio de la prueba los potenciales se encuentran entre -500 mV y -630 mV; el tiempo de estabilización es muy rápido en todas las pruebas excepto cuando no está presente el inhibidor, puesto que la estabilización se llevó a cabo hasta los 33 minutos de exposición.

A 40 °C (Gráfica 3), al inicio de la prueba el potencial a circuito abierto se encuentran entre los -500 mV y -580 mV. En las concentraciones 5 ppm, 10 ppm y 50 ppm, el tiempo de estabilización es entre los 25 a 38 min., mientras que para 20 ppm se estabiliza en 1 minuto; por otro lado, al igual que los sistemas anteriores el potencial final es más negativo que al inicio. Los potenciales para 0 ppm, 5 ppm y 50 ppm están entre -689 y -701 mV, y los potenciales para 10 ppm y 20 ppm están alrededor de los -605 mV.

En el sistema de aireado con nitrógeno a temperatura ambiente (Gráfica 4), para la concentración de 5 ppm el potencial inicial es de -680 mV y su estabilización se lleva a cabo muy rápidamente, mientras que para las concentraciones restantes los potenciales iniciales van de -510 mV a -550 mV; para 0 ppm, 10 ppm y 50 ppm el tiempo que tarda en estabilizarse es aproximadamente de 30 minutos, y para 20 ppm es de 8 minutos.

En la prueba de aireado con nitrógeno a 30 °C (Gráfica 5), los potenciales iniciales están en un intervalo de -440 mV a -710 mV, en este caso el tiempo de estabilización es muy rápido para las concentraciones de 0 ppm y 20 ppm, pero el potencial final para todas las concentraciones se encuentra en un intervalo de 10 mV, y también para este caso el potencial final es más negativo que el inicial.

A 40 °C, de aireado con nitrógeno (Gráfica 6), a 5 ppm, 10 ppm y 20 ppm el tiempo de estabilización es rápido y el potencial final es ligeramente más negativo que el inicial, para 0 ppm y 50 ppm el potencial inicial es más positivo que en los registrados en las demás concentraciones.

Para el sistema con secuestrante de oxígeno (sulfito de sodio) a temperatura ambiente (Gráfica 7), muestra que para una concentración de 5 ppm, el potencial inicial es más negativo que las demás concentraciones y el tiempo de estabilización es muy corto comparado con las demás concentraciones, ya que el tiempo de estabilización es de 30 minutos, y su potencial final es más negativo que el inicial y estos están en un intervalo de 37 mV.

A 30 °C, con sulfito de sodio como secuestrante de oxígeno (Gráfica 8), a 5 ppm el potencial inicial es más anódico aproximadamente por 100 mV, comparándolo con las demás concentraciones, los potenciales finales para todas las concentraciones son más negativos que los iniciales y la diferencia de potencial es de 19 mV.

En 40 °C, con sulfito de sodio como secuestrante de oxígeno (Gráfica 9), el potencial inicial para 0 ppm y 10 ppm es más positivo a comparación de las demás concentraciones, el tiempo de estabilización es mayor, pero el potencial final de todas las concentraciones tiene un intervalo menor que es de 37 mV a comparación del potencial inicial.

En los valores de estabilización de potencial, para el sistema aireado en general son más positivos, que los resultados del sistema sin oxígeno, pero los valores del sistema con secuestrante de oxígeno (sulfito de sodio) son más negativos, que los del sistema deaireado con nitrógeno y para todos los casos el intervalo de los valores del potencial a circuito abierto son pequeños.

### **6.3 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN DEL ACERO APIX-52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA EN PRESENCIA DE OXÍGENO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y CONCENTRACIONES DE INHIBIDOR**

Para la gráfica 10, se muestran los resultados del sistema aireado a las diferentes temperaturas y concentraciones establecidas en el capítulo anterior. A temperatura ambiente, la resistencia a la polarización es mayor en ausencia del inhibidor, al aumentar la concentración de inhibidor la  $R_p$  aumenta, sin embargo, al deairear al sistema con nitrógeno (Gráfica 11) o sulfito de sodio (12) los valores de  $R_p$  aumentan al igual que cuando se incrementa la concentración de inhibidor, pero al incrementar la temperatura se suscita un decremento de estos valores.

#### **6.3.1 Tablas y Gráficas de Velocidades de Corrosión obtenidas mediante $R_p$ , para un acero APIX-52, en agua de mar sintética con y sin oxígeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor**

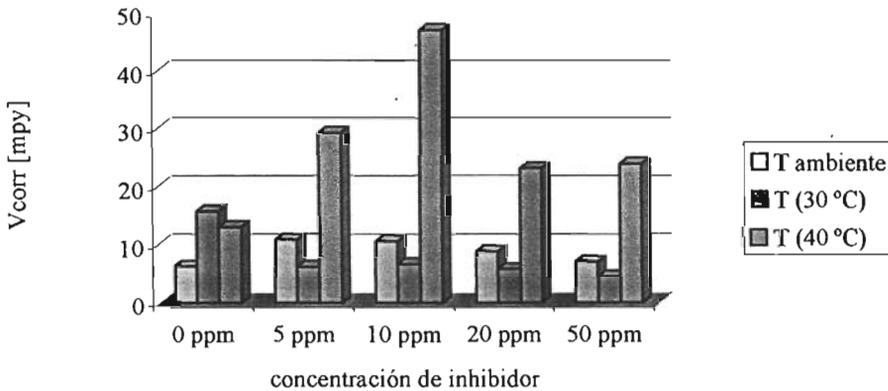
Una de las opciones para ver el efecto del inhibidor es obtener la velocidad de corrosión en milipulgadas por año, el cálculo de  $V_{\text{corr}}$ , se hizo en el apartado 4.3. Los valores de  $V_{\text{corr}}$  de los sistemas se muestran a continuación:

Agua de mar en presencia de oxígeno.

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	6.378436142	15.7256141	13.04731092
5 ppm	10.83699619	6.3593063	29.3579012
10 ppm	10.56414299	6.77590546	46.94432166
20 ppm	8.855979058	5.92460669	22.98375379
50 ppm	7.065391361	4.63958767	23.75104357

**Tabla 14.** Resultados de Velocidades de Corrosión [mpy], obtenidas mediante Rp de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

Velocidades de Corrosión en [mpy] obtenidas mediante Rp, para un acero APIX 52, en agua de mar sintética, aireada

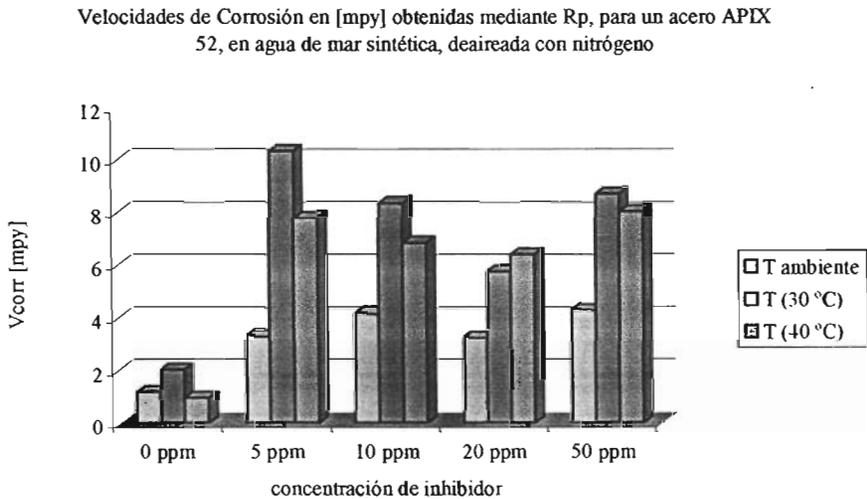


**Gráfica 25.** V<sub>corr</sub> obtenidas mediante Rp, de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

Agua de Mar sintética deaireada con Nitrógeno

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	1.189241103	2.02084767	0.955200444
5 ppm	3.335233055	10.3622452	7.839239929
10 ppm	4.192386654	8.39871037	6.8875271
20 ppm	3.295613855	5.78208839	6.432686885
50 ppm	4.329187954	8.74832146	8.072125575

Tabla 15. Resultados de Velocidades de Corrosión [mpy], obtenidas mediante Rp de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con Nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.



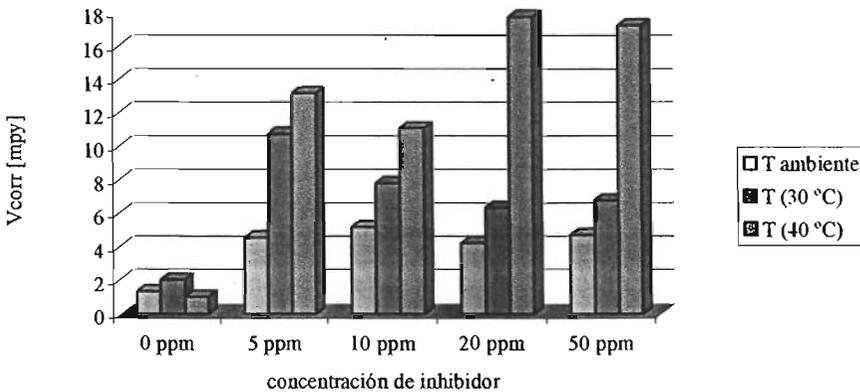
Gráfica 26. V<sub>corr</sub> obtenidas mediante Rp, de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

### Agua de Mar con Secuestrante de oxígeno (Sulfito de Sodio)

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	1.315849768	2.03522217	1.004657457
5 ppm	4.567838708	10.7516269	13.15325031
10 ppm	5.192677973	7.8439006	11.11806809
20 ppm	4.227011043	6.38666992	17.77133729
50 ppm	4.721498557	6.81949042	17.2455764

**Tabla 16.** Resultados de Velocidades de Corrosión [mpy], obtenidas mediante Rp de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con Sulfito de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

Velocidades de corrosión en [mpy] obtenidas mediante Rp, para un acero APIX 52, en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno (sulfito de sodio)



**Gráfica 27.**  $V_{\text{corr}}$  obtenidas mediante Rp, de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

Si se tiene una resistencia a la polarización alta se obtienen velocidades de corrosión bajas, por lo tanto en el sistema aireado a 0 ppm (sin inhibidor) (Gráfica 25), en general tiene las  $V_{\text{corr}}$  más

bajas, pero con inhibidor el mejor resultado se tiene a 50 ppm a 30 °C, también se ve que a 40 °C con las pruebas que tienen inhibidor la  $V_{corr}$  se dispara muy alto.

En la gráfica 26, que es para el sistema de aireado con nitrógeno, las  $V_{corr}$  menores se dan a las diferentes temperaturas, sin inhibidor, y con inhibidor los mejores resultados de  $V_{corr}$  más altos se dan a 30 °C.

Para el sistema de aireado con sulfito de sodio (Gráfica 27), las  $V_{corr}$  menores se dan sin inhibidor (0 ppm) y a las tres temperaturas, siendo la más baja a 40 °C, sin inhibidor. Las  $V_{corr}$  bajas se dan a temperatura ambiente y sobre todo a 20 ppm, y los valores grandes se registraron a 40 °C, y a las concentraciones 20 ppm y 50 ppm. Comparando los resultados obtenidos con y sin inhibidor, los mejores resultados se tienen a temperatura ambiente cuando el sistema es de aireado con nitrógeno.

#### **6.4 CURVAS DE POLARIZACIÓN DE UN ACERO APIX-52, EN AGUA DE MAR SINTÉTICA CON Y SIN OXÍGENO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y CONCENTRACIONES DE INHIBIDOR.**

Para saber como es el mecanismo del inhibidor si es catódico, anódico o mixto, se toma como referencia las curvas de polarización registradas en los sistemas sin inhibidor a las diferentes temperaturas en las que fue evaluado el mismo.

En la gráfica 13, el sistema aireado a temperatura ambiente, se observan las cuatro curvas de las distintas concentraciones de inhibidor (5, 10, 20 y 50 ppm) las cuales se desplazan hacia la derecha, lo que quiere decir el acero se corroe por la presencia de oxígeno, en 5 y 10 ppm, se desplazan anódicamente, y para 20 ppm y 50 ppm se desplazan catódicamente.

Para 30 °C, aireado (Gráfica 14), la curva de 5 ppm se desplaza a la izquierda, por lo cual el inhibidor presenta un comportamiento mixto, a 10 ppm, 20 ppm y 50 ppm se desplazan anódicamente, a su vez a 10 ppm se desplaza a la izquierda disminuyendo  $t_{corr}$ .

A 40 °C, aireado (Gráfica 15), a 5 ppm y 50 ppm se desplaza un poco a la derecha, y a 5 ppm y 20 ppm las curvas se desplazan hacia la izquierda y anódicamente.

Para la gráfica 16, deaireada con nitrógeno a temperatura ambiente las curvas para todas las concentraciones de inhibidor, se desplazaron hacia la derecha y anódicamente, teniendo el mismo comportamiento a 30 °C (Gráfica 17) y 40 °C (Gráfica 18).

El comportamiento para el sistema con secuestrante de oxígeno (sulfito de sodio) a temperatura ambiente y 30 °C (Gráfica 19 y 20 respectivamente) es el mismo, las curvas obtenidas se desplazan hacia la derecha y anódicamente.

Para 40 °C, gráfica 21, a 5 ppm, 10 ppm y 50 ppm se desplazan hacia la derecha anódicamente y a 20 ppm se desplaza ligeramente a la izquierda y anódicamente.

#### 6.4.1 Tablas y Gráficas de Velocidades de Corrosión obtenidas por Extrapolación de Tafel, de un acero APIX-52, en agua de mar sintética con y sin oxígeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor

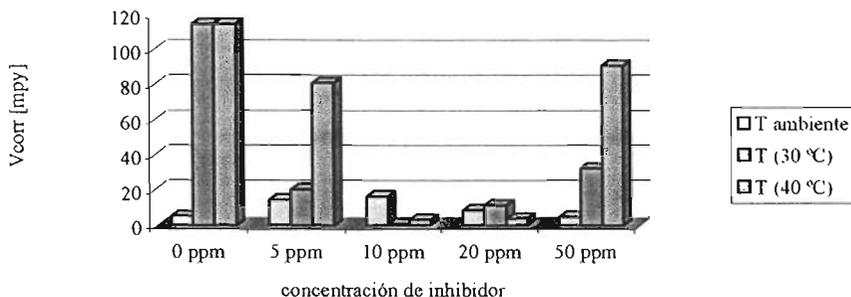
En la parte de resultados se obtuvieron las  $v_{\text{corr}}$  para cada sistema (Tablas 11, 12, 13 y Gráficas 22, 23, 24), como la  $v_{\text{corr}}$  es directamente proporcional a la  $V_{\text{corr}}$ , ésta es la razón por la cual voy hacer el análisis solamente de  $V_{\text{corr}}$ , la cual se obtiene por la fórmula vista en el apartado 5.3.

#### Agua de Mar en presencia de oxígeno

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	5.12421371	114.716856	114.716856
5 ppm	14.4419965	20.3998622	81.2133143
10 ppm	16.2041865	0.57494623	3.01736073
20 ppm	8.50407799	11.4716856	3.6276655
50 ppm	4.56696028	32.3316028	91.1228374

**Tabla 17.** Resultados de velocidades de corrosión [mpy], obtenidas por Extrapolación de Tafel de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

Velocidades de corrosión en [mpy] obtenidas mediante Extrapolación de Tafel, para un acero APIX 52, en agua de mar sintética, aireada

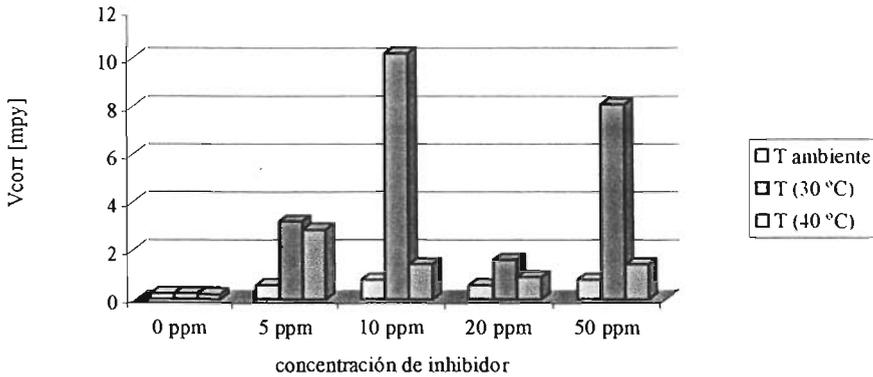


**Gráfica 28.** V<sub>corr</sub>, obtenida mediante Extrapolación de Tafel, para un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, aireada, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor. **Agua de Mar Deaireada con Nitrógeno**

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	0.22889022	0.22889022	0.20399862
5 ppm	0.57494623	3.23316028	2.88155713
10 ppm	0.81213314	10.2241505	1.44419965
20 ppm	0.57494623	1.62041865	0.91122837
50 ppm	0.81213314	8.12133143	1.44419965

**Tabla 18.** Resultados de velocidades de corrosión [mpy], obtenidas por Extrapolación de Tafel de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con Nitrógeno a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

Velocidades de corrosión en [mpy] obtenidas mediante Extrapolación de Tafel, para un acero APIX 52, en agua de mar sintética, deaireada con Nitrógeno



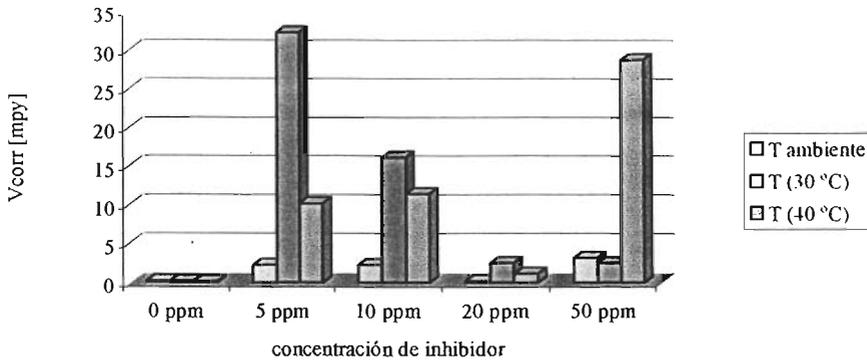
**Gráfica 29.**  $V_{corr}$ , obtenida mediante Extrapolación de Tafel, para un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, deaireada con nitrógeno, a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

**Agua de Mar Deaireada con Sulfito de Sodio**

Concentración de inhibidor	T ambiente	T (30 °C)	T (40 °C)
0 ppm	0.22889022	0.22889022	0.14441996
5 ppm	2.28890219	32.3316028	10.2241505
10 ppm	2.28890219	16.2041865	11.4716856
20 ppm	0.22889022	2.56819049	1.14716856
50 ppm	3.23316028	2.56819049	28.8155713

**Tabla 19.** Resultados de velocidades de corrosión [mpy], obtenidas por Extrapolación de Tafel de un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

Velocidades de corrosión en [mpy] obtenidas mediante Extrapolación de Tafel, para un acero APIX 52, en agua de mar sintética, con Secuestrante de Oxígeno (Sulfito de Sodio)



**Gráfica 30.**  $V_{corr}$ , obtenida mediante Extrapolación de Tafel, para un acero APIX-52, sumergido en agua de mar sintética, con secuestrante de oxígeno ( $Na_2SO_3$ ), a diferentes temperaturas y concentraciones de inhibidor.

Para el sistema aireado (Gráfica 28), la  $V_{corr}$  más baja se registró a 30 °C a una concentración de 10 ppm de inhibidor de corrosión, a 0 ppm  $V_{corr}$  aumenta con la temperatura, lo cual pasa también a 40°C con 5 ppm y 50 ppm.

En la gráfica 29, en el sistema deaireado con nitrógeno, los valores más pequeños de  $V_{corr}$  se tienen a las diferentes temperaturas de estudio a 0 ppm (sin inhibidor), los valores de  $V_{corr}$  más pequeños se dan a 5 ppm y 20 ppm y los valores más altos de  $V_{corr}$  se dan a 30 °C a todas las concentraciones de inhibidor.

Al sistema con secuestrante de oxígeno (sulfito de sodio), (Gráfica 30) los valores más pequeños de  $V_{corr}$  se dan a las tres temperaturas sin inhibidor, y con inhibidor es a temperatura ambiente a 20 ppm, para los sistemas con inhibidor las  $V_{corr}$  más altas son los registrados a 30 °C, excepto en el caso de 50 ppm a 40 °C.

## 6.5 EVALUACIÓN DE UN INHIBIDOR

Un método para determinar la eficiencia de un inhibidor es obteniendo el porcentaje de eficiencia, el cual se calcula a partir de la  $i_{\text{corr}}$  con inhibidor y sin inhibidor, obtenidas mediante la Extrapolación de Tafel de las Curvas de Polarización, la ecuación es:

$$\% \eta = \frac{i_{\text{corr s/i}} - i_{\text{corr c/i}}}{i_{\text{corr s/i}}} * 100$$

donde:

$\eta$  = eficiencia

$i_{\text{corr s/i}}$  = densidad de corriente de corrosión sin inhibidor

$i_{\text{corr c/i}}$  = densidad de corriente de corrosión con inhibidor

Para el sistema aireada a temperatura ambiente y 5 ppm de inhibidor:

$$\% \eta = \frac{0.0112 - 0.0316}{0.1122} * 100 = -18.1838$$

Para el sistema desaireado con Nitrógeno a temperatura ambiente y 5 ppm de inhibidor:

$$\% \eta = \frac{0.0005 - 0.0012}{0.0005} * 100 = -151.1881$$

Para el sistema desaireado con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a temperatura ambiente y 5 ppm de inhibidor:

$$\% \eta = \frac{0.0005 - 0.0050}{0.0005} * 100 = -899.9940$$

A partir de las velocidades de corrosión, se puede notar que la eficiencia del inhibidor es baja por lo cual sólo presento el cálculo de  $\% \eta$  de tres sistemas como un ejemplo.

## 6.6 EFECTO DE LA TEMPERATURA

Para la prueba de estabilización de potencial a circuito abierto, y de acuerdo a los resultados obtenidos se puede mencionar, de manera general, que en todos los sistemas el potencial va aumentando conforme aumenta la temperatura, por lo cual los valores se van haciendo más negativos.

En las pruebas de resistencia a la polarización, para el sistema con secuestrante de oxígeno ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), conforme aumenta la temperatura van disminuyendo los valores de  $R_p$ , para el sistema deaireado con nitrógeno, los valores disminuyen con respecto a los valores a temperatura ambiente, y a 40 °C, los valores aumentan, pero siguen siendo menores que a temperatura ambiente. En el sistema con oxígeno los valores más altos son a 30 °C, disminuyen a temperatura ambiente y a 40 °C disminuyen aún más.

Los resultados de curvas de polarización que se van a analizar son los de  $t_{\text{corr}}$  ya que se puede ver mejor este efecto, donde los valores del sistema aireado van aumentando conforme se aumenta la temperatura, y en los sistemas donde se eliminó el oxígeno los valores más bajos se dan a temperatura ambiente, seguido de los valores a 40 °C y a 30 °C se tienen los valores de  $t_{\text{corr}}$  más altos. Otra información que se puede ver con esta técnica es cómo se desplazan tanto los potenciales de corrosión como la  $t_{\text{corr}}$ , cuando la superficie metálica es afectada ya sea por el inhibidor, por la concentración de oxígeno o bien la temperatura.

## 6.7 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN

En la estabilización de potencial a circuito abierto, se puede decir de forma muy general, que conforme se va aumentando la concentración de inhibidor, aumentan los valores de potencial y este efecto es el mismo para los sistemas con oxígeno y sin oxígeno, y además no hay mucha diferencia con los valores cuando no hay presencia de inhibidor.

En  $R_p$  en el sistema aireado sin presencia de inhibidor se tienen valores grandes a comparación de cuando se tiene inhibidor excepto a 30 °C, que los valores aumentan conforme

aumenta la concentración, y a temperatura ambiente y a 40 °C a 5 ppm se tienen valores menores que sin inhibidor, pero en cuanto se aumenta la concentración, aumentan los valores de Resistencia a la Polarización.

En los sistemas sin oxígeno se tienen valores demasiado grandes sin inhibidor y a 5 ppm los valores disminuyen y conforme aumenta la concentración aumentan los valores de  $R_p$ , pero en los dos sistemas los valores a 20 ppm son mayores que los valores a 50 ppm.

Para Curvas de Polarización, en el sistema aireado los valores grandes se tienen sin inhibidor a 5 ppm y a 50 ppm, y los valores disminuyen a 10 ppm y 20 ppm.

En los sistemas sin oxígeno se tienen valores muy pequeños sin inhibidor y conforme se aumenta la concentración, se aumentan las  $t_{corr}$ , excepto a 20 ppm donde los valores disminuyen.

## 6.8 EFECTO DEL OXÍGENO

Para las pruebas de estabilización de potencial a circuito abierto, con oxígeno presente en el sistema, se tienen valores de  $E_{corr}$ , ligeramente más positivos que los valores obtenidos de los sistemas sin oxígeno.

Comparando los sistemas sin oxígeno, en donde se utilizó el secuestrante de oxígeno ( $Na_2SO_3$ ), tiene los valores ligeramente más altos de  $E_{corr}$ .

En  $R_p$  se presenta el mismo comportamiento que en la prueba de estabilización de potencial a circuito abierto, para el sistema aireado. Pero en este caso los valores más altos se tienen para el sistema deaireado con Nitrógeno.

En el caso de Curvas de Polarización, el sistema con oxígeno presenta los valores más altos de  $t_{corr}$ , seguido del sistema con secuestrante de oxígeno ( $Na_2SO_3$ ) y después el sistema deaireado con Nitrógeno.

**CAPÍTULO VII.-**

**CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

---

De acuerdo a los resultados y al análisis realizado en este trabajo de investigación se llega a las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación mediante las técnicas electroquímicas de  $R_p$ , curvas de polarización, así, como la medición del potencial a circuito abierto, muestran que de esta manera se puede conocer cómo el inhibidor de corrosión, al igual que las variables como la temperatura y la concentración de oxígeno, afectan directamente el proceso de la corrosión metálica presentado en el acero APIX-52.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, el inhibidor de corrosión comercial AT-3026 recomendado para estas condiciones ambientales, favorece en la corrosión de éste material.
- El estudio electroquímico para evaluar al inhibidor de corrosión AT-3026 sobre el acero APIX-52, muestra que ésta sustancia no contribuye en la protección de éste acero, por lo que no se puede determinar el tipo de mecanismo del inhibidor.
- Al aumentar la concentración del inhibidor, éste contribuye en el aumento de la corrosión.
- La presencia de oxígeno en el sistema favorece a la corrosión del acero, por lo tanto, la ausencia de éste favorece a la disminución de la corrosión.
- La remoción del oxígeno más eficiente es la inyección de nitrógeno al sistema (forma mecánica).
- La velocidad de corrosión del acero APIX-52, se incrementa al aumentar la temperatura, en el sistema en presencia y ausencia de oxígeno.

**CAPÍTULO VIII.-**

**BIBLIOGRAFÍA**

---

**Referencias**

---

1. [www.corrosioncost.com](http://www.corrosioncost.com)
2. Control of Internal Corrosion of Pipelines Carrying Refined Petroleum Products, Nathan, C. C., Corrosion Inhibitors, Fifth Printing, NACE International, Houston, p89-94 (1981).
3. Control of Internal Corrosion of Pipelines Carrying Crude Oil, Nathan, C.C., Corrosion Inhibitors Fifth Printing, NACE International, Houston, p95 (1981).
4. Scope and Importance of Inhibitor Technology, Hamner, Norman E., Nathan, C.C., Corrosion Inhibitors, Fifth Printing, NACE International, Houston, , p1-6 (1981).
5. Corrosion Basics An Introduction, National Association of Corrosion Engineers, An Official NACE Publication, Houston, Chapter 7, p127-146 (1984).
6. Malo, T. J., Inhibidores de la Corrosión, Protección Anticorrosivo de las Estructuras de Acero, Instituto Mexicano de la Construcción en Acero A.C., Capítulo V.
7. Schweitzer, P. A., Corrosion and Corrosion Protection Handbook, Second Edition, Marcel Dekker, Inc., New York, p1-652 (1989).
8. Galvele, R. J., Corrosión, Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Washington, D.C., p 75-77 (1979).
9. ASM Handbook, Corrosion V.13, ASM International, U. S. A., p214-220.
10. Theoretical Aspects of Corrosion Inhibitors and Inhibition, Riggs, Olen L. Jr., Nathan, C.C., Corrosion Inhibitors, Fifth Printing, NACE International, Houston, p7-27 (1981).
11. Brubaker R. G. and Phipps P. B., Corrosion Chemistry, American Chemical Society, Washington, p 262-277 (1979).
12. Methods of Evaluation and Testing of Corrosion Inhibitors, Schaaschl, E., Nathan C.C., Corrosion Inhibitors, Fifth Printing, NACE International, Houston, p28-41 (1981).
13. Fontana, M. G. and Greene, Norbert D., Corrosion Engineering, Second Edition, McGraw-Hill, Singapore, p44, 106, 107, 117, 118 (1978).
14. Kusnetsop, N. Y., Mixed Inhibitors and some aspects of synergism in corrosion inhibition. Institute of Physical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow.
15. Sheir, L.L., Corrosion Volume 1, Metal/Environment Reactions, Newnes-Butterworths, p1:3-1:15.

16. Altos Hornos de México, S.A., Manual AHMSA para Ingenieros, Primera Edición, AHMSA, México, p1-9, 1-10 (1970).
17. Genescá, J./Ávila, J., Más allá de la herrumbre, Segunda reimpresión, La Ciencia desde México, México, p98-103 (1996).
18. Raman A. and Labine P., Reviews on Corrosion Inhibitors Science and Technology, Vol. 2, NACE International, Houston, pIII-1 a III-12 (1996).

## Normas

- ASTM G-59

Test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements.

- ASTM G-102

Practice for calculation corrosion rates and related information from electrochemical measurements.

- ASTM D 1141-98

Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water.