

Universidad Autónoma De Baja California

Instituto de Ingeniería

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



“Estudio del Mecanismo de Inhibición de Corrosión Galvánica en Pares Acero al Carbono - Cobre en Solución Acuosa”

TESIS

Que para obtener el grado

Doctor en Ingeniería

Presenta:

Irene Carrillo Salgado

Director

Dr. Benjamín Valdez Salas

Co-directora

Dra. Mónica Carrillo Beltrán

Mexicali, Baja California

Agosto 2012

“Estudio del Mecanismo de Inhibición de Corrosión Galvánica en Pares Acero al Carbono - Cobre en Solución Acuosa”

Agosto, 2012

Resumen

En el presente trabajo se evaluó el desempeño y se investigó el mecanismo de inhibición de corrosión del molibdato de sodio (Na_2MoO_4) en combinación con diferentes sales oxoácidas: nitrito de sodio (NaNO_2), fosfato disódico (Na_2HPO_4) y metasilicato de sodio (Na_2SiO_3) para prevenir y controlar la corrosión galvánica del par cobre - acero al carbono en solución acuosa. Los oxoaniones producidos al añadir estas sales en solución acuosa, se caracterizan por sus propiedades inhibitoras de corrosión interactuando en la interfase metal-solución. El molibdato de sodio es considerado un agente no tóxico y efectivo como inhibidor de corrosión. Sin embargo, tiene la característica de ser un oxidante débil, lo que puede representar una desventaja en el proceso de inhibición bajo ciertas condiciones, mientras que en otras, el proceso de inhibición de corrosión galvánica, puede tener un comportamiento de alta eficacia. El desempeño de las diferentes formulaciones de inhibidores de corrosión fue evaluado mediante técnicas electroquímicas potenciodinámicas y potencioestáticas. La caracterización de la película protectora formada en la superficie del metal se llevó a cabo mediante análisis de superficie tales como microscopía óptica, Microscopía de Barrido Electrónico acoplado a la Espectroscopia de Electrones Dispersados de rayos X (SEM – EDS), y por espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS). A través del estudio del comportamiento electroquímico, cinético y mecanismo de acción de los inhibidores de corrosión ensayados, se logró optimizar una formulación para prevenir y controlar la corrosión galvánica en diferentes condiciones de flujo y temperatura.

Palabras clave: corrosión galvánica, inhibidor de corrosión, acero al carbono, cobre, molibdato de sodio, sales oxoácidas.

ÍNDICE

Resumen	II
Lista de Figuras	VI
Lista de Tablas	X
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	2
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	
CAPITULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1 Corrosión Galvánica	6
2.2 Mecanismo y factores que afectan la corrosión galvánica.	6
2.2.1 Diferencia de potencial electroquímico de los dos metales.	7
2.2.2. Polarización	8
2.2.3 Naturaleza del Ambiente	8
2.2.3.1. Diagrama potencial – pH del hierro – agua	10
2.2.4 Efectos de la relación de área en contacto, distancia y geometría de los metales	12
2.3 Control de corrosión galvánica mediante la aplicación de inhibidores de corrosión.	13
2.4 Clasificación de los Inhibidores de corrosión.	14
2.4.1 Efecto de los inhibidores de corrosión en las reacciones electroquímicas parciales.	14
2.4.2 Inhibidores de corrosión por campo de aplicación	15
2.4.3 Inhibidores por mecanismo de reacción.	16
2.5. Aspectos termodinámicos y electroquímicos en la aplicación de inhibidores de corrosión	17
2.6 Interfase electrodo – electrolito: doble capa electroquímica.	18
2.6.1 Distribución de carga	19
2.6.2 Análogo de la doble capa electroquímica	19
2.6.3 Modelos de la doble capa	20
2.6.3.1 Modelo de Helmholtz	20
2.6.3.2 Modelo de Goy – Chapman.	21
2.6.3.3 Modelo de Stern.	22

2.7 Equilibrio químico en la interfase oxido - electrolito	24
2.8 Transición del estado activo al estado pasivo.	25
2.8.1 Estructura de películas pasivas	27
2.8.2 Composición química de las películas pasivas	27
2.9 Propiedades electrónicas de los óxidos	28
2.10 Influencia de los productos de corrosión	29
2.11 Campos de aplicación de Inhibidores de corrosión en soluciones acuosas	30
2.12 Factores influenciables en la aplicación de inhibidores de corrosión en soluciones acuosas.	31
2.13 Elección de un inhibidor de corrosión	33
2.15 Descripción de las características de los inhibidores inorgánicos.	34
2.15.1 Molibdato de sodio	34
2.15.2 Nitrito de sodio	42
2.15.3 Fosfatos	44
2.15.4 Silicatos	46
2.16 Métodos de evaluación en el estudio de los inhibidores de corrosión.	48
2.16.1 Métodos de análisis superficial	49
2.16.2 Tipos de ensayos de Corrosión	51
2.16.3 Ensayos electroquímicos	52
CAPÍTULO 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	57
3.1 Metodología	58
3.2 Detalles experimentales	60
3.3 Experimentación desarrollada	62
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
4.1 Estudio electroquímico de cobre y acero en soluciones acuosas inhibidas por polarización potenciodinámica	65
4.2 Análisis electroquímico del par galvánico cobre – acero al carbono en soluciones acuosas inhibidas utilizando la técnica de polarización potenciodinámica.	67
4.3 Análisis electroquímico del par galvánico cobre – acero al carbono en soluciones acuosas inhibidas utilizando la técnica de polarización cíclica.	69
4.4 Voltametría cíclica aplicada al par galvánico acero al carbono – cobre en soluciones acuosas inhibidas	72

4.5 Análisis electroquímico del par galvánico cobre – acero al carbono en soluciones acuosas inhibidas utilizando la espectroscopia de impedancia electroquímica.	76
4.6 Análisis del par galvánico cobre y acero por polarización potenciodinámica a 25 °C, 77 °C, solución estancada y bajo flujo, en los diferentes inhibidores multicomponentes.	85
4.7 Medición de la concentración de los inhibidores de corrosión por espectroscopia UV-Visible después de los ensayos electroquímicos.	90
4.8 Medición de la corriente galvánica en presencia de inhibidores de corrosión mediante amperometría de resistencia cero.	91
4.9 Análisis superficial por SEM-EDX.	94
4.10 Análisis superficial XPS	105
Conclusiones	112
Referencias bibliográficas	116
ANEXOS	122
Anexo I. Diagrama de Pourbaix del molibdeno en H ₂ O a 25 °C	123
Anexo II. Energías de enlace (en eV) de Mo 3d, Fe 2p y O1s, para varios óxidos de molibdeno y hierro	124
Anexo III. Publicación `` <i>Corrosion Inhibition of the Galvanic Couple Copper – Carbon Steel in Reverse Osmosis Water</i> ``	125
Anexo IV. Publicación `` <i>Electrochemical Study of Oxyanions Effect on Galvanic Corrosion Inhibition</i> ``	132
Agradecimientos	146

Lista de Figuras

2.1	Diagrama de corrosión galvánica en solución acuosa.	6
2.2	Curvas de polarización de los Metales 1 y 2, analizadas para predecir su comportamiento en un par galvánico.	8
2.3	Diagrama de Pourbaix (E-pH) del Hierro en agua a 25°C.	11
2.4	Diagrama de Pourbaix del sistema Fe-H ₂ O a 25 C. $\alpha_{\text{Fe}^{+2}} = \alpha_{\text{Fe}^{+3}} = 1$.	11
2.5	Efecto en la curvas de polarización sobre el valor de la corriente (a) el área del ánodo es de 10 cm ² y el área del cátodo de 1 cm ² , (b) el área del cátodo es de 10 cm ² y del ánodo de 1 cm ² .	12
2.6	Clasificación de los inhibidores de corrosión.	14
2.7	Diagramas de Evans que muestran el cambio del potencial de corrosión debido a la presencia de inhibidores anódico, catódico o mixto.	15
2.8	Doble capa electroquímica (a) en la interfase metal - electrolito en la presencia de aniones quimiadsorbidos (b) Variación de la densidad de electrones respecto a la distancia de la superficie de un metal.	18
2.9	Circuito electrónico equivalente.	20
2.10	Modelo de Helmholtz (a) de la doble capa eléctrica y (b) la distribución de carga.	21
2.11	Modelo de Gouy – Chapman de la doble capa electroquímica.	22
2.12	El modelo de Stern.	22
2.13	Cambio de la densidad de carga a través de la capa difusa en el modelo de Stern	23
2.14	Interfase electrodo – óxido (a) óxido neutral (b) óxido cargado positivamente (c) óxido cargado negativamente.	24
2.15	Valores numéricos de puntos isoeléctricos de diferentes óxidos.	24
2.16	Curva de polarización del acero inoxidable Fe-17Cr en 0.5 M H ₂ SO ₄ .	26
2.17	Variación de la densidad de corriente anódica parcial frente al potencial para la pasivación de un metal	26
2.18	Imagen de STM ex situ con resolución atómica de la superficie de la película pasiva formada sobre hierro por polarización anódica en solución amortiguadora de borato de pH 8.4.	27
2.19	Banda de energía de diferentes óxidos semiconductores y potenciales estándar de la reacciones redox de transferencia de electrones.	29
2.20	Estructura de (a) Molibdato de sodio (b) Ion molibdato.	34
2.21	Efecto del molibdato de sodio en la velocidad de corrosión real y potencial del acero en solución de Na ₂ SO ₄ 0.1 N.	40
2.22	Efecto del molibdato de sodio en la disolución anódica del acero en solución buffer carbonato-bicarbonato (pH=9).	41
2.23	Efecto del NaNO ₂ sobre la corrosión del acero en electrolitos 30 mg/l NaCl + 70 mg/l Na ₂ SO ₄ .	43
2.24	Velocidad de disolución real del acero en función del potencial en presencia del nitrito de sodio en 0.1 N Na ₂ SO ₄ .	44

2.25	Efecto de la adición de fosfatos a una solución de Na_2SO_4 0.1N, en la velocidad de corrosión y potencial del acero.	45
2.26	Velocidad de corrosión del acero, en función de la concentración de silicato de sodio en solución de Na_2SO_4 0.1 N.	47
2.27	Diagrama corriente – potencial de la técnica polarización cíclica.	53
2.28	Voltamperograma potencial – corriente de la técnica de voltamperometría cíclica.	54
2.29	Similitud de (a) la interface electrificada con (b) un circuito equivalente correspondiente al espectro de impedancia.	55
3.1	Diagrama de flujo de actividades para el estudio del mecanismo de inhibición de corrosión del par galvánico cobre-acero al carbono con molibdato en solución acuosa	59
3.2	Superficies preparadas de acuerdo al estándar G1 ASTM, (a) acero al carbono y (b) cobre	61
4.1	Polarización potenciodinámica de electrodos de cobre y acero por separado a 25 °C y 77 °C en soluciones acuosas inhibidas	65
4.2	Diagramas corriente – potencial de la polarización potenciodinámica aplicada al par galvánico cobre – acero al carbono en presencia de inhibidores de corrosión a 25 °C y 77 C°.	67
4.3	Diagramas corriente – potencial de la polarización cíclica aplicada al par galvánico cobre – acero al carbono en el blanco, Na_2MoO_4 y $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{NaNO}_2$ a 25 °C y 77 C°.	69
4.4	Diagramas corriente – potencial de la polarización cíclica aplicada al par galvánico cobre – acero al carbono en presencia de $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{NaNO}_2$ y $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ a 25 °C y 77 C°.	70
4.5	Diagramas corriente – potencial de la polarización cíclica aplicada al par galvánico cobre – acero al carbono en presencia de $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ a 25 °C y 77 C°.	71
4.6	Voltametría cíclica del par galvánico cobre - acero al carbono en presencia de MoO_4^{2-} .	73
4.7	Voltametría cíclica del par galvánico cobre - acero al carbono en presencia de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{NO}_2^-$.	74
4.8	Voltametría cíclica del par galvánico cobre - acero al carbono en presencia de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{HPO}_4^{2-}$ y $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-}$.	75
4.9	Resistencia nominal a la polarización de acero al carbono (CS), cobre (Cu) y del par galvánico (Cu-CS) a 25 °C y 77 °C en presencia de 200 ppm de Na_2MoO_4 en solución estancada y velocidad de flujo de 1200 rpm.	76
4.10	Diagrama de Nyquist del par galvánico a 25 °C y a 77 °C en 200 ppm de Na_2MoO_4 en solución estancada y a 1200 rpm de velocidad de flujo y el circuito equivalente propuesto.	77
4.11	Resistencia a la polarización del acero al carbón , cobre y del par galvánico a 25 °C y 77 °C en presencia de $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{NaNO}_2$ en solución estancada y 1200 rpm de velocidad de flujo	78
4.12	Diagrama de Nyquist del par galvánico a 25 °C y a 77 °C en $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{NaNO}_2$ en solución estancada y a 1200 rpm de velocidad de flujo. Circuito equivalente propuesto para este sistema.	79
4.13	Resistencia a la polarización del acero al carbono, cobre y el par galvánico en presencia de $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ en solución estancada y 1200 rpm. Diagrama de Nyquist del par galvánico a 25 °C y a 77 °C en $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ en solución estancada y a 1200 rpm.	80

4.14	Resistencia a la polarización del acero al carbono (CS), cobre (Cu) y el par galvánico en presencia de $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{NaSiO}_3$ en solución estancada y 1200 rpm de velocidad de flujo. Diagrama de Nyquist del par galvánico a 25 °C y a 77 °C en $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{NaSiO}_3$ en solución estancada y a 1200 rpm de velocidad de flujo	81
4.15	Circuito equivalente para el par galvánico en los sistemas $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ y $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{Na}_2\text{SiO}_3$.	82
4.16	Diagrama de Nyquist del par galvánico a 25 °C y a 77 °C en $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{NaSiO}_3 + \text{NO}_2$ en solución estancada y a 1200 rpm de velocidad de flujo.	84
4.17	Diagrama de Nyquist del par galvánico a 25 °C y a 77 °C en $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{NO}_2$ en solución estancada y a 1200 rpm de velocidad de flujo	85
4.18	Diagrama corriente – potencial de la polarización potenciodinámica subsecuente a la espectroscopia de impedancia aplicada al par galvánico cobre – acero al carbono, en presencia de inhibidores de corrosión a temperatura ambiente	86
4.19	Diagrama corriente – potencial de la polarización potenciodinámica subsecuente a la espectroscopia de impedancia aplicada al par galvánico cobre – acero al carbono, en presencia de inhibidores de corrosión a 77 °C.	87
4.20	Resistencia a la polarización y velocidad de corrosión calculada de las técnicas electroquímicas de impedancia inicial, polarización potenciodinámica e impedancia final del par galvánico cobre- acero al carbono en presencia de diferentes formulaciones de inhibidores de corrosión	89
4.21	Superficies expuestas a la secuencia de impedancia inicial, polarización potenciodinámica e impedancia final, en presencia de diferentes formulaciones de inhibidores de corrosión.	89
4.22	Curva de calibración para determinar la concentración del MoO_4^{2-} por espectroscopia UV-visible. La técnica empleada fue la de catecol (0.02 M) + bisulfito de sodio (0.14 M).	90
4.23	Porcentaje de la concentración inicial en las soluciones ensayadas, al finalizar la secuencia de las técnicas electroquímicas.	91
4.24	Diagrama de la densidad de corriente – tiempo de la medición amperométrica del par galvánico en soluciones acuosas inhibidas a 25 °C.	92
4.25	Diagrama de la densidad de corriente – tiempo de la medición amperométrica del par galvánico en soluciones acuosas inhibidas a 77 °C.	92
4.26	Superficie de los metales del par galvánico en agua tratada en ausencia de inhibidores de corrosión (a) acero al carbono y (b) cobre	94
4.27	SEM y EDX del de acero al carbono (blanco) después de 5 días a 77 °C	94
4.28	Superficie expuesta del acero al carbono galvánicamente acoplado al cobre en presencia de 200 ppm de MoO_4^{2-} a 25 °C.	95
4.29	Microscopias de la superficie expuesta del acero al carbono galvánicamente acoplado al cobre en presencia de 200 ppm de MoO_4^{2-} a 77 °C	95
4.30	Micrografía y EDS del cobre en el sistema de 200 ppm MoO_4^{2-} .	96
4.31	Micrografía y EDS del acero al carbono en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{NO}_2^-$ (180:120 ppm) a 25 °C.	96

4.32	Micrografía y EDS del acero al carbono en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{NO}_2^-$ (180:120 ppm) a 77 °C.	97
4.33	Micrografía y EDS del cobre en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{NO}_2^-$ (180 : 120 ppm) a 77 °C.	98
4.34	Micrografía y EDS del acero al carbono en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{HPO}_4^{2-}$ (180 : 120 ppm) a 25 °C	98
4.35	Micrografía y EDS del cobre en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{HPO}_4^{2-}$ (180 : 120 ppm) a 25 °C	99
4.36	Micrografía y EDS del acero al carbono en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{HPO}_4^{2-}$ (180 : 120 ppm) a 77 °C.	99
4.37	Micrografía y EDS del acero al carbono en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{HPO}_4^{2-}$ (180 : 120 ppm) a 77 °C.	100
4.38	Micrografía y EDS del acero al carbono en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-}$ (180 : 120 ppm) a 25 °C.	100
4.39	Micrografía y EDS del cobre en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-}$ (180 : 120 ppm) a 25 °C.	101
4.40	Micrografía y EDS del acero al carbono en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-}$ (180 : 120 ppm) a 77 °C	101
4.41	Micrografía y EDS del cobre en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-}$ (180 : 120 ppm) a 77 °C.	102
4.42	Micrografía y EDS del acero al carbono en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-} + \text{NO}_2^-$ (150 : 100 : 50 ppm) a 25 °C.	102
4.43	Micrografía y EDS del cobre en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-} + \text{NO}_2$ (150 : 100 : 50 ppm) a 25 °C	103
4.44	Micrografía y EDS del acero al carbono en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-} + \text{NO}_2$ (150 : 100 : 50 ppm) a 77 °C.	103
4.45	Micrografía y EDS del cobre en el sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-} + \text{NO}_2$ (150 : 100 : 50 ppm) a 77 °C.	104
4.46	Espectro de los análisis de XPS aplicados a la superficie de acero al carbono acoplada al cobre, en presencia del sistema de inhibición de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-}$, 180 : 120 ppm, a 77 °C.	105
4.47	Espectros de XPS (a) Fe 2p y (b) O1s, del acero al carbono expuesto al sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-}$, 180 : 120 ppm, a 77 °C.	107
4.48	Espectros de XPS (a) Mo 3d y (b) Si 2s, del acero al carbono expuesto al sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-}$, 180 : 120 ppm, a 77 °C.	107
4.49	Espectro de los análisis de XPS aplicados a la superficie de acero al carbono acoplada al cobre, en presencia del sistema de inhibición de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-} + \text{NO}_2$, 150 : 100 : 50 ppm, a 77 °C.	108
4.50	Espectros de XPS (a) Fe 2p y (b) O1s, del acero al carbono expuesto al sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-} + \text{NO}_2^-$, 180 : 120 ppm, a 77 °C.	110
4.51	Espectros de XPS (a) Mo 3d y (b) Si 2s, del acero al carbono expuesto al sistema de $\text{MoO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-} + \text{NO}_2^-$, (150 : 100 : 50 ppm), a 77 °C	110

Lista de Tablas

2.1	Potencial estándar electroquímico vs potencial del electrodo estándar de hidrógeno.	7
2.2	Iones generados dependiendo del estado del metal.	25
2.3	Guía general de efectividad de inhibidores de corrosión, en soluciones acuosas en un rango de pH de 6 a 9.	33
2.4	Propiedades de protección del nitrito de sodio en función de la concentración de cloruro de sodio.	42
2.5	Velocidad de corrosión del acero St. 45 (Kg), efecto protector (γ), y el pH de las soluciones de fosfatos.	45
3.1	Composición de la lámina de cobre, tipo UNS C10300, libre de oxígeno, extra bajo en fósforo.	60
3.2	Composición de los platos laterales de acero al carbono SAE D400 (UNS G10200).	60
3.3	Descripción de las principales características de las sales ensayadas en el proceso de inhibición.	61
3.4	Descripción de las soluciones inhibidas por sales inorgánicas ensayadas.	61
4.1	Potenciales críticos de los diagramas de corriente – potencial de la polarización cíclica aplicada al par galvánico cobre – acero en presencia de inhibidores de corrosión	71
4.2	Valores de los elementos del circuito equivalente calculados de las mediciones de impedancia en el par galvánico cobre – acero al carbón, en solución estancada y flujo de 1200 rpm	80
4.3	Valores de los elementos del circuito equivalente calculados de las mediciones de impedancia en el par galvánico cobre – acero al carbón, en solución estancada y flujo de 1200 rpm en presencia de $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ y $\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{Na}_2\text{SiO}_3$	82
4.4	Niveles molares de la muestra en porcentaje atómico (At %).	106
4.5	Energías de enlace, porcentaje del pico total (%), y posibles asociaciones químicas	106
4.6	Niveles molares de la muestra en porcentaje atómico (At %). Sistema 2.	109
4.7	Energías de enlace, porcentaje del pico total (%), y posibles asociaciones químicas. Sistema 2.	109

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Toda degradación química de un metal debida a la interacción con su ambiente es llamada *corrosión*. Durante el diseño, construcción, manufactura y mantenimiento en procesos de la industria metal-mecánica es necesario un análisis de la interacción entre los materiales y el medio que los rodea. En la industria ocurren diferentes tipos de corrosión, sin embargo debido al diseño de maquinaria y equipo y los materiales de sus componentes en un ambiente específico, pueden propiciar la presencia de corrosión en forma acelerada; un ejemplo de ello es la *corrosión galvánica*. La corrosión galvánica se presenta cuando dos materiales disimilares están en contacto eléctricamente y expuestos a un medio acuoso, y ocurre en equipos y/o maquinaria que inevitablemente comparten metales de distinta naturaleza. Uno de los métodos de protección contra la corrosión aplicados en la industria en equipos e instalaciones, tales como torres de enfriamientos, intercambiadores de calor, tuberías de acero al carbono, entre otros, es el uso de inhibidores de corrosión que son agregados al medio que promueve la oxidación del metal. Los inhibidores de corrosión representan una protección contra la corrosión económica y segura cuando son aplicados correctamente.

Existe una amplia lista de compuestos químicos que exhiben propiedades de inhibición de la corrosión, de los cuales, muy pocos son los que han sido aplicados, considerando el costo, la toxicidad, disponibilidad y su relación con el ambiente, factores que son de gran importancia. Muchos inhibidores convencionales utilizados en los equipos industriales, están fabricados con base cromatos como agente principal de inhibición. Sin embargo un gran inconveniente en el uso de estos compuestos es la toxicidad que representan al medio ambiente. Las formulaciones desarrolladas de inhibidores de corrosión a partir de compuestos base molibdato, crean una alternativa amigable al ambiente puesto que es considerado un inhibidor no tóxico y se conoce su aplicación en protección de la corrosión de los sistemas de enfriamiento de agua suavizada y en procesos en soluciones alcalinas acuosas. Por otro lado, los molibdatos han estado disponibles para la protección contra la corrosión por más de 60 años, pero nunca han sido ampliamente utilizados.

Para hacer una buena elección de un inhibidor de corrosión, es fundamental conocer el mecanismo por el cual va a proteger al metal de interés. Cuanto mayor es caracterizada la función de un compuesto con propiedades de inhibición, se amplía su gama de aplicación y la facilita sobre todo en procesos industriales. Por otra parte, la industria frecuentemente enfrenta problemas de corrosión galvánica debido a que muchos equipos e instalaciones están fabricados con materiales de distinta naturaleza, por lo que es común observar en equipos como torres de enfriamiento, intercambiadores de calor, tuberías, la presencia de pares metálicos como cobre y acero al carbono, que al estar en contacto con una solución acuosa, promueve la disolución del acero. La interrelación del estudio de los inhibidores de corrosión con la interacción de su aplicación en problemas de la industria, da como resultado la optimización y el buen uso del recurso de compuestos

químicos utilizados contra la corrosión generada por la necesidad de utilizar materiales de distintos metales y aleaciones.

1.2 Justificación

Una práctica comúnmente utilizada para el control del deterioro de instalaciones industriales, equipos, maquinarias y estructuras de diversa índole es el uso de inhibidores de corrosión, que al ser añadidos en pequeñas cantidades en un ambiente determinado, ya sea acuoso o gaseoso, reduce la acción nociva que ejerce el medio sobre el material. Sin embargo es de suma importancia conocer y caracterizar su acción para una correcta y eficiente aplicación.

El estudio del mecanismo de inhibición y caracterización de películas formadas por inhibidores inorgánicos, tales como molibdatos, nitritos, nitratos, fosfatos entre otros, aplicados en pares galvánicos cobre y acero al carbono en medio acuoso, contribuye a la prevención de la corrosión galvánica sobre todo en equipos industriales que inevitablemente tienen que compartir componentes de distintos metales. El conocer el mecanismo de acción de un inhibidor, proporciona las herramientas necesarias para optimizar su eficiencia. Por otra parte, desde el punto de vista de ingeniería, es importante examinar el funcionamiento del inhibidor en metales de interés industrial, tal como el acero al carbono que es un metal muy utilizado en la industria. Aún más, estudiar el comportamiento de corrosión en pares galvánicos y su inhibición contribuye a la optimización de la manufactura de equipos industriales y a la resolución de problemas de corrosión en la industria.

Si bien se han estudiado innumerables compuestos que pueden actuar como inhibidores de corrosión en medios acuosos, la gran mayoría no cumplen con los requisitos que plantean las nuevas normativas de toxicidad y de protección del medio ambiente. El uso de inhibidores de corrosión inorgánicos con base molibdato de sodio, ofrece una protección segura en su aplicación. Sin embargo, la adición de agentes oxidantes para aumentar la eficiencia del molibdato de sodio, debe ser evaluada para elegir la formulación que sea más amigable con el medio ambiente. Otro punto importante del presente trabajo es que está enfocado al estudio de la corrosión galvánica del par metálico acero al carbono y cobre. La óptima formulación de inhibidores de corrosión para actuar también en pares galvánicos puede ser aplicada en procesos industriales, principalmente en aquellos que involucren sistemas de agua destilada y ósmosis inversa o con bajas concentraciones de sales o cloruros.

1.3 Objetivos

Objetivo General: Caracterizar el mecanismo de inhibición al desarrollar y validar formulaciones de inhibidores de corrosión en diferentes condiciones hidrodinámicas y de temperatura. Los inhibidores propuestos son de base molibdato de sodio. Analizar la sinergia del molibdato con la adición de diferentes compuestos químicos inorgánicos como agentes pasivantes y/o oxidantes, con propiedades inhibitoras, para ser aplicados en pares galvánicos formados por cobre y acero al carbono en soluciones acuosas.

Objetivos Específicos:

- Comparar las formulaciones desarrolladas y sus mecanismos de inhibición, mediante métodos de evaluación y análisis de inhibidores de corrosión basados en pruebas electroquímicas, de análisis superficial y de composición química, en especímenes de pares galvánicos constituidos por acero al carbono y cobre.
- Determinar la formulación más estable e independiente de la temperatura y los efectos de la hidrodinámica.

Alcances y limitaciones: El hecho de caracterizar el mecanismo de inhibición en pares galvánicos mediante la validación de diferentes formulaciones de inhibidores de corrosión, amplía el horizonte de aplicación de productos cuya formulación está basada en molibdato de sodio. Las variaciones se encuentran principalmente en la elección de los agentes pasivantes o co-pasivantes, oxidantes, dentro de la formulación así como la concentración de cada compuesto. Los problemas principalmente en equipos industriales pueden ser atacados reconociendo la actividad del inhibidor y aplicar la elección adecuada. Por otra parte, la limitación de la aplicación puede ser enfocada a medios específicos, ya que la eficiencia de desempeño está basada principalmente en soluciones cercanas a pH neutro, de baja conductividad, ya sean suavizadas, provenientes del sistema de osmosis inversa o soluciones con bajo contenido en aniones como cloruros o sulfatos.