



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería Química

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado



Maestría en Ingeniería Química

Título de Tesis de Maestría:

**ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO Y SUPERFICIAL DEL ACERO AISI
1018 TRATADO CON POLI (LÍQUIDOS IÓNICOS)
ENTRECruzADOS COMO INHIBIDORES DE CORROSIÓN**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA QUÍMICA
PRESENTA:

ING. OCTAVIO DE JESÚS AYALA GAXIOLA

Asesor de tesis:
Dr. Octavio Olivares Xometl

Coasesor de tesis:
Dra. Paulina Arellanes Lozada

Junio 2021

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen María, por cuidarme y protegerme ante todo momento.

Agradezco especialmente a mi asesor el Dr. Octavio Olivares Xometl y mi co asesora la Dra. Paulina Arellanes Lozada, por el poder pertenecer a su equipo de trabajo, por su apoyo, paciencia y consejos durante todo mi desarrollo y culminación de este proyecto de tesis. Gracias a su profesionalismo que me ayudó a crecer a nivel académico y profesional.

De la misma forma las profesoras Dra. Natalya Victorovna Likhanova y Dra. Janette Arriola Morales por sus consejos y sugerencias que me ayudaron a mejorar este trabajo.

Esto va para mi abuela, mi mamá Eva, espero poder seguirla haciendo sonreír y sentir orgullosa.

Doy gracias a mis padres, por apoyarme para estudiar tan lejos de casa, viendo siempre por mi crecimiento como persona y profesional, gracias por el esfuerzo que realizaron sin pedir nada a cambio. A mi hermano Christian, que a pesar de las discusiones siempre estamos el uno para el otro.

A mi novia Paola Castillo García, te encontré cuando menos te esperaba, gracias por ser mi apoyo en todo mi trayecto en Puebla, estar en las buenas, las malas y las peores, por tus consejos, abrazos y por todas y cada una de las aventuras.

A mis amigos que he hecho a través de mi vida, mis compañeros de la secundaria que el tiempo nos convirtió en hermanos Carlos, David y Richi como a mis amigos de la prepa David Osvaldo, Serna, Reyna y Caro. También agradezco a mis amigos de la universidad Luis, Lorena, Jonathan, Janeth y Padilla, que a pesar de la distancia e indefinidamente del tiempo sin vernos el aprecio y cariño se sigue manteniendo. Doy gracias por mis compañeros de la maestría, estos dos años fueron más amenos a ustedes, en especial a Nallely, Flor, Mariana y Henoc, que la vida nos vuelva a juntar, gracias por todo.

De la misma forma quiero dedicar esto a quien considero como una hermana, Xcaret, por nuestra amistad de más de diez años y los que faltan.

A mi padrino Carlos Castro y mi madrina Ofelia Gaxiola, por ser como unos segundos padres y recibirme con los brazos abiertos en su casa.

A mis sobrinos José Juan, Gaby, Ofelia y Ana Guadalupe y mis primos Kevin, Dany, José, Carlitos, Karlita, Karlita y Karen

Por último y no menos importante, esto va para mi consejero de vida y uno de los hombres más sabios que tuve el placer de conocer, la persona que me envalentó a emprender esta travesía, orgullosamente su nieto esto va con dedicatoria al cielo. Un abrazo papá chuy.

RESUMEN

El presente trabajo muestra la evaluación de 2 poli(líquidos iónicos) (PLIs) como inhibidores de corrosión (ICs) para el acero AISI 1018, utilizando como medios corrosivos ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido clorhídrico (HCl) 1M, empleando las técnicas electroquímicas de polarización de Tafel, resistencia a la polarización y espectroscopía de impedancia electroquímica. Los PLIs utilizados para esta investigación fueron el Imidazolato de poli(1-vinil-3-etilimidazoleo) P(VIM2C) [IM] e Imidazolato de poli(1-vinil-3-butimidazoleo) P(VIM4C) [IM].

Los resultados de las pruebas electroquímicas muestran un efecto inhibitorio de los PLIs en ambos medios, siendo en solución de H_2SO_4 1 M, donde se presentaron mejores efectos de inhibición para ambos ICs. En presencia de P(VIM2C) [IM] se observó una reducción en la velocidad de corrosión con respecto al aumento de la concentración, donde la menor velocidad de corrosión se obtuvo a 200 ppm. Por otra parte, con el P(VIM4C) [IM] se obtuvieron eficiencias de inhibición por encima del 98% en ambos medios; estos resultados se confirmaron por la técnica gravimétrica de pérdida. El desplazamiento del potencial de corrosión (ΔE_{corr}) en presencia de los PLIs, indicó que estos polímeros funcionan como ICs de tipo mixto, dichos resultados se confirman mediante las técnicas de Polarización Potenciodinámica.

Además, se analizaron diferentes modelos de isotermas de adsorción para observar el efecto de adsorción de los PLIs hacia la superficie del acero, siendo la isoterma de Langmuir la que ajusta mejor los datos experimentales, la cual sugiere la formación de una capa inhibitoria entre el metal y la solución. A partir de las isotermas de Langmuir, se obtuvo el valor de la energía libre de Gibbs de adsorción, parámetro electroquímico que indicó que el proceso de inhibición del P(VIM2C) [IM] fue por adsorción física y química, mientras que el P(VIM4C) [IM] se adsorbe a la superficie metálica químicamente.

ABSTRACT

In the present work, two poly (ionic liquids) (PLs) were evaluated as corrosion inhibitors (CIs) for AISI 1018 steel, using 1M sulfuric acid (H_2SO_4) and 1M hydrochloric acid (HCl) as corrosive media, using electrochemical techniques Tafel polarization, polarization resistance and electrochemical impedance spectroscopy. The PLs used for this investigation were poly (1-vinyl-3-ethylimidazole) P(VIM2C) [IM] and poly (1-vinyl-3-butylimidazole) P(VIM4C) [IM]. The results of the electrochemical tests show an inhibitory effect of the PLs in both media, where in 1 M H_2SO_4 shows better inhibition effects were presented for both ICs. Electrochemical tests for P(VIM2C) [IM] show a reduction in the rate of corrosion, with respect to the increase in concentration, where the lowest corrosion rate was reached at 200 ppm. Regarding P(VIM4C) [IM], inhibition efficiencies above 98% are observed in both media; these results were confirmed by weight loss gravimetric technique. The displacement of the corrosion potential (ΔE_{corr}) with addition of PLs showed that the polymers work as mixed type CIs. In addition, different models of adsorption isotherms were analyzed to observe the inhibition effect of the PLs, being the Langmuir isotherm which best fit for the experimental data, which suggests the formation of an inhibitory layer between the metal and the solution. From the Langmuir isotherms, the Gibbs free energy values of adsorption (ΔG°_{ads}) was obtained, this electrochemical parameter indicated that the process of inhibition of P(VIM2C) [IM] was by physical and chemical adsorption while in P(VIM4C) [IM] was chemical adsorbed to the metal surface.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS.....	11
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	15
1.1. Corrosión	15
1.2. Corrosión en la industria petrolera	18
1.3 Inhibidores de corrosión.....	21
1.4 Líquidos iónicos como inhibidores de corrosión	23
1.4.1 Líquidos iónicos a base de imidazolio	25
1.5 Poli(líquidos iónicos) como inhibidores de corrosión	27
1.6 Técnicas de análisis de corrosión	29
1.6.1 Polarización Potenciodinámica	30
1.6.2 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica	32
1.6.3 Pérdida de peso.	34
CAPITULO 2. METODOLOGÍA.....	35
2.1 Preparación de soluciones de prueba	35
2.2. Preparación de muestras metálicas.....	36
2.3. Pruebas Electroquímicas.....	37
2.4. Análisis gravimétrico	39
CAPITULO 3 RESULTADOS	40
3.1 Polarización potenciodinámica por curvas Tafel.....	40
3.1.1 Curvas Tafel de P(VIM2C) [IM]	40
3.1.2 Curvas Tafel de P(VIM4C) [IM]	42
3.2 Resistencia a la polarización (Rp)	45
3.2.1 Rp de P(VIM2C) [IM]	45
3.2.2 Rp de P(VIM4C) [IM]	47
3.3. Análisis gravimétrico de P(VIM4C) [IM]	49
3.4 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS).....	50
3.4.1 EIS con P(VIM2C) [IM]	50
3.4.2 EIS con P(VIM4C) [IM]	58
3.5 Isotermas de adsorción.....	64

3.6 Mecanismo de inhibición a la corrosión del acero con PLIs.....	68
3.6.1 Zona anódica	69
3.6.2 Zona catódica.....	73
CONCLUSIONES.....	75
REFERENCIAS.....	76
ANEXO A: Clasificación de líquidos iónicos.....	88
ANEXO B: Síntesis y caracterización de PLIs.....	90
ANEXO C: Isotermas de adsorción	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Celda electroquímica (Durkee, 1987).....	15
Figura 2. Tipos de corrosión (Bruce Mackay et al., 2016).	16
Figura 3. Corrosión húmeda (Zaki Ahmad, 2006).	18
Figura 4. Pérdidas económicas a nivel mundial en la industria del petróleo (millones de dólares anuales).....	19
Figura 5. Tubería dañada por la corrosión.	19
Figura 6. Clasificación de inhibidores de corrosión (Uhlig Herbert, 2011).....	22
Figura 7. Ion imidazolio (Collin & Höke, 2000).	25
Figura 8. LIs a base de imidazolio (Guzmán-Lucero et al., 2011).	26
Figura 9. Relación entre LIs y PLIs, ILMs: Monómeros de líquidos iónicos (Zheng, Huyan, Li, Sun, & Xu, 2019).....	28
Figura 10. Diagrama de Pourbaix del platino (Parsons, 1967).	30
Figura 11. Ejemplo de una curva Tafel.....	31
Figura 12. Ejemplo de un gráfico de resistencia a la polarización.....	32
Figura 13. Ejemplo de diagrama de (a) Nyquist y (b) Bode.....	33
Figura 14. Ejemplo circuito equivalente (Tribollet, 2008).....	33
Figura 15. Muestras de acero AISI 1018 sin teflón (a) y con teflón (b).....	37
Figura 16. Metodología celda electroquímica.....	37
Figura 17. Ejemplos de gráficos de Tafel (a), R_p (b) y EIS (c).	39
Figura 18. Curvas Tafel (a) y gráficas de $E_{I_{TAFEL}}$ (b) para acero AISI 1018 en H_2SO_4 1M usando P(VIM2C) [IM] como IC.....	41
Figura 19. Curvas Tafel (a) y gráficas de $E_{I_{TAFEL}}$ (b) para acero AISI 1018 en HCl 1M usando P(VIM2C) [IM] como IC.....	41
Figura 20. Curvas Tafel (a) y gráficas de $E_{I_{TAFEL}}$ (b) para acero AISI 1018 en H_2SO_4 1M usando P(VIM4C) [IM] como IC.....	43
Figura 21. Curvas Tafel (a) y gráficas de $E_{I_{TAFEL}}$ (b) para acero AISI 1018 en HCl 1M usando P(VIM4C) [IM] como IC.....	43
Figura 22. Curvas de Resistencia a la Polarización del acero AISI 1018 en soluciones de H_2SO_4 y P(VIM2C) [IM]	46
Figura 23. Curvas de Resistencia a la Polarización del acero AISI 1018 en soluciones de HCl y P(VIM2C) [IM]	46

Figura 24. Curvas de Resistencia a la Polarización del AISI 1018 en soluciones de H ₂ SO ₄ y P(VIM4C) [IM] .	48
Figura 25. Curvas de Resistencia a la Polarización del acero AISI 1018 en soluciones de HCl y P(VIM4C) [IM] .	48
Figura 26. Diagrama de Nyquist de acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ 1 M y diferentes concentraciones de P(VIM2C) [IM].	51
Figura 27. Diagrama de Bode del acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ 1 M y diferentes concentraciones de P(VIM2C) [IM].	52
Figura 28. Circuito eléctrico equivalente para sistema de acero en H ₂ SO ₄ 1M.	52
Figura 29. Circuito eléctrico equivalente para sistema de acero en H ₂ SO ₄ 1M y diferentes concentraciones de P(VIM2C) [IM].	53
Figura 30. Diagrama de Nyquist de acero AISI 1018 en HCl como medio corrosivo y P(VIM2C) [IM].	56
Figura 31. Circuito eléctrico equivalente para sistema de acero en HCl 1M.	57
Figura 32. Circuito eléctrico equivalente para sistemas de acero en HCl 1M y diferentes concentraciones de P(VIM2C) [IM].	57
Figura 33. Diagrama de Bode del acero AISI 1018 en HCl como medio corrosivo y P(VIM2C) [IM].	57
Figura 34. Diagrama de Nyquist de acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ 1 M y diferentes concentraciones de P(VIM4C) [IM].	59
Figura 35. Diagrama de Bode del acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ como medio corrosivo y P(VIM4C) [IM].	60
Figura 36. Circuito eléctrico equivalente para sistema de acero en H ₂ SO ₄ y HCl 1M y diferentes concentraciones de P(VIM4C) [IM].	60
Figura 37. Diagrama de Nyquist de acero AISI 1018 en HCl 1M y diferentes concentraciones de P(VIM4C) [IM].	62
Figura 38. Diagrama de Bode del acero AISI 1018 en HCl como medio corrosivo y P(VIM4C) [IM].	63
Figura 39. Isotherma de adsorción de Langmuir (a) y Temkin (b) en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM2C) [IM]: a) H ₂ SO ₄ 1M y b) HCl 1M.	65
Figura 40. Isotherma de adsorción de Langmuir en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM4C) [IM]: a) H ₂ SO ₄ 1M y b) HCl 1M.	66
Figura 41. Mecanismo de Inhibición de los sitios anódicos en el acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ .	70

Figura 42. Mecanismo de Inhibición en los sitios anódicos en el acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ y P(VIM2C) [IM].....	71
Figura 43. Mecanismo de Inhibición en los sitios anódicos en el acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ y P(VIM4C) [IM].	71
Figura 44. Mecanismo de Inhibición de los sitios anódicos en el acero AISI 1018 en HCl.	72
Figura 45. Mecanismo de Inhibición de los sitios anódicos en el acero AISI 1018 en HCl y P(VIM2C) [IM].....	72
Figura 46. Mecanismo de Inhibición de los sitios anódicos en el acero AISI 1018 en HCl y P(VIM4C) [IM].....	72
Figura 47. Mecanismo de Inhibición de los sitios catódicos en el acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ y HCl.....	73
Figura 48. Mecanismo de Inhibición de los sitios catódicos en el acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ , HCl y P(VIM2C) [IM].....	74
Figura 49. Mecanismo de Inhibición de los sitios catódicos en el acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ , HCl y P(VIM4C) [IM].....	74
Figura A-1. Cationes heterocíclicos de cinco miembros (Krische, 2007)..	89
Figura B-1. Esquema de la síntesis de 1-vinil-1-butimidazolio (VIM4C).	91
Figura B-2. Esquema del sistema de reacción de los homopolímeros de bromuro de poli (1-vinil-3-alquilimidazolio).	92
Figura B-3. Esquema de la reacción de polimerización para los bromuros de poli(1-vinil-3-alquilimidazolio).	93
Figura B-4. Reacción de intercambio iónico para la obtención de los imidazolatos de poli(1-vinil-3-alquilimidazolio).	93
Figura B-5. RMN de ¹ H de monómero (a) VIM4C[Br] y de los homopolímeros (b) P(VIM4C) [Br] y (c) P(VIM4C) [IM].	95
Figura B-6. Determinación de la viscosidad intrínseca.....	97
Figura C-1. Isoterma de adsorción de Frumkin en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM2C) [IM]: a) H ₂ SO ₄ 1M y b) HCl 1M.....	98
Figura C-2. Isoterma de adsorción de Frumkin en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM4C) [IM]: a) H ₂ SO ₄ 1M y b) HCl 1M.....	98

Figura C-3. Isotherma de adsorción de Temkin en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM2C) [IM]: a) H ₂ SO ₄ 1M y b) HCl 1M.....	99
Figura C-4. Isotherma de adsorción de Temkin en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM4C) [IM]: a) H ₂ SO ₄ 1M y b) HCl 1M.....	99
Figura C-5. Isotherma de adsorción de Freundlich en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM2C) [IM]: a) H ₂ SO ₄ 1M y b) HCl 1M.....	99
Figura C-6. Isotherma de adsorción de Freundlich en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM4C) [IM]: a) H ₂ SO ₄ 1M y b) HCl 1M.....	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación LIs y PLIs (Kamali et al., 2019; Nahl, 2016).	14
Tabla 2. Reacciones Catódicas en soluciones ácidas.....	20
Tabla 3. Valores de la constante K.....	34
Tabla 4. Estructura química de los PLIs evaluados como ICs.	35
Tabla 5. Propiedades mecánicas y físicas acero AISI 1018 (SUMITEC, 2009).	36
Tabla 6. Composición química acero AISI 1018 (SUMITEC, 2009).	36
Tabla 7. Parámetros electroquímicos obtenidos por curva de Tafel de acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ 1 M conteniendo diferentes concentraciones de P(VIM2C) [IM]	41
Tabla 8. Parámetros electroquímicos obtenidos por curva de Tafel de acero AISI 1018 en HCl 1 M conteniendo diferentes concentraciones de P(VIM2C) [IM]	42
Tabla 9. Parámetros electroquímicos obtenidos por curva de Tafel de acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ 1 M conteniendo diferentes concentraciones de P(VIM4C) [IM]	44
Tabla 10. Parámetros electroquímicos obtenidos por curva de Tafel de acero AISI 1018 en HCl 1 M conteniendo diferentes concentraciones de P(VIM4C) [IM].	44
Tabla 11. Parámetros electroquímicos por R _p obtenidos del acero AISI 1018 en soluciones de H ₂ SO ₄ y P(VIM2C) [IM]	46
Tabla 12. Parámetros electroquímicos por R _p obtenidos del acero AISI 1018 en soluciones de HCl y P(VIM2C) [IM]	47
Tabla 13. Parámetros electroquímicos por R _p obtenidos del acero AISI 1018 en soluciones de H ₂ SO ₄ y P(VIM4C) [IM]	48
Tabla 14. Parámetros electroquímicos por R _p obtenidos del acero AISI 1018 en soluciones de HCl y P(VIM4C) [IM]	48
Tabla 15. Resultados del análisis gravimétrico del acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ 1 M con P(VIM(4C) [IM].....	49
Tabla 16. Resultados de EIS de acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ 1M y P(VIM2C) [IM].	54

Tabla 17. Resultados de EIS de acero AISI 1018 en HCl 1M y P(VIM2C) [IM].	58
Tabla 18. Resultados de EIS de acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ 1M y P(VIM4C) [IM].	61
Tabla 19. Resultados de EIS de acero AISI 1018 en HCl 1M y P(VIM4C) [IM].	63
Tabla 20. Isotermas de Adsorción (Sastri, Ghali, & Elboujdaini, 2012).	64
Tabla 21. Parámetros termodinámicos de adsorción del acero AISI 1018 en H ₂ SO ₄ y HCl 1M y PLIs a partir de la isoterma de adsorción de Langmuir y Temkin.	66
Tabla A-1 Clasificación de Líquidos iónicos (Verma et al., 2018).	88

INTRODUCCIÓN

Actualmente el acero al carbono es utilizado en diferentes industrias como material metálico para equipos tales como intercambiadores de calor, tanques y tuberías (Fattah-alhosseini & Noori, 2016), sin embargo, la vida útil de este material se ve afectada por el proceso natural de corrosión. Esta problemática, a nivel mundial es acelerada en medios ácidos y básicos, siendo una de las industrias más afectadas la del petróleo, esto debido a los usos de medios ácidos y básicos, sufriendo pérdidas económicas de alrededor de \$1.5 billones de dólares anuales (Popoola et al., 2013), otras consecuencias por la corrosión son los gastos indirectos, los cuales abarcan las pérdidas de vidas humanas y contaminación hacia el medio ambiente, esto debido a los accidentes ocurridos en los procesos químicos y/o petroleros. En resumen, los factores principales a tratar ante la corrosión son el económico, seguridad y daño ambiental, de ahí la importancia de encontrar un método de control para reducir la corrosión. Un método de control de corrosión adecuado a algún proceso industrial específico, podría llegar a reducir entre un 15-30% las pérdidas económicas provocadas por este fenómeno (Bruce Mackay et al., 2016). Siendo el uso de compuestos químicos llamados inhibidores de corrosión, los cuales son compuestos químicos que se agregan en pequeñas cantidades en un medio corrosivo y protegen la superficie de materiales metálicos disminuyendo la corrosión. Actualmente, el estudio de líquidos iónicos (LIs) como inhibidores de corrosión es una alternativa potencial para reemplazar inhibidores tóxicos debido a sus propiedades únicas (Castillo Borja, 2015). Los LIs son sales compuestas por una parte aniónica y otra catiónica (Castillo Borja, 2015), siendo los más estudiados los LIs a base de imidazolio. En los últimos años, se ha comenzado el estudio con compuestos llamados Poli Líquidos Iónicos (PLIs) o líquidos iónicos polimerizados, los cuales contienen un líquido iónico en cada monómero repitiéndose, conectando a través de un esqueleto polimérico a una arquitectura macromolecular, y de esta manera se pueden incrementar las propiedades de los LIs (Collin & Höke, 2000; Yuan et al., 2013).

Un ejemplo sobre el uso de los PLs como ICs se observa en La Tabla 1, donde se realiza una comparación entre un LI y un PLI como inhibidores de corrosión,

utilizando HCl 1M como medio corrosivo, con una concentración del inhibidor de 100 ppm.

Tabla 1. Comparación LIs y PLIs (Kamali et al., 2019; Nahl, 2016).

INHIBIDOR DE CORROSIÓN (IC)	MEDIO CORROSIVO	EFICIENCIA (%)	CONCENTRACIÓN (ppm)
LI 1-metil fenil-3 vinylimidazolio	HCl 1M	83.5	100
Poli (bromuro de 3-butyl-1-vinylimidazolio)	HCl 1M	96	100

Se observa que los compuestos presentan altas eficiencias, sin embargo, el PLI tiene un comportamiento sobresaliente. De acuerdo con norma NRF-005-PEMEX-2009, la protección interior de ductos que transportan hidrocarburos con inhibidores de corrosión, es viable si se alcanzan eficiencia de inhibición de al menos el 90% a concentraciones de inhibidor menores a 100 ppm; por lo que es posible deducir que los PLI tienen un gran potencial como inhibidores de corrosión. Por ello, el presente trabajo evalúa nuevos PLIs como inhibidores de corrosión, para la protección del acero en soluciones de ácido sulfúrico y clorhídrico; utilizando técnicas electroquímicas y de análisis superficial.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1. Corrosión

La corrosión es el proceso de degradación de las propiedades de un metal o aleación con el ambiente que lo rodea, debido al comportamiento natural del material de regresar a su estado termodinámico más estable (Schweitzer, 2006).

La corrosión es un proceso electroquímico, en otras palabras, la corrosión no ocurre por reacciones electroquímicas directamente entre el metal y su entorno, si no por el funcionamiento de reacciones electroquímicas que ocurren en una celda electroquímica (Mccafferty & Einar Bardal, 2004).

Se denomina reacciones electroquímicas a aquellas reacciones en las cuales hay un flujo de electrones. La celda electroquímica es el lugar donde se llevan a cabo los transportes de carga a través de la interfase entre las fases químicas, esto entre un conductor de electrones (electrodo) y un conductor iónico (electrolito), además debe haber un diferencial de potencial y una interacción entre una zona anódica y catódica (Lord, et al., 2012).

La Figura 1 muestra el diagrama de una celda electroquímica, donde en la zona anódica ocurre la reacción de oxidación (los electrones pasan del metal a la solución), mientras que en la zona catódica ocurre la reacción de reducción (los electrones pasan de la solución al metal).

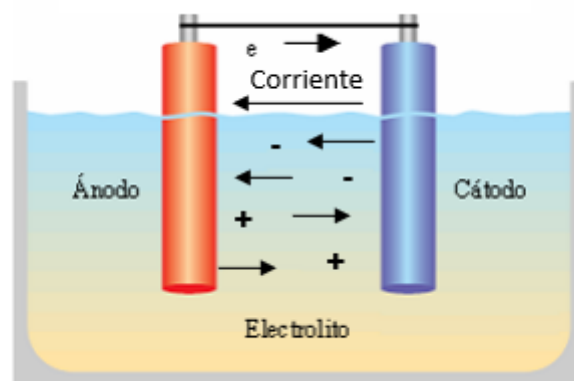


Figura 1. Celda electroquímica (Durkee, 1987).

Generalmente la corrosión deja señales visibles, lo cual indica el mecanismo que la produjo. Existen diferentes tipos de corrosión que pueden sufrir los materiales metálicos, entre los principales se encuentran: corrosión uniforme, intergranular,

galvánica, por grieta, por picadura, erosión, bajo tensión, fisuración por tensocorrosión, fatiga por corrosión, entre otros, como se muestra en la Figura 2 (Bruce Mackay et al., 2016).

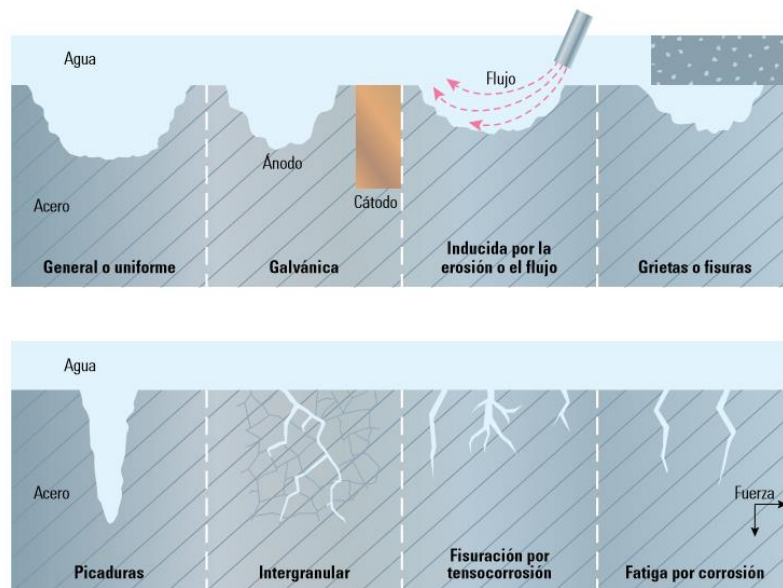


Figura 2. Tipos de corrosión (Bruce Mackay et al., 2016).

- **Corrosión Uniforme:** Es el tipo de corrosión más simple, el cual es la pérdida del metal sobre la superficie expuesta, esto debido al ataque químico del componente metálico en iones metálicos.
- **Corrosión Galvánica:** Se refiere a una corrosión de metales diferentes, por lo general es encontrado en lugares poco usuales, como es el caso de conexiones entre tuberías de cobre con tuberías de carbón.
- **Corrosión intergranular:** Es un ataque llevado a cabo en las fases de límite de grano que se encuentran en zonas adyacentes a ellas, ocasionando la pérdida de fuerza, ductilidad. El ataque se propaga penetrando profundamente en el metal y causando fallas.
- **Corrosión por grieta:** Es un tipo de corrosión localizada en espacios estrechos o aberturas formadas por contacto de metal a no metal esto es debido a las diferencias en las concentraciones de oxígeno, los depósitos asociados en la superficie del metal o las grietas debajo de la columna o alrededor de las líneas donde se acumulan pequeñas cantidades de líquido.
- **Corrosión por picadura:** Se caracteriza por la asociación de esta corrosión con otros tipos de mecanismos de corrosión, este mecanismo de corrosión se ve reflejado como un agujero minúsculo y poco profundo en una superficie

no afectada, dicho agujero o abertura permanece cubierta con el producto de corrosión, dificultando la detección durante la inspección, generando poco conocimiento en cuanto a la extensión del daño.

- Erosión: Es causada generalmente por un corroyente ya sea acuoso o gaseoso, el cual fluye sobre la superficie del metal. Este mecanismo de corrosión es afectado por la velocidad, turbulencia, presencia de sólidos suspendidos, temperatura, etc.
- Corrosión bajo tensión: También conocido como SCC por sus siglas en inglés, se define como la falla retardada por agrietamiento cuando es expuesto a ciertas condiciones de tracción estática, por lo general, el metal o aleación se encuentra virtualmente libre de corrosión en su superficie, no obstante, en los puntos de tensión las grietas finas pueden penetrar a través de la superficie del metal (Schweitzer, 2006).
- Fisuración por tensocorrosión: Se forman grietas después de que una grieta ha sido atacada por la corrosión.
- Fatiga por corrosión: Falla en la estructura del metal por la interacción combinada entre las reacciones electroquímicas y daños mecánicos (Bruce Mackay et al., 2016).

Otro tipo de clasificación de la corrosión es de acuerdo con el medio que rodea el metal, de acuerdo con esto, existen dos tipos de corrosión principalmente: corrosión seca y corrosión húmeda. La corrosión seca es la combinación de un metal junto con el oxígeno del aire, mientras que corrosión húmeda es un proceso electroquímico donde se forma una capa acuosa en el metal (Alcántara et al., 2017), debido a la presencia de un medio húmedo a diferencia de la corrosión seca la corrosión húmeda se presenta con una cantidad de agua e iones disueltos, mientras que en la corrosión atmosférica el acceso al oxígeno presente es ilimitado.

Un ejemplo es el caso de una pieza de acero en condiciones de humedad, donde en las zonas anódicas se presenta la Reacción 1:



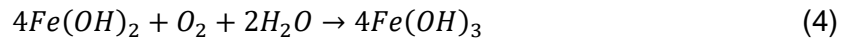
Mientras que, en las áreas catódicas, la reducción del oxígeno se lleva a cabo como se presenta en la Reacción 2:



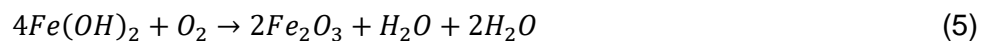
A su vez los iones OH^- reaccionan con los iones de Fe^{++} producidos en el ánodo (ver Reacción 3):



Con más acceso al oxígeno en el aire $\text{Fe}(\text{OH})_2$ se oxida a $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y después pierde su molécula de agua tal como se observa en la Reacción 4:



El hidróxido ferroso se convierte a óxido férrico hidratado u óxido por oxígeno como se presenta en la Reacción 5 (Zaki Ahmad, 2006):



Gráficamente se puede apreciar esto en la Figura 3.

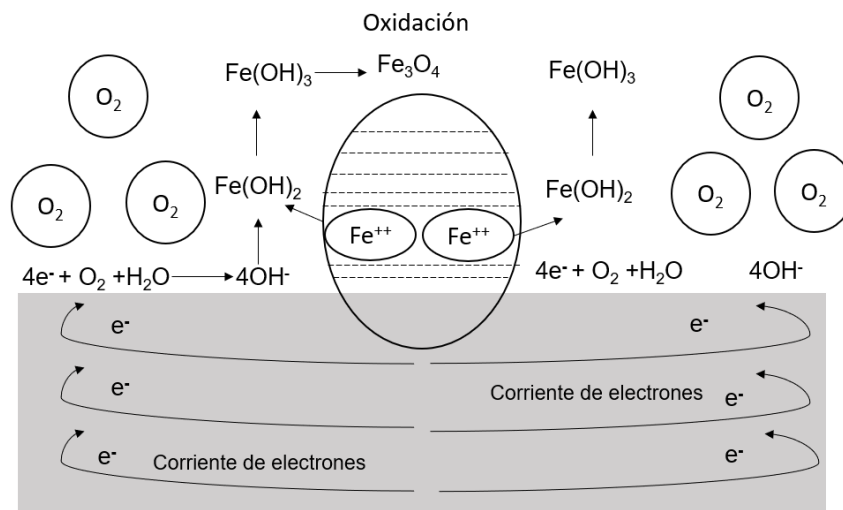


Figura 3. Corrosión húmeda (Zaki Ahmad, 2006).

1.2. Corrosión en la industria petrolera

En la industria de gas y petróleo, el proceso de corrosión de acero es un fenómeno que genera grandes pérdidas económicas debido a que el crudo y gas natural pueden llevar varios productos químicos con altas impurezas, los cuales son extremadamente corrosivos. Los costos atribuidos a los daños causados por la corrosión en general es estimado entre el 3%-5% (Popoola et al., 2013), en lo que respecta al sector industrial, los costos debido a la corrosión se estiman alrededor de los 170 billones de dólares anuales, (Durkee, 1987), siendo las pérdidas en la industria del petróleo, alrededor de los \$1.372 billones de dólares anuales, de los cuales \$589 millones se gastan en arreglar las tuberías e instalaciones de superficie, \$463 millones en gastos de tubería de pozo y otros

\$320 millones en gastos de capital relacionados con la corrosión, la Figura 4 muestra un diagrama con las pérdidas económicas en la industria del petróleo ocasionadas por la corrosión (Popoola et al., 2013).

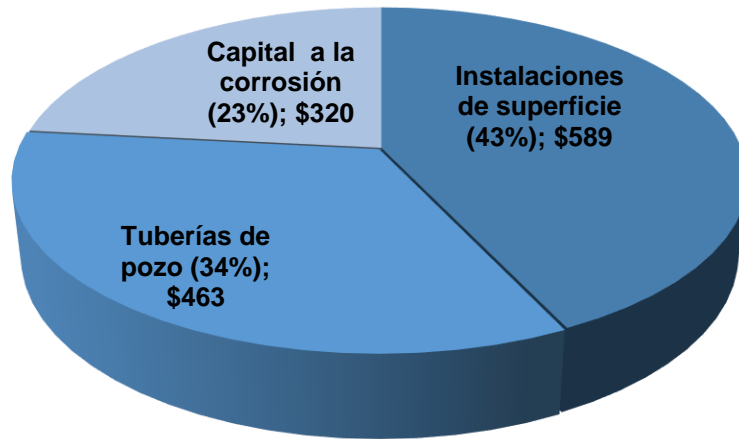


Figura 4. Pérdidas económicas a nivel mundial en la industria del petróleo (millones de dólares anuales).

El efecto del proceso de corrosión se debe a los ambientes altamente agresivos involucrados en diferentes etapas de procesamiento del petróleo y sus derivados. En el caso de las tuberías de petróleo y gas, los medios corrosivos principales son el dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S); por lo tanto, durante el proceso de extracción del petróleo y sus derivados las superficies internas de las tuberías sufren efectos de corrosión, y por ende su degradación, esto ocasiona la pérdida de las propiedades mecánicas como fuerza, ductilidad, impacto, fuerza, entre otras, tal como se ve en la Figura 5.



Figura 5. Tubería dañada por la corrosión.

La forma más común de corrosión en la industria del petróleo ocurre cuando el acero hace contacto con la solución corrosiva (electrolito), los átomos del metal de la zona anódica pierden electrones, los cuales son absorbidos por los átomos del metal en su zona catódica, la reacción anódica queda representada por la Reacción 1.

Después de la reacción llevada en la zona anódica, existen cuatro reacciones catódicas principales de acuerdo con los diferentes medios, como se muestra en la Tabla 2 (Mccafferty & Einar Bardal, 2004):

Tabla 2. Reacciones Catódicas en soluciones ácidas.

Reacción Catódica	Causa
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	Reducción del oxígeno en solución ácida
$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$	Reducción del oxígeno en solución alcalina
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	Evolución del hidrógeno de solución ácida
$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	Evolución del hidrógeno de agua neutra.

En la industria petrolera, el uso y producción de soluciones ácidas es una de las principales causas de corrosión metálica. Soluciones ácidas como el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico son medios a menudo utilizados como ácidos de decapado para la limpieza de superficies de acero de indeseables productos de corrosión; así como en la inyección para la recuperación de petróleo, donde medios ácidos son utilizados con los fluidos de perforación para reaccionar con las rocas carbonatadas para liberar sal, agua y gas CO₂ (Bashir et al., 2019; Kamali et al., 2019). Otro uso es la acidificación de pozos petroleros. La acidificación implica bombear ácido clorhídrico (HCl) a través del pozo, mejorando la permeabilidad de las rocas y disolviendo productos que pueden depositarse en los espacios de poros dentro de las rocas (Dehghani et al., 2019). Además, las soluciones ácidas no solamente se agregan en diferentes procesos, sino que también es posible su producción por reacciones químicas entre diferentes reactantes como la obtención del ácido sulfúrico creado por el proceso de contacto, en el cual el azufre o los desechos se queman para formar el dióxido de azufre (SO₂), posteriormente se transforma en trióxido de azufre (SO₃), este gas al reaccionar con el agua forma el ácido sulfúrico tal como se observa en la Reacción (6):



El ácido sulfúrico en presencia de las altas cantidades de cloruro de sodio genera el ácido clorhídrico, con sulfato de Sodio (Na_2SO_4) tal como se representa en la Reacción (7) (Davis, 2000):



Debido a estas condiciones y a los altos valores de velocidad de corrosión de diferentes metales en medios ácidos, es importante el adecuado control de la corrosión de los materiales metálicos empleados en tuberías (Bruce Mackay et al., 2016).

1.3 Inhibidores de corrosión

La corrosión es imposible de eliminar, sin embargo, es posible controlarla para que los equipos tengan la vida de servicio prevista, a esto se le denomina control de corrosión. Existen algunos métodos para el control de la corrosión, tales como la protección anódica, protección catódica, recubrimientos, selección de materiales, diseño de equipo e inhibidores de corrosión (ICs), siendo este último uno de los más eficientes.

Los IC son sustancias químicas que ayudan a reducir la corrosión sin generar un cambio significativo en la concentración del agente corrosivo (Sanumi & Makhatha, 2018). Estos pueden actuar de distintas maneras para reducir la velocidad de corrosión, ya sea reduciendo el movimiento o difusión de los iones en la superficie metálica, incrementando la resistencia eléctrica de la superficie metálica o adsorbiéndose en la superficie metálica formando una película (Toussaint, 2015). En general los IC deben de cumplir con ciertas características:

- Compatibilidad con el sistema a proteger.
- Estabilidad térmica en condiciones de operación.
- Fácil manejo y almacenamiento.
- Producto económico.
- No alterar el proceso del sistema a proteger.

Uno de los parámetros para cuantificar las propiedades de inhibición de cualquier sustancia es la eficiencia de inhibición (*EI*) (Cano & Lafuente, 2013), este término puede expresarse como la reducción a la velocidad de corrosión, en base a la cantidad de inhibidor adsorbido en la superficie metálica siendo un comportamiento frecuente que al aumentar la concentración de IC incrementa la *EI* (Heinemann, 1994). En la práctica los IC se adicionan a los medios corrosivos

en cantidades menores al 0.1 % en peso. Además, en ciertos casos, la cantidad de inhibidor presente puede ser crítica, debido a que una concentración deficiente puede conllevar a un ataque corrosivo más destructivos que en ausencia de IC (Uhlig Herbert, 2011).

Una manera de clasificar a los IC es por su modo de interacción, estos pueden ser modificadores del medio e inhibidores de adsorción (Sastri, 2011). Dichas clasificaciones y sus derivados se pueden observar en la Figura 6.

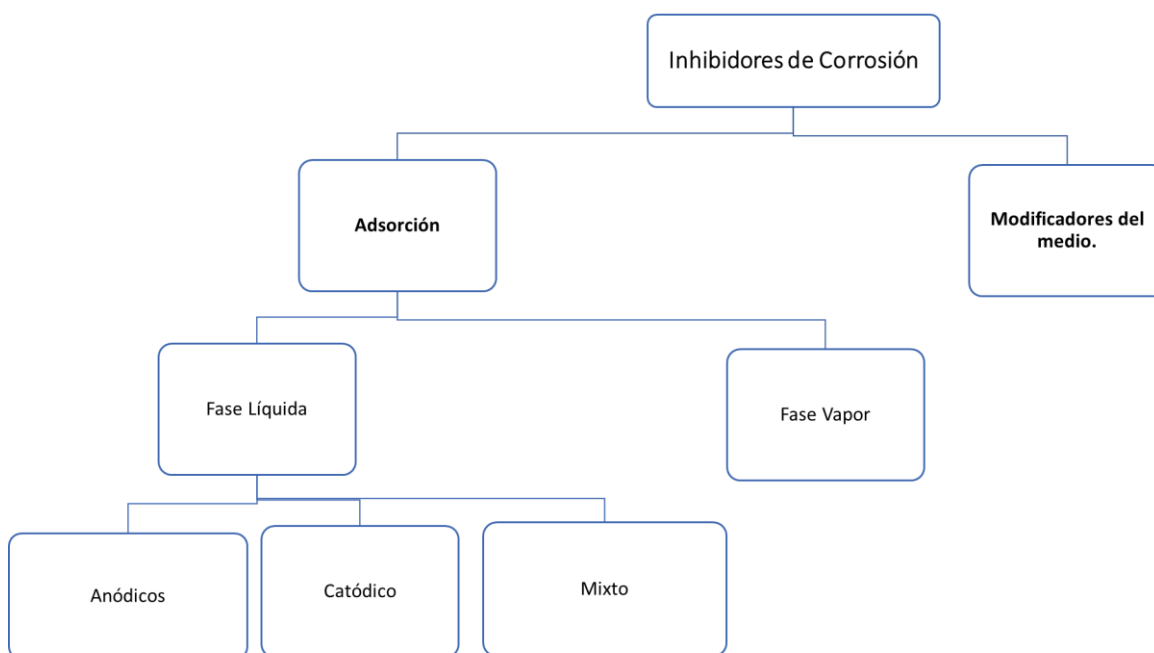


Figura 6. Clasificación de inhibidores de corrosión (Uhlig Herbert, 2011).

Los IC modificadores de medio interactúan con las especies más corrosivas del medio, de este modo previenen el ataque del metal por las especies agresivas. En el caso de los IC de adsorción, estos se clasifican en fase vapor o líquida, siendo la fase vapor una protección temporal ante la corrosión atmosférica, esto especialmente en ambientes cerrados, mientras que en fase líquida se clasifican de acuerdo a la interacción del metal con la molécula del inhibidor, si el inhibidor es anódico indican que reducen principalmente la evolución del ion hierro Fe, algunos IC anódicos son los cromatos, tungstatos, mientras que un inhibidor catódico inhibe la evolución de hidrógeno en soluciones ácidas o la reducción de oxígeno en soluciones alcalinas o neutras, algunos ejemplos son los fosfatos inorgánicos, silicatos, y boratos, finalmente el inhibidor mixto afecta a las zonas catódicas y anódicas, siendo los compuestos orgánicos los que funcionan principalmente como IC de tipo mixto, esto debido a que adsorben a la superficie

del metal formando una barrera a la disolución del ánodo y una barrera a la reducción del oxígeno en los sitios catódicos (Sastri, 2011).

Otro criterio de clasificación de los ICs es por su naturaleza química como orgánicos e inorgánicos. Algunos ejemplos de IC inorgánicos son las sales de cromatos, zinc y bario, así como nitritos y nitratos, los cuales presentan alta eficiencia contra la corrosión, sin embargo, el uso de estos fue decreciendo debido a su alta toxicidad (Toussaint, 2015).

Por otra parte, los IC orgánicos generalmente, presentan en sus estructuras químicas anillos aromáticos, dobles y triples enlaces y heteroátomos de alta densidad electrónica (N, O, S, P). Su efecto se debe principalmente a su adsorción sobre la superficie metálica (Toussaint, 2015), dicha interacción entre la interfase metal-solución es acompañada por el cambio de potencial entre el electrodo y la solución, debido a una distribución de cargas eléctricas no uniformes en la interface (Sastri, 2011). Existen diversas investigaciones utilizando extractos de plantas como ICs en medios ácidos, sin embargo, algunos presentan bajas eficiencias tal como lo reportan Abiola et al., en 2009 y 2010, donde realizaron investigaciones a base de extractos de *alloe vera* y de *Pyllanthus amarus*, respectivamente, donde obtuvieron *EI* por debajo del 65 % (Abiola & James, 2010; Abiola & Otaigbe, 2009). Otros estudios de esta clase de IC han presentado altas eficiencias, pero a concentraciones muy altas, tal como el presentado por Asadi et al., en 2019, donde obtuvieron una eficiencia del 91% utilizando extracto de bálsamo de limón a 1000 ppm; un comportamiento similar fue la investigación realizada por Dehghani et al., en 2019 quienes realizaron estudios sobre el extracto de flor de borraja como IC, presentando *EI* del 95% a 2000 ppm, ambas investigaciones fueron realizadas en HCl a concentración de 1M (Asadi et al., 2019; Dehghani, et al., 2019). Por lo anterior, se ha optado por la búsqueda de nuevos compuestos de baja toxicidad que presenten mejores *EI*.

1.4 Líquidos iónicos como inhibidores de corrosión

Una clase de IC que recientemente ha atraído el interés de la comunidad científica por sus propiedades excepcionales son los compuestos llamados líquidos iónicos. Los líquidos iónicos (LIs), son sales que a temperatura ambiente están en estado líquido. Los líquidos iónicos están compuestos por una parte catiónica y una parte aniónica. El catión tiene por lo general una estructura

orgánica de baja simetría. La parte central del catión presenta generalmente un nitrógeno o fósforo cargado positivamente, al modificarse la parte catódica las propiedades de los LIs, como el punto de fusión, viscosidad y miscibilidad con otros solventes, puede ser alterada (Krische, 2007). La clasificación de los LIs de acuerdo a su naturaleza se encuentra en el Anexo A.

Las propiedades de los LIs, tales como, baja volatilidad, baja presión de vapor, capacidad de disolver un amplio rango de compuestos orgánicos e inorgánicos, estabilidad térmica y química, entre otras, hacen que su espectro de aplicaciones industriales sea variado (Verma et al., 2018):

- Extracción de solventes.
- Análisis químicos.
- Solventes para electroquímica.
- Electrodeposición de metales y semiconductores.
- Solventes para polarización.
- Células sensibilizadas en seco.
- Síntesis de nanoestructuras funcionales.

Específicamente, durante los últimos 20 años el uso de los LIs como ICs ha crecido considerablemente (Verma et al., 2017), dado que a pesar de que compuestos volátiles tradicionales presentan altas eficiencia de inhibición en distintas industrias, la mayoría son tóxicos para los seres vivos y el medio ambiente, además debido a que el uso de extractos de planta como ICs han presentado bajas eficiencias (Abiola & James, 2010; Abiola & Otaigbe, 2009; Asadi et al., 2019; Dehghani et al., 2019) por ello el uso de los LIs como ICs se ha convertido en un método de alternativa verde para la protección ante la corrosión.

Estos compuestos presentan mayor protección, respecto a otros tipos de inhibidores, que muchas veces resultan muy costosos y perjudiciales tanto para el medio ambiente como para el ser humano. Por esta razón se han sintetizado algunos compuestos iónicos a partir de la poliaminas, aminas, anilinas, alquiltriazoles, bencilmidazoles, amino amidas, benzotriazoles, triazoles, piridinas, entre otros (Verma et al., 2018).

La literatura revela que muchos LIs sintetizados han sido usados como IC presentando resultados favorables tales como los reportados por Farag et al., en

el cual el compuesto 3-((4-amino-2-metilpirimidina-5-yl)metil)-5-(2-hidroxi-etilo)-4-metil-tiazol-3-ium cloruro (AHPMHC) usado como IC en HCl 1 M retardo la velocidad de las reacciones electroquímicas tanto de las zonas anódicas como catódicas (inhibidor tipo mixto), presentando un 91.4% de eficiencia a 40 ppm, esto debido a una capa protectora de AHPMHC en la superficie del metal, dicha capa fue analizada por las técnicas SEM y EDS (Frag et al., 2019). Por otra parte, Salhi et al., 2017. realizaron una investigación con dos compuestos derivados de Keto-enol. siendo el compuesto con mayor peso molecular el que presenta la mayor adherencia en la superficie del metal. En este estudio, el efecto de la concentración de IC en el medio fue determinante, siendo directamente proporcional con la eficiencia de inhibición (Salhi et al., 2017).

1.4.1 Líquidos iónicos a base de imidazolio

En este trabajo resulta relevante en análisis de estructuras de LIs derivados de imidazol como ICs. El término imidazol implica un sistema de anillo heterocíclico (los átomos miembros del ciclo pertenecen a dos o más elementos distintos) de cinco miembros que contiene además un nitrógeno terciario, esto se puede observar en la Figura 7 (Collin & Höke, 2000).

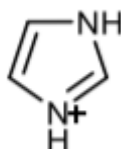


Figura 7. Ion imidazolio (Collin & Höke, 2000).

A temperatura ambiente este compuesto es altamente soluble en solventes polares, mientras que en solventes no polares es poco soluble, por lo tanto, el imidazolio es extremadamente soluble en agua (Hofman, 1953).

Los líquidos iónicos a base de imidazolio son las más estudiados, pertenecientes a todas las familias de los LIs, estas sustancias son usadas como solventes en la mayoría de los procesos químicos tales como catálisis, química sintética y separación (Gomez et al., 2019). Además, se ha demostrado que el ion imidazolio presenta resistencia a la corrosión en cobre, acero y aluminio esto en base a los estudios analíticos, electroquímicos así como análisis morfológico y

composicional (Verma et al., 2018; Wahdan et al., 2002; Q. B. Zhang & Hua, 2009).

De igual manera, Azeez et al., realizaron una investigación en HCl 1M para observar los efectos de la cadena alquílica en LIs ligados al N⁺ ubicado en la posición 3 derivados de imidazol como ICs: yoduro de 1-metil-3-propil imidazolio (MPIMI), yoduro de 1-butil-3-metilimidazolio (BMIMI) y yoduro de 1-hexil-metil imidazolio (HMIMI). Realizaron pruebas electroquímicas de polarización potenciodinámica y espectroscopía de impedancia electroquímica, además de pruebas de AFM y SEM para el análisis de la superficie metálica en presencia del inhibidor. Concluyen que entre más larga es la cadena alquílica, mayor es la eficiencia de inhibición a la corrosión que presentan los LIs estudiados. El HMIMI presento la eficiencia más grande con 93.1%, seguido de BMIMI con 87.8% y finalmente el MPIMI con 80.4%, empleando una concentración de IC de 5×10^{-3} M. Los resultados por Polarización Potenciodinámica (PDP) y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), demostraron que los tres LIs inhiben las zonas tanto anódicas como catódicas (tipo mixto), es decir, reducen la evolución de hidrógeno y del ión hierro de tipo mixto, presentando adsorción física (Azeez, et al., 2018).

Además, Guzmán et al., realizaron pruebas de cinco LIs a base de imidazolio, con diferente longitud de cadena alquílica, la Figura 8, muestra los LIs con su respectiva cadena de alquilo y su peso molecular.

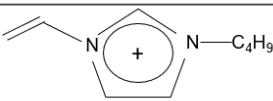
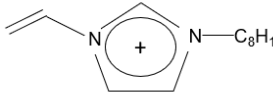
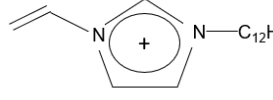
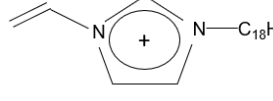
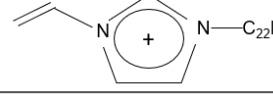
LIs	Catión	Anión	Peso Molecular
L11		Br ⁻	231.14
L12		Br ⁻	287.24
L13		Br ⁻	343.35
L14		Br ⁻	427.51
L15		Br ⁻	483.62

Figura 8. LIs a base de imidazolio (Guzmán-Lucero et al., 2011).

Después de las pruebas realizadas, se concluyó que la *EI*, incrementa con la concentración, la cual es dependiente del tamaño de la cadena alquílica siendo el IL4 el de mayor *EI* (88-95%), dichas eficiencias se obtuvieron a las temperaturas de 25-40 °C, estas eficiencias fueron atribuidas a un proceso de quimisorción, el cual fue demostrado por las pruebas de PDP y EIS, mientras que los análisis de SEM y EDS, confirman que los LIs reducen el daño superficial del acero por corrosión.

En lo que respecta al uso de LIs a base de imidazolio en H₂SO₄ 1M Likhanova et al., realizaron un estudio de las propiedades inhibitorias de bromuro de 1,3-dioctadecilimidazolio (ImDC₁₈Br) y bromuro de N-octadecilpiridinio (PyC₁₈Br). Los resultados arrojaron que a una concentración de 100 ppm y temperatura ambiente se obtienen *EI* de 88% para ImDC₁₈Br, mientras que para PyC₁₈Br fue de 82%. Los análisis superficiales, demostraron que la adsorción ocurre por un proceso químico, además se encontró la presencia de especies de carbón en gran concentración relacionada con la adsorción de los LIs sobre la superficie metálica (Likhanova et al., 2010).

Por otra parte, Corrales et al., evaluaron al LI tiocianato de 1-etil-3-metilimidazolio (EMIM)⁺ (SCN)⁻ en HCl y H₂SO₄, ambos a 0.5 M de concentración. Sus resultados muestran que el LI evaluado tiene mayor eficiencia en HCl que en H₂SO₄ (IE de 82.9% en HCl respecto a 77.4% en H₂SO₄). En los sistemas de HCl, la *EI* disminuyó con respecto al aumento de la temperatura, sin embargo, en H₂SO₄ se presentó el comportamiento de inhibición contrario. En general, en ambos medios el LI actuó como inhibidor de tipo mixto y una adsorción predominantemente física (Corrales et al., 2019).

1.5 Poli(líquidos iónicos) como inhibidores de corrosión

También conocidos como líquidos iónicos polimerizados, los poli(líquidos iónicos) (PLIs) se refieren a una rama de los poli electrolitos los cuales contienen un líquido iónico en cada monómero repitiéndose, conectado a través de un esqueleto polimérico a una arquitectura macromolecular, Figura 9.

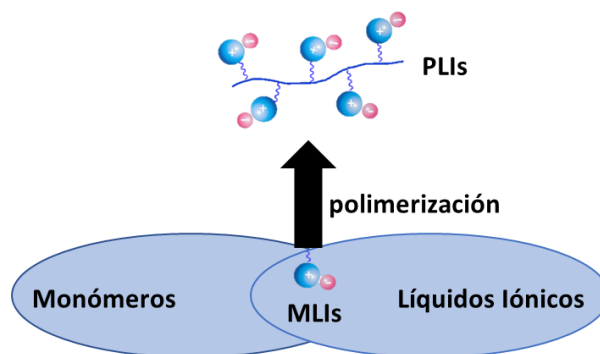


Figura 9. Relación entre LIs y PLIs, ILMs: Monómeros de líquidos iónicos (Zheng, Huyan, Li, Sun, & Xu, 2019).

Los PLIs incrementan las propiedades y aplicaciones de los LIs, además de esto, los PLIs son conocidos por ser solubles en muchos tipos de solventes orgánicos polares y no polares.

Análogamente a los LIs, los PLIs han empezado a tener aplicaciones en diferentes áreas como en energía, medio ambiente, química analítica, biotecnología y ciencia de materiales (Mecerreyes, 2011).

En lo que respecta al área de materiales, los PLIs, han comenzado a utilizarse como inhibidores de corrosión, debido a su alta estabilidad y su buena relación eficiencia-costo. A través de sus grupos funcionales, forman complejos con los iones metálicos y en la superficie metálica, estas macromoléculas ocupan un área grande de la superficie metálica, protegiendo de esta manera al metal de los agentes corrosivos presentes en la solución (Kamali & Kowsari., 2008).

En el año del 2008 Ren et al., realizaron un estudio en HCl a 10% a 25 y 80°C, observando que la eficiencia del PLI es directamente proporcional con la concentración del mismo e inversamente proporcional con el aumento de la temperatura, esto se observa en las eficiencias máximas, donde a ambas temperaturas se presentan eficiencias por encima del 95% a 1000 a 25 °C, mientras que a 80°C se obtuvo la máxima eficiencia a 5000 ppm (Ren et al., 2008).

Esto se comprueba en investigaciones tales como la que presentan Kamali et al., quienes sintetizaron un polímero derivado de imidazolio, llamado poli (bromuro de 3-butyl-1-vinilimidazolio) y lo evaluaron como IC en HCl 1 M, utilizando las técnicas de EIS, curvas de Tafel y SEM. Reportaron una *EI* máxima por encima de 96% a 400 ppm, siendo un inhibidor de tipo mixto con tendencia catódica, además se observó que el grado de corrosión del acero disminuyó con

el aumento de la concentración del PLI, finalmente la adsorción del PLI en la superficie metálica siguió el modelo de isoterma de Frumkin, predominando la fisorción (Kamali et al., 2019).

Por otra parte, Arellanes et al., realizaron la síntesis de tres PLIs a base de imidazolio con diferente longitud de cadena alquílica localizada en la tercera posición del anillo imidazolio. Los PLIs fueron evaluados utilizando las técnicas de pérdida de peso, mediciones de resistencia a la polarización y emisión óptica de plasma acoplado inductivamente en diferentes soluciones de H_2SO_4 (0.1-1 M). Los resultados revelaron que la eficiencia depende de la longitud de la cadena alquílica siendo esta relación directamente proporcional; además, la concentración de ácido de las soluciones tuvo un efecto notorio en el comportamiento anticorrosivo de los PLIs: a la concentración de H_2SO_4 0.1 M se obtuvieron las mejores eficiencias. Los PLI protegen la superficie metálica por un proceso de fisorción, conclusión determinada por el ajuste de los datos experimentales al modelo de isoterma de Langmuir (Arellanes et al., 2014).

Otro trabajo que evalúa el uso de los PLIs como ICs es el presentado por Atta et al., quienes realizaron un estudio sobre un PLI denominado PAMPS-DEA, presentando eficiencias del 95% en HCl y 25 ppm a partir del uso de técnicas electroquímicas. Este PLI presenta una adsorción del tipo química, de acuerdo con un ajuste de los datos experimentales con el uso de isoterma de adsorción de Langmuir (Atta et al., 2015).

1.6 Técnicas de análisis de corrosión

Los procesos electroquímicos comprenden el flujo de electrones entre áreas anódicas y catódicas, la velocidad de este flujo corresponde a las velocidades de las reacciones de oxidación y de reducción que ocurren sobre las superficies metálicas. Las técnicas electroquímicas son usadas para evaluar la corrosión y determinar las velocidades de las distintas reacciones, estas técnicas, pueden ser realizadas para investigaciones en campo y laboratorio, dichas pruebas ofrecen ventajas con respecto a las técnicas de pérdida de peso y análisis visual, debido a que en las técnicas electroquímicas la cinética de corrosión puede ser estudiada de manera cuantitativa (Muñoz, 2008).

Las técnicas de análisis de corrosión son estudiadas en una celda electroquímica, provista de tres electrodos: el electrodo de trabajo, el electrodo de referencia y el electrodo auxiliar o contra electrodo.

El electrodo de trabajo es aquel donde se realizan las reacciones químicas de interés, sobre este electrodo se realiza la imposición de potencial o corriente. Mientras que el electrodo de referencia fija la variación de los parámetros que se utilizan para caracterizar las reacciones electroquímicas, su potencial debe ser fijo y conocido, por lo que cualquier cambio en la celda es atribuible al electrodo de trabajo. Por otra parte, el contraelectrodo cierra el circuito eléctrico en la celda, sucede el proceso contrario al electrodo de trabajo, el contraelectrodo más utilizado es el electrodo de platino, esto debido a su alta estabilidad e inmunidad ante la corrosión, tal como se ve en la Figura 10, donde se observa que solo bajo condiciones muy específicas se corroe (pH de 0 a -2 y un potencial de 1.2 V).

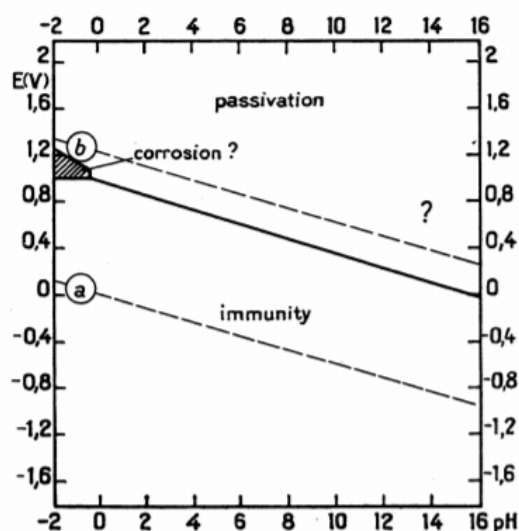


Figura 10. Diagrama de Pourbaix del platino (Parsons, 1967).

1.6.1 Polarización Potenciodinámica

La relación entre la corriente y el potencial de un electrodo puede ser evaluada controlando el potencial y la corriente. La forma más utilizada para medir la relación corriente/potencial es el escaneo potenciodinámico, esto consiste en que el potencial es escaneado a una velocidad fija entre dos valores dados, mientras que la corriente es medida a distintos intervalos (Dean, 1986). Esta técnica proporciona información acerca de la cinética de la corrosión y el comportamiento del electrodo de trabajo. Además, esta técnica permite el estudio de la corrosión uniforme y de la corrosión localizada (Muñoz, 2008).

Polarización de Tafel

Creada en 1905 por Julius Tafel, muestra la relación entre el logaritmo de la densidad de corriente ($\log i$) y el potencial del electrodo de trabajo (E), a dicha relación se le conoce como “comportamiento tafeliano” (Berradja, 2019).

Las curvas Tafel (graficas de E vs $\log i$), proporcionan información para determinar la velocidad de corrosión, el tipo de cinética que controla la velocidad de las reacciones electroquímicas (control por activación o por difusión), así como el comportamiento del metal, ya sea activo (metal produce grandes cantidades visibles de corrosión) o pasivo (una película cubre al metal, velocidad de corrosión es baja) (Muñoz, 2008).

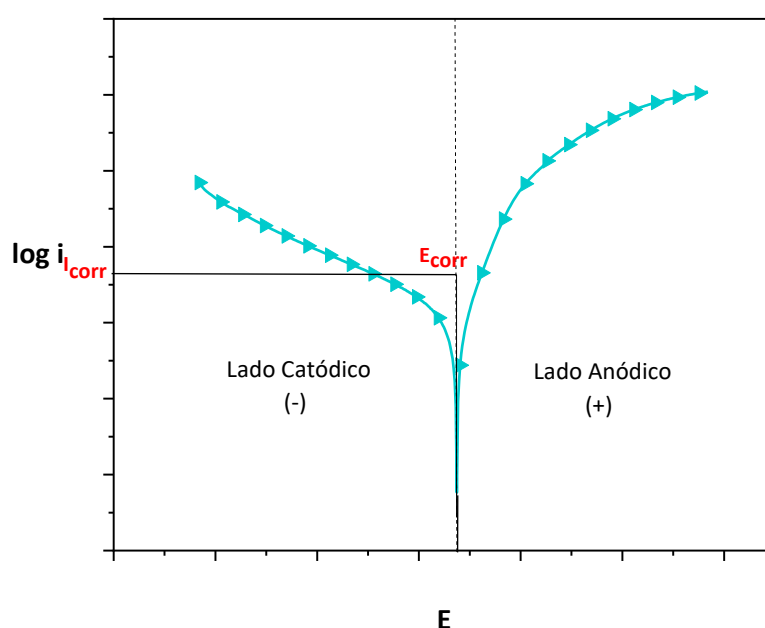


Figura 11. Ejemplo de una curva Tafel.

La Figura 11, muestra una curva de Tafel típica, siendo la zona anódica la que presenta valores más positivos y la región catódica la que presenta potenciales más negativos, respecto al potencial de corrosión, mediante el cálculo de las pendientes de ambas zonas pueden obtenerse los valores de densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) y potencial de corrosión (E_{corr}).

Resistencia a polarización

La técnica de resistencia a la polarización es una técnica electroquímica no destructiva, que permite conocer la resistencia que opone la interfase metálica al paso de corriente eléctrica. Un electrodo se polariza cuando su potencial se aleja de su valor en circuito abierto o potencial de corrosión, mientras que la

polarización de un electrodo genera el flujo de la corriente debido a las reacciones electroquímicas que se inducen en la superficie del electrodo. La resistencia a la polarización se define mediante la Ecuación 1 (Metrohm, 2011).

$$R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta i} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} \quad (1)$$

donde ΔE es el cambio del potencial y Δi el cambio con respecto a la corriente, la resistencia a la polarización es el cambio del potencial dividido con el cambio en la densidad de corriente. Esta técnica consiste en hacer un barrido pequeño de potencial (± 20 mV respecto al potencial a circuito abierto) del material a analizar y se obtiene una respuesta de corriente (Corte Morquecho & Estrella Peña, 2010). La Figura 12 muestra el comportamiento lineal entre el voltaje y la corriente, donde el valor inverso de la pendiente es la resistencia a la polarización.

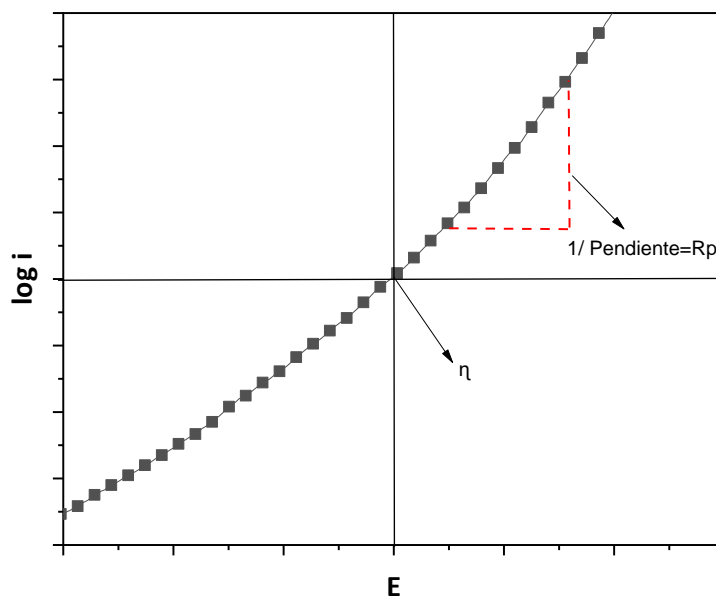


Figura 12. Ejemplo de un gráfico de resistencia a la polarización.

1.6.2 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica

La Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés Electrochemical Impedance Spectroscopy) es una técnica que sirve para caracterizar las propiedades eléctricas de los materiales y sus interfases, puede ser usada para investigar la carga ligada o móvil de cualquier material sólido o líquido, ya sean conductores, semiconductores o incluso puede ser empleada para aislantes (Hara et al., 2013). Dicho método estudia la respuesta al aplicarse corriente alterna (ca) de pequeña amplitud, las mediciones son llevadas a diferentes frecuencias de ca, el análisis de la respuesta da información acerca

de la interfase, su estructura y las reacciones llevadas a cabo en el material de estudio (B. E Conway, 2002).

Los resultados de los análisis de EIS, se representan mediante gráficas de Nyquist y Bode, siendo las primeras las más utilizadas en la literatura debido a que permiten una predicción fácil de los elementos a estudiar tal como una fácil relación al modelo eléctrico, sin embargo, no muestran todos los detalles, es por esto que ambas graficas son usadas en el análisis de EIS.

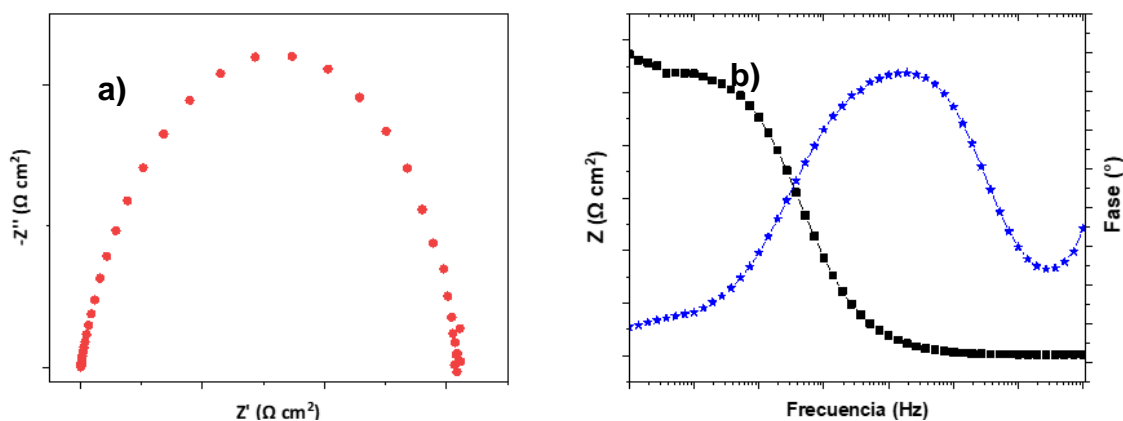


Figura 13. Ejemplo de diagrama de (a) Nyquist y (b) Bode.

La Figura 13 muestra un ejemplo de una gráfica de (a) Nyquist y (b) Bode, para el diagrama de Nyquist se gráfica la impedancia real (Z') vs la impedancia imaginaria (Z''), mientras que una gráfica Bode muestra la relación del logaritmo de la frecuencia vs impedancia (curva negra) y el logaritmo de la frecuencia vs la fase (curva azul). Para los análisis de resultados experimentales se utilizan circuitos equivalentes, los cuales representan mediante elemento eléctricos (resistencias, capacitancias, inductores, etc) lo que ocurre en una interfase metálica (Tribollet, 2008). La Figura 14 es un ejemplo de un circuito eléctrico equivalente.

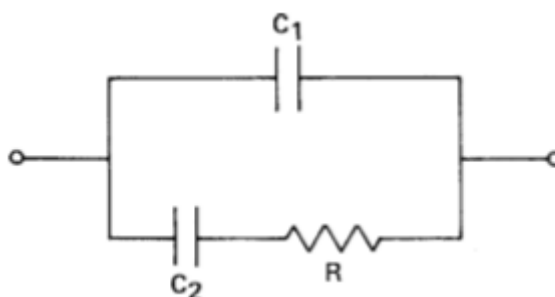


Figura 14. Ejemplo circuito equivalente (Tribollet, 2008).

1.6.3 Pérdida de peso.

Los análisis analíticos y gravimétricos evalúan el grado de deterioro de los metales mediante el análisis de la pérdida de peso o la cantidad del metal que pasaba de forma iónica a una solución corrosiva. La técnica de pérdida de peso, tal como su nombre lo indica consiste en exponer una muestra metálica en un medio corrosivo por un tiempo definido y determinar por la pérdida de peso del material la velocidad de corrosión de este, la Ecuación 2 muestra los parámetros utilizados para el cálculo de la velocidad de corrosión (Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, 2012):

$$\text{Velocidad de corrosión} = (K * W) / (A * T * D) \quad (2)$$

donde W es la pérdida de masa en gramos, A es el área en cm², T es el tiempo de exposición en horas, D es la densidad en g/cm³ y K es la constante empleada en base a las unidades que se requieran (ver Tabla 3).

Tabla 3. Valores de la constante K.

Velocidad de Corrosión, Unidades Deseadas	Constante (K) para la ecuación 2
Mils por año	3.45x10 ⁶
Pulgadas por año (ipy)	3.45x10 ³
Pulgadas por mes (ipm)	2.87x10 ²
Milímetros por año (mm/y)	8.76x10 ⁴
Micrómetros por año (µm/y)	8.76x10 ⁷
Picómetros por segundo (pm/s)	2.78x10 ⁶
Gramos por metro cuadrado por hora (g/m ² -h)	1.00x10 ⁴ xD ^A
Miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd)	2.40x10 ⁶ xD ^A
Microgramos por metro cuadrado por segundo (µg/m ² -s)	2.78x10 ⁶ xD ^A

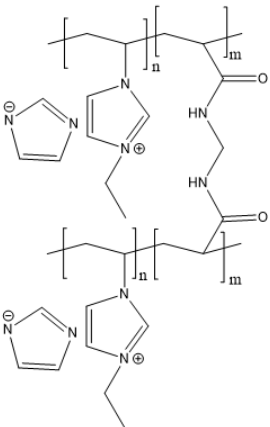
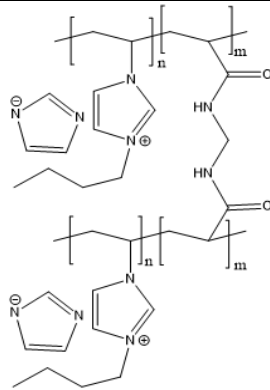
CAPITULO 2. METODOLOGÍA

2.1 Preparación de soluciones de prueba

El medio corrosivo evaluado en este estudio fueron dos soluciones acuosas de H₂SO₄ y HCl a una concentración de 1 M, para ello se utilizó H₂SO₄ al 98% y HCl 36.5% de alta pureza de la marca Sigma-Aldrich Co y agua desionizada.

Los PLIs evaluados como IC se presentan en la Tabla 4, cuya síntesis y caracterización se reportan en el Anexo B. Se emplearon soluciones conteniendo diferentes concentraciones de los PLIs las cuales se prepararon de acuerdo con la siguiente metodología.

Tabla 4. Estructura química de los PLIs evaluados como ICs.

Abreviación	Estructura química	Nombre	Peso Molecular (g/gmol)	Polidispersidad
<i>P(VIM2C)</i> [IM]		Imidazolato de poli(1-vinil-3-etilimidazoleo)	583,902	1.3
<i>P(VIM4C)</i> [IM]		Imidazolato de poli(1-vinil-3-butylimidazoleo)	704,418	1.3

Primero se prepararon dos soluciones de 1000 ppm de cada PLI en etanol, a fin de asegurar la disolución de los polímeros; posteriormente se realizaron

disoluciones de para obtener concentraciones de 50, 100, 150 y 200 ppm de PLI en el medio ácido corrosivo.

2.2. Preparación de muestras metálicas

El acero AISI 1018 fue el material metálico utilizado en este estudio. Este acero es de bajo-medio carbono, y presenta buena soldabilidad y mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono, debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria empleada en diversos sectores industriales (SUMITEC, 2009). La Tabla 5 y 6 muestran las propiedades físicas y composición química del acero AISI 1018, respectivamente.

Tabla 5. Propiedades mecánicas y físicas acero AISI 1018 (SUMITEC, 2009).

PROPIEDAD MECANICA Y FISICA	SISTEMA INTERNACIONAL	SISTEMA INGLÉS
Dureza	126 HB	71 HRb
Esfuerzo de fluencia	370 MPA	53700
Esfuerzo Máximo	440 MPA	63800 PSI
Módulo de Elasticidad	205 GPA	29700 KSI
Densidad	7.87 g/cm ³	0.284 lb/in ³

Tabla 6. Composición química acero AISI 1018 (SUMITEC, 2009).

ELEMENTO	% PESO
Carbono (C)	0.15-0.2 %
Manganeso (Mn)	0.4-0.6 %
Fósforo (P)	0.04 % máx.
Azufre (S)	0.05 % máx.
Hierro (Fe)	Balance

Los electrodos de trabajo empleados para la realización de las pruebas electroquímicas se hicieron con cilindros de acero AISI 1018 con un diámetro de 0.6 cm, estos se conectaron a un cable de cobre a través de un pivote en el extremo de los cilindros, como se muestra en la Figura 15; posteriormente fueron colocados en una probeta de teflón, el espacio entre la probeta y la pieza metálica se llenó con resina epóxica, para dejar un área metálica superficial de 0.2827 cm².

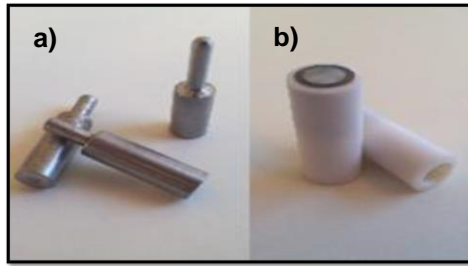


Figura 15. Muestras de acero AISI 1018 sin teflón (a) y con teflón (b).

Posteriormente, a fin de obtener una superficie uniforme el electrodo de trabajo se desbaste con lijas de SiC de grado 320, 600 y 1200, se enjuagó con isopropanol y acetona, y finalmente se secó con una corriente de aire fría, este procedimiento se realizó de acuerdo a la norma ASTM G5 (Materials, 1999) y se repitió antes de cada prueba electroquímica para asegurar la reproducibilidad de los experimentos.

2.3. Pruebas Electroquímicas

En una celda de vidrio de tres bocas se colocó un electrodo de platino (contraelectrodo o auxiliar), la probeta de acero AISI 1018 (electrodo de trabajo) y un electrodo de Plata cloruro de plata (Ag/Ag Cl) (electrodo de referencia); tanto el contraelectrodo como el electrodo de trabajo hacen contacto directo con el medio corrosivo (ácido sulfúrico o clorhídrico), sin embargo, el electrodo de referencia es colocado dentro de un capilar de luggin lleno con la solución corrosiva, el cual proporciona una ruta iónica sin difusión con el electrodo de trabajo. Después, cada electrodo es conectado al equipo de potenciostato galvanostato AUTOLAB el cual se vincula a un equipo de cómputo y a través del software NOVA 2.1.4 en donde se ejecutan las pruebas electroquímicas. La Figura 16, muestra de manera resumida la metodología para la realización de las pruebas electroquímicas.

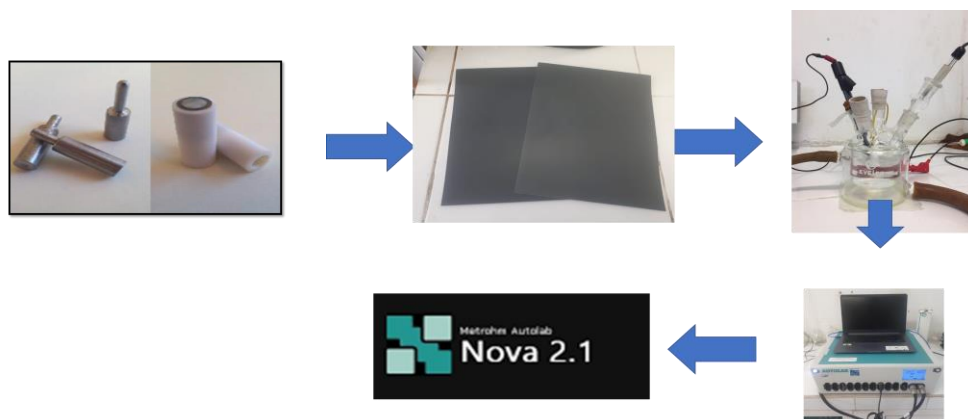


Figura 16. Metodología celda electroquímica.

Las técnicas electroquímicas empleadas fueron polarización potenciodinámica (PDP), resistencia a la polarización (R_p) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Antes de cada prueba electroquímica se realizaron mediciones de potencial a circuito abierto (EOCP) después de 15 minutos de someter a inmersión el electro de trabajo en la solución corrosiva. A fin de asegurar la reproducibilidad de los experimentos cada prueba electroquímica se realizó por triplicado.

La técnica de polarización potenciodinámica proporciona información acerca de la cinética de la corrosión uniforme y corrosión localizada, además, es ampliamente utilizada para determinar la eficiencia de un inhibidor de corrosión (Castro, 2008). La técnica de polarización de Tafel se obtuvo con un barrido potencial de -250 mV a +250 mV respecto al E_{OCP} , a una velocidad de barrido de 1 mV/s. Las pruebas de resistencia a la polarización (R_p) se realizaron con un barrido de -20 a +20 mV con una velocidad de barrido de 0.166 mV/s (ASTM-G102, 1994.). Con los resultados obtenidos en cada prueba, se calcularon las eficiencias de inhibición (EI), mediante las Ecuaciones 3 y 4.

$$EI_{TAFEL} = \left(\frac{i_{corr}^0 - i_{corr}^I}{i_{corr}^0} \right) * 100 \quad (3)$$

$$EI_{Rp} = \left(\frac{Rp^I - Rp^0}{Rp^I} \right) * 100 \quad (4)$$

donde R_p es la resistencia a la polarización, mientras que i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión, mientras que los superíndices 0 e I, son asignados a los sistemas en ausencia y presencia del inhibidor.

Para las pruebas de EIS se utilizó una señal AC con amplitud de 5 mV, respecto al E_{OCP} , los rangos de frecuencia empleados fueron de 100 kHz – 0.01 Hz con un número total de 50 frecuencias (ASTM-G3, 1999). Los espectros de EIS se analizaron en términos de circuitos equivalentes usando el software NOVA 2.1.4. Tanto las gráficas de polarización potenciodinámica como los espectros de impedancia, Figura 17, se analizaron para evaluar el comportamiento anticorrosivo de los PLIs estudiados.

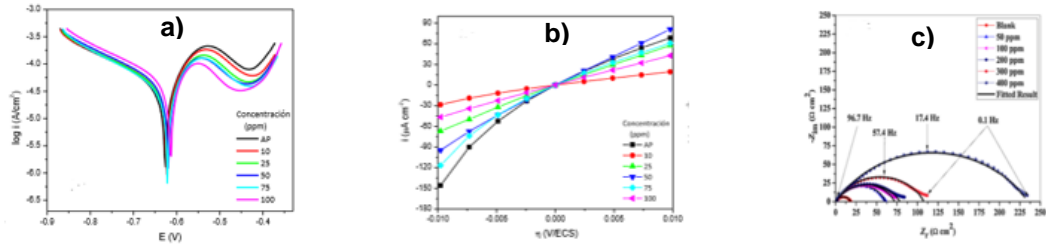


Figura 17. Ejemplos de gráficos de Tafel (a), Rp (b) y EIS (c).

2.4. Análisis gravimétrico

Se utilizaron piezas rectangulares del acero AISI 1018, con dimensiones de 1 × 1 × 0.2 cm, se desbastaron con lijas de SiC de número 320, 600 y 1200, se limpiaron con isopropanol y acetona, y secaron con corriente de aire frío; posteriormente se pesaron y midieron por triplicado, y sometieron a inmersión en soluciones acuosas de H₂SO₄ y HCl 1 M en ausencia y en presencia de 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 y 200 ppm de P(VIM4C) [IM] (ASTM D2756-85, 1998). Transcurridas 6 horas las muestras se retiraron de las soluciones, cepillaron, enjuagaron con isopropanol y acetona, secaron con aire y se pesaron nuevamente por triplicado, esto con el objetivo de determinar la pérdida de peso producida por el proceso corrosivo. La *EI* obtenida por el análisis gravimétrico (*EI_G*) se calculó mediante la Ecuación 5.

$$EI_G = \frac{W^0 - W^I}{W^0} * 100 \quad (5)$$

CAPITULO 3 RESULTADOS

3.1 Polarización potenciodinámica por curvas Tafel

3.1.1 Curvas Tafel de P(VIM2C) [IM]

Las curvas de polarización del acero AISI 1018 en H₂SO₄ y HCl 1M en presencia y ausencia P(VIM2C) [IM] a 25°C se muestran en la Figura 18 y Figura 19, respectivamente. En ambos casos se observa un desplazamiento la densidad de corriente ($\log i$) hacia valores menores en presencia del PLI, indicando su efecto protector contra la corrosión del acero. Además se observa una modificación del E_{OCP} respecto a los sistemas de referencia (en ausencia de PLI), donde a las diferentes concentraciones se observa un ligero desplazamiento hacia el lado anódico (valores menos negativos), indicando que el PLI actúa sobre la superficie metálica inhibiendo tanto las zonas catódicas así como las anódicas, con preferencia a estas última, es decir, el PLI tiende a adsorberse tanto en las zonas anódicas como catódicas y retarda preferencialmente la reacción de disolución de Fe⁰ (Likhanova et al., 2010). Además, en H₂SO₄ se obtienen mayores E_I respecto a HCl, esto se debe a que el PLI, presenta una mejor adsorción en este ácido que con respecto a HCl, como se observa en la Figura 18 y Figura 19, debido a que en la competencia por los sitios activos entre las moléculas del inhibidor y los iones sulfatos (en H₂SO₄), cloruros (en HCl) y protones presentes en ambos medios (H⁺), los iones Cl⁻ presentan mayor fuerza hacia los sitios activos de la superficie del acero AISI 1018.

Las curvas anódicas mostradas en la Figura 18 y 19 muestran un comportamiento no Tafeliano, es decir, comportamiento no lineal en al menos una década de corriente a partir de - 80 mV vs E_{corr} , de esta manera la obtención de la pendiente anódica (β_a) en estos sistemas no es válida. Por lo anterior, se calcularon los parámetros electroquímicos de los diferentes sistemas a partir de la interpolación lineal de la curva catódica con el potencial de corrosión (E_{corr}), estos valores se reportan en la Tabla 7 y 8.

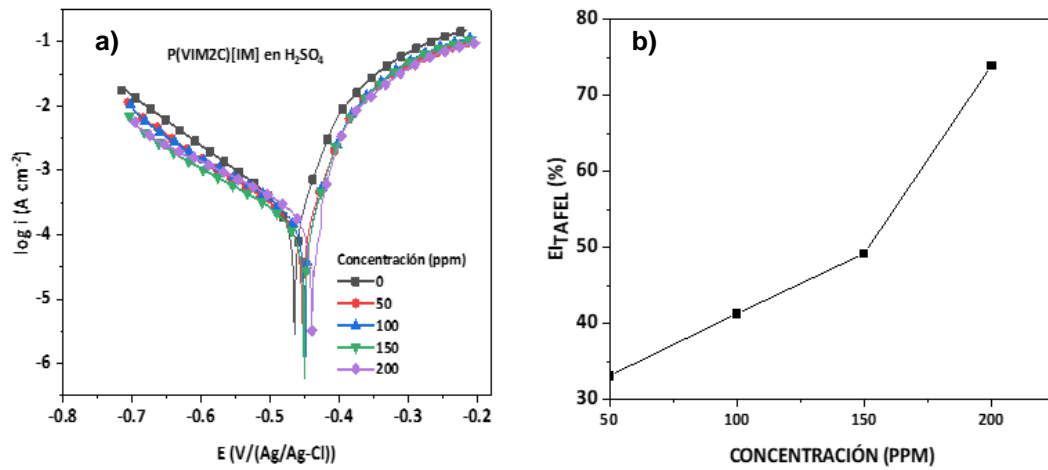


Figura 18. Curvas Tafel (a) y gráficas de E_{TAFEL} (b) para acero AISI 1018 en H_2SO_4 1M usando P(VIM2C) [IM] como IC.

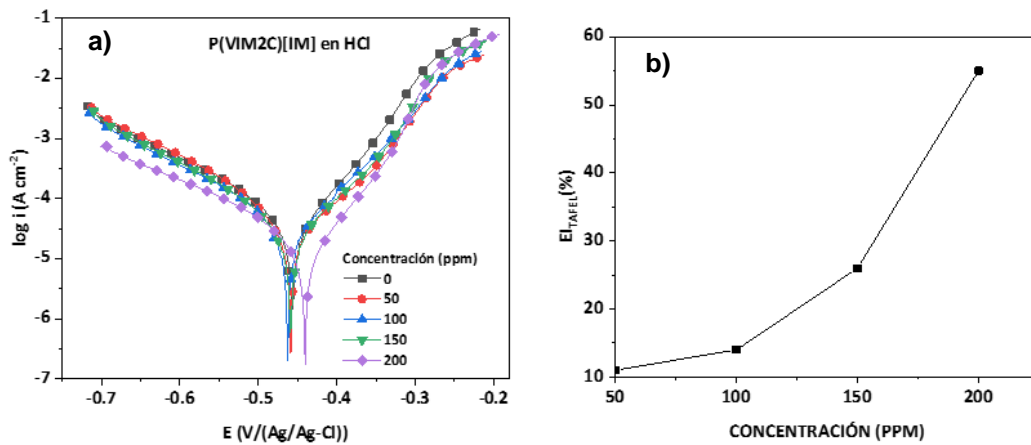


Figura 19. Curvas Tafel (a) y gráficas de E_{TAFEL} (b) para acero AISI 1018 en HCl 1M usando P(VIM2C) [IM] como IC.

Tabla 7. Parámetros electroquímicos obtenidos por curva de Tafel de acero AISI 1018 en H_2SO_4 1 M conteniendo diferentes concentraciones de P(VIM2C) [IM].

Concentración (ppm)	$-E_{corr}$ (mV vs Ag/AgCl)	i_{corr} ($\mu A cm^{-2}$)	V_{corr} (mm año $^{-1}$)	$-\beta_C$ (mV dec $^{-1}$)	E_{TAFEL} (%)
0	464 ± 2	37 ± 1	2.28 ± 0.3	134 ± 5	-
50	472 ± 1	25 ± 2	1.79 ± 0.13	143 ± 2	33
100	464 ± 1	22 ± 1	1.64 ± 0.03	161 ± 0	41
150	470 ± 0	19 ± 1	1.37 ± 0.6	145 ± 4	49
200	469 ± 3	10 ± 1	1.32 ± 0.18	147 ± 2	74

Tabla 8. Parámetros electroquímicos obtenidos por curva de Tafel de acero AISI 1018 en HCl 1 M conteniendo diferentes concentraciones de P(VIM2C) [IM].

Concentración (ppm)	$-E_{\text{corr}}$ (mV vs Ag/AgCl)	i_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	V_{corr} (mm año $^{-1}$)	$-\beta_{\text{C}}$ (mV dec $^{-1}$)	E_{TAFEL} (%)
0	456 \pm 0	9.98 \pm 3	0.41 \pm 0.15	143 \pm 4	----
50	462 \pm 1	8.86 \pm 1	0.36 \pm 0.02	134 \pm 0	11
100	458 \pm 3	8.59 \pm 1	0.35 \pm 0.1	161 \pm 2	14
150	459 \pm 1	7.42 \pm 2	0.30 \pm 0.01	134 \pm 1	26
200	440 \pm 0	4.49 \pm 1	0.18 \pm 0.02	147 \pm 1	55

Un método para la determinación del tipo de IC es el análisis de E_{corr} , si el desplazamiento de los valores se encuentra en el rango de ± 85 mV respecto al blanco, el inhibidor es de tipo anódico (+ 85 mV) o catódico (- 85 mV), si la diferencia es menor a ± 85 mV es de tipo mixto. La adición de P(VIM2C) [IM] a los medios corrosivos produjo un desplazamiento de los valores de E_{corr} de -18 a -10 mV en solución de H_2SO_4 , como se observa en la Tabla 7; mientras que en solución de HCl la diferencia va de -16 a +6 mV, Tabla 8. Por lo tanto, es posible concluir que el polímero P(VIM2C) [IM] presenta un comportamiento de tipo mixto en ambos medios corrosivos.

Por otra parte, respecto al efecto de los PLIs en las pendientes catódicas (β_{c}) de las pruebas de polarización, en la Tabla 7, se muestra que la concentración del IC no tiene un efecto bien definido respecto a los valores de β_{c} , esto indica que el P(VIM2C) [IM] retarda las reacciones de evolución de hidrógeno por un bloqueo de sitios activos catódicos de la superficie del acero (Farag et al., 2018). Un comportamiento similar se presenta en las pendientes anódicas de la Figura 18 y Figura 19, por lo tanto, el PLI estudiado también retarda las reacciones de disolución de Fe^0 por bloqueo de sitios activos.

3.1.2 Curvas Tafel de P(VIM4C) [IM]

La Figura 20 y Figura 21 muestran las curvas de polarización del acero AISI 1018 en HCl y H_2SO_4 1M en presencia y ausencia P(VIM4C) [IM] a 25°C respectivamente. Se observa que las curvas en presencia de PLI, se desplazan hacia valores de i_{corr} menores, aproximadamente una década de densidad de corriente, sugiriendo que el P(VIM4C) [IM] retarda la cinética de las reacciones

de óxido-reducción involucradas durante el proceso corrosivo. Debido a que la densidad de corriente de corrosión es una variable que puede ser empleada para realizar cálculos de E_I de acuerdo con la Ecuación 3, en la Figura 20 y Figura 21 se presenta la relación de la E_{TAFEL} vs concentración, donde se observa que los valores de E_{TAFEL} son notoriamente mayores que los obtenidos con el polímero P(VIM2C) [IM] en ambos medios corrosivos, obteniéndose la mayor E_{TAFEL} de 99 %. Respecto al E_{corr} , valores reportados en la (Tabla 10), se observa que al igual que el P(VIM2C) [IM], el P(VIM4C) [IM] modifica el E_{corr} sugiriendo que la interfase metal-solución es alterada por el polímero.

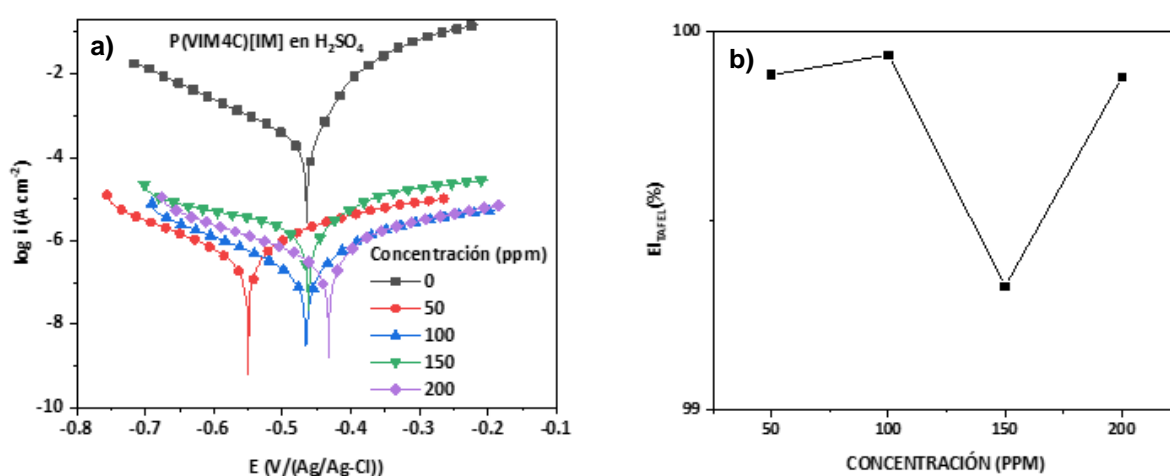


Figura 20. Curvas Tafel (a) y gráficas de E_{TAFEL} (b) para acero AISI 1018 en H_2SO_4 1M usando P(VIM4C) [IM] como IC.

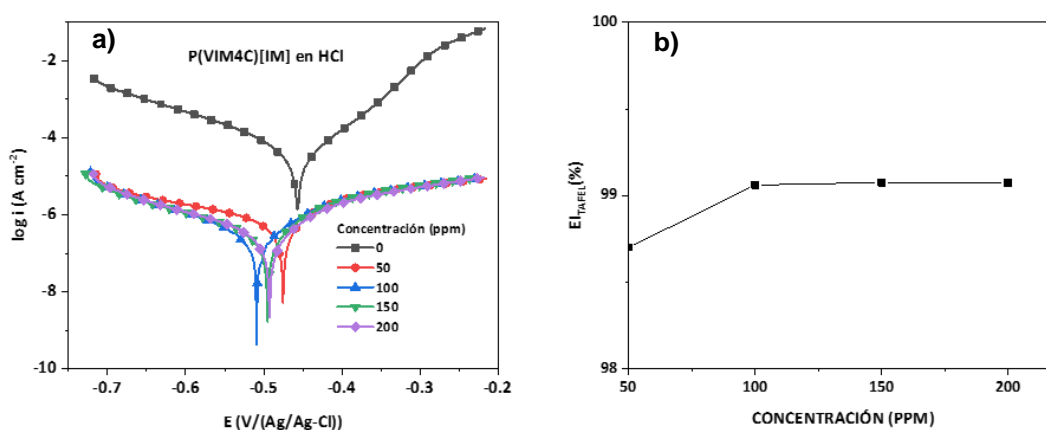


Figura 21. Curvas Tafel (a) y gráficas de E_{TAFEL} (b) para acero AISI 1018 en HCl 1M usando P(VIM4C) [IM] como IC.

Además, estos desplazamientos hacia valores más negativos, como se observan en la Figura 20 y Figura 21, indican que el P(VIM4C) [IM] se adsorbe

preferencialmente sobre las zonas catódicas, retardando la producción de hidrógeno de la reacción de reducción (ver Tabla 2). (Likhanova et al., 2010)

Tabla 9. Parámetros electroquímicos obtenidos por curva de Tafel de acero AISI 1018 en H₂SO₄ 1 M conteniendo diferentes concentraciones de P(VIM4C) [IM].

Concentración (ppm)	-E _{corr} (mV vs Ag/AgCl)	i _{corr} (μA cm ⁻²)	V _{corr} (mm año ⁻¹)	β _A (mV dec ⁻¹)	-β _C (mV dec ⁻¹)	EI _{TAFEL} (%)
0	464 ± 2	37 ± 1	2.28 ± 0.3	47 ±	134 ± 5	-
50	549 ±	0.061 ±	3x10 ⁻³	104 ± 1	124 ± 2	99
100	465 ±	0.033 ±	1.3x10 ⁻³ ±	93 ± 2	130 ± 4	99
150	462 ±	0.036 ±	1.5x10 ⁻³ ±	111 ± 2	231 ± 3	99
200	439 ±	0.065 ±	2x10 ⁻³ ±	111 ± 3	151 ± 5	99

Tabla 10. Parámetros electroquímicos obtenidos por curva de Tafel de acero AISI 1018 en HCl 1 M conteniendo diferentes concentraciones de P(VIM4C) [IM].

Concentración (ppm)	-E _{corr} (mV vs Ag/AgCl)	i _{corr} (μA cm ⁻²)	V _{corr} (mm año ⁻¹)	β _A (mV dec ⁻¹)	-β _C (mV dec ⁻¹)	EI _{TAFEL} (%)
0	456 ± 0	9.98 ±	0.41035	63	143 ± 4	-
50	482 ± 2	1.3x10 ⁻¹	5.3x10 ⁻³	138 ± 2	200 ± 3	99
100	465 ± 3	9.4x10 ⁻²	3.7x10 ⁻³	152 ± 3	152 ± 1	99
150	505 ± 3	9.2x10 ⁻²	3.7x10 ⁻³	127 ± 3	175 ± 2	99
200	506 ± 1	9.3x10 ⁻²	3.8x10 ⁻³	148 ± 1	166 ± 2	99

El análisis de los valores de E_{corr} presentados en la Además, estos desplazamientos hacia valores más negativos, como se observan en la Figura 20 y Figura 21, indican que el P(VIM4C) [IM] se adsorbe preferencialmente sobre las zonas catódicas, retardando la producción de hidrógeno de la reacción de reducción (ver Tabla 2). (Likhanova et al., 2010)

Tabla 9 y 10 indican que el P(VIM4C) [IM] es un IC de tipo mixto con tendencia catódica: los desplazamientos de E_{corr} en P(VIM4C) [IM] son de -25 a 1mV (Además, estos desplazamientos hacia valores más negativos, como se observan en la Figura 20 y Figura 21, indican que el P(VIM4C) [IM] se adsorbe preferencialmente sobre las zonas catódicas, retardando la producción de hidrógeno de la reacción de reducción (ver Tabla 2). (Likhanova et al., 2010)

Tabla 9) en presencia de H₂SO₄, mientras que en HCl se presentó una diferencia de -26 a +50 mV (Tabla 10) a los valores de β_a y β_c presentes en la Además,

estos desplazamientos hacia valores más negativos, como se observan en la Figura 20 y Figura 21, indican que el P(VIM4C) [IM] se adsorbe preferencialmente sobre las zonas catódicas, retardando la producción de hidrógeno de la reacción de reducción (ver Tabla 2). (Likhanova et al., 2010)

Tabla 9 y 10. En ambas tablas se puede ver un aumento en ambos coeficientes, sin embargo, este aumento no es proporcional, por lo que se infiere que el P(VIM4C) [IM] no modifica el mecanismo de inhibición en las zonas catódicas y anódicas, sin embargo, retarda tanto la evolución de hidrógeno como la disolución de Fe^0 de una manera muy eficaz, la enorme diferencia entre las eficiencias de ambos PLIs, es debida al tamaño macromolecular de los polímeros, debido a que en P(VIM4C) [IM], existe una cadena alquílica de mayor longitud que pueden ocupar mayor cantidad de sitios activos en el metal, inhibiendo con mayor eficiencia las zonas anódicas y/o catódicas del acero AISI 1018 por (Xia et al., 2008).

3.2 Resistencia a la polarización (R_p)

3.2.1 R_p de P(VIM2C) [IM]

Para obtener los valores de R_p , se realizó una regresión lineal a las curvas de la Figura 22 a la Figura 25, estas muestran el comportamiento de la densidad de la corriente vs sobrepotencial (η) en función de la concentración de PLI. Se observa que la presencia de los PLIs en los sistemas corrosivos genera la disminución de las pendientes i vs η en ambos medios corrosivos, debido a que la R_p es igual al inverso de la pendiente, es posible deducir que la presencia de PLI P(VIM2C) [IM] en los sistemas corrosivos incrementa la resistencia a la transferencia de electrones de las reacciones electroquímicas y se retarda la cinética de las reacciones de óxido-reducción del proceso corrosivos, incrementando de esta manera los valores de $E_{/R_p}$. La Tabla 11 y 12 muestran los valores obtenidos de las curvas de R_p del acero AISI 1018 en ambos medios corrosivos conteniendo PLIs como ICs. En H_2SO_4 se observa que los valores de R_p son función de la concentración de ICs, es decir, a mayor concentración de PLI se presentan los valores más altos de R_p . Sin embargo, en sistemas de HCl no se presenta una dependencia de la concentración con R_p .

Además, los resultados de R_p coinciden con los obtenidos con curvas Tafel es decir los sistemas más eficientes se tienen con soluciones de H_2SO_4 1 M a 50,100,150 y 200 ppm. De la misma manera que en la Sección 3.1, el análisis de los desplazamientos de E_{corr} por la técnica de R_p indica que los PLIs son inhibidores de tipo mixto: en H_2SO_4 los desplazamientos se encuentran en el rango de -464 ± 25 mV y en soluciones de HCl de -456 ± 16 mV (Wang et al., 2011).

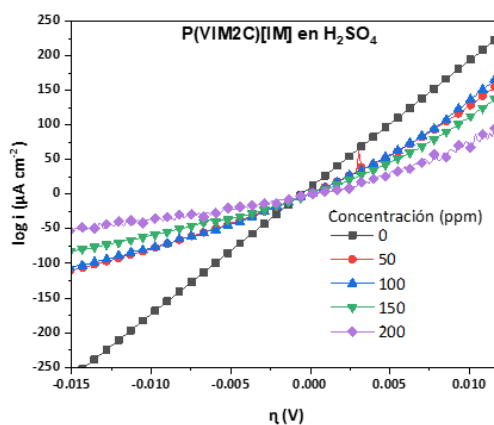


Figura 22. Curvas de Resistencia a la Polarización del acero AISI 1018 en soluciones de H_2SO_4 y P(VIM2C) [IM].

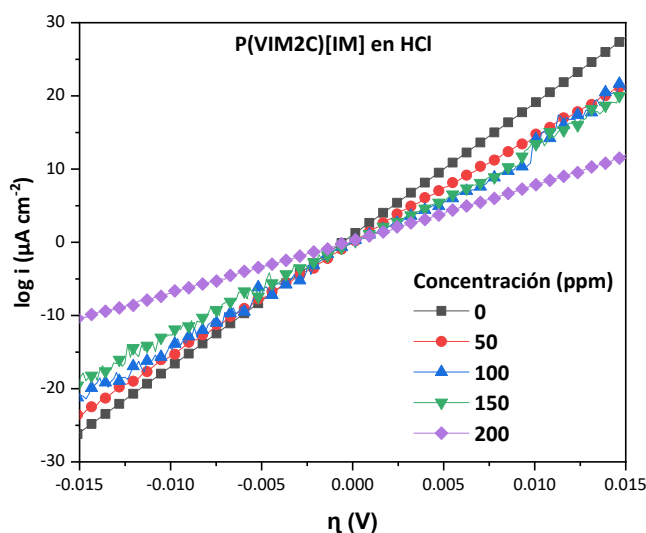


Figura 23. Curvas de Resistencia a la Polarización del acero AISI 1018 en soluciones de HCl y P(VIM2C) [IM].

Tabla 11. Parámetros electroquímicos por R_p obtenidos del acero AISI 1018 en soluciones de H_2SO_4 y P(VIM2C) [IM].

Concentración (ppm)	$-E_{corr}$ (mV vs Ag/AgCl)	R_p (Ω cm ²)	EI_{Rp} (%)
---------------------	-----------------------------	------------------------------------	---------------

0	464	61	----
50	453	98	38
100	449	97	45
150	456	128	54
200	439	208	76

Tabla 12. Parámetros electroquímicos por Rp obtenidos del acero AISI 1018 en soluciones de HCl y P(VIM2C) [IM].

Concentración (ppm)	- E _{corr} (mV vs Ag/AgCl)	Rp (Ω cm ²)	EI _{Rp} (%)
0	456	577	----
50	458	669	14
100	440	759	17
150	459	818	24
200	462	1355	29

3.2.2 Rp de P(VIM4C) [IM]

En la Figura 24 y Figura 25 se observa la relación de i vs η del acero AISI 1018 en soluciones ácidas de H₂SO₄ y HCl 1 M con y sin P(VIM4C) [IM] a las mismas concentraciones que P(VIM2C) [IM] respectivamente. Mediante el método de regresión lineal se calcularon de los valores de Rp reportados en la Tabla 13 y 14, en donde se observa que en presencia de P(VIM(4C) [IM] se obtienen valores de Rp muy altos independientemente de las concentraciones empleadas, de hasta sesenta veces más grandes respecto al blanco, demostrando que el P(VIM(4C) [IM] bloquea de manera muy eficiente los sitios activos de la superficie del acero expuesto al medio corrosivo. Los desplazamientos de los valores de E_{corr}, al igual que el P(VIM(2C) [IM] en ambos medios corrosivos el P(VIM(4C) [IM] tiene un comportamiento de inhibidor de tipo mixto, hecho que se comprueba con desplazamientos de E_{corr} menores a ± 85 mV en los sistemas corrosivos.

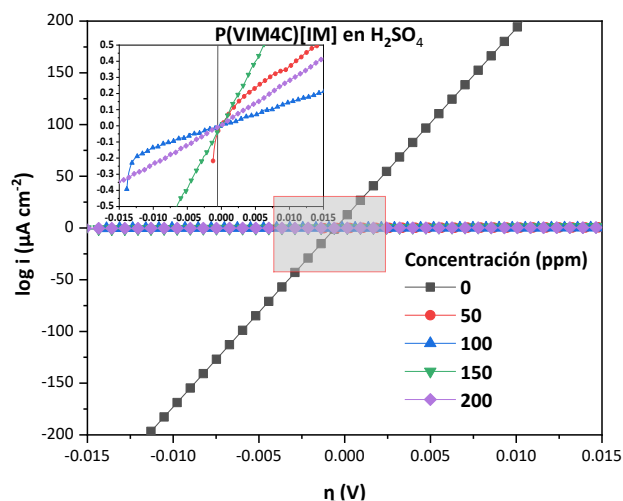


Figura 24. Curvas de Resistencia a la Polarización del AISI 1018 en soluciones de H₂SO₄ y P(VIM4C) [IM].

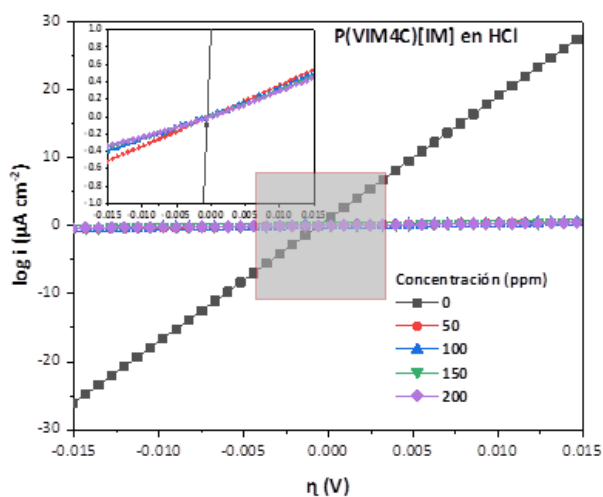


Figura 25. Curvas de Resistencia a la Polarización del acero AISI 1018 en soluciones de HCl y P(VIM4C) [IM].

Tabla 13. Parámetros electroquímicos por R_p obtenidos del acero AISI 1018 en soluciones de H₂SO₄ y P(VIM4C) [IM].

Concentración (ppm)	- E _{corr} (mV vs Ag/AgCl)	R _p (Ω cm ²)	EI _{R_p} (%)
0	464	61	----
50	549	34463	99.8
100	465	72235	99.9
150	462	12612	99.5
200	439	38218	99.8

Tabla 14. Parámetros electroquímicos por R_p obtenidos del acero AISI 1018 en soluciones de HCl y P(VIM4C) [IM].

Concentración (ppm)	- E _{corr} (mV vs Ag/AgCl)	R _p (Ω cm ²)	EI _{R_p} (%)
0	441	577	----
50	482	3.8x10 ³	98
100	465	3.4 x10 ³	98.5

150	505	3.6×10^3	98.6
200	506	3.7×10^3	98.7

Las altas eficiencias de P(VIM(4C) [IM] con respecto a P(VIM(2C) [IM], mostradas en la Tabla 13 y 14 se pueden relacionan con la naturaleza química de los PLIs. Como se puede ver en la Tabla 4, la diferencia en la estructura química entre P(VIM(2C) [IM] y P(VIM(4C) [IM] es la longitud de la cadena alquílica en el nitrógeno 3 del anillo imidazolio; por lo tanto, esta cadena alquílica tiene un efecto directo en la eficiencia de inhibición del PLI, es decir, una mayor longitud de cadena alquílica mejora el efecto anticorrosivo de los PLI derivados de imidazolio, debido que, al tener mayor cantidad de átomos, estos pueden cubrir más sitios activos de la superficie metálica. Adicionalmente, también es posible deducir que la distribución y orientación de las macromoléculas sobre la superficie influye en su comportamiento como ICs.

3.3. Análisis gravimétrico de P(VIM4C) [IM]

Se analizó el comportamiento del acero AISI 1018 en medio de H_2SO_4 1M de 25 a 200 ppm con P(VIM4C) [IM] a intervalos de 25 ppm, durante un tiempo de inmersión de 6 horas a 25 °C, los resultados se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados del análisis gravimétrico del acero AISI 1018 en H_2SO_4 1 M con P(VIM(4C) [IM].

Concentración (ppm)	Pérdida de peso (g)	V_{corr} (g / cm ² h)	EI_G (%)
0	7.2×10^{-2}	2.2×10^{-1}	
25	2×10^{-2}	1.1×10^{-1}	51
50	1.5×10^{-2}	4.8×10^{-2}	77
75	1.2×10^{-2}	4.6×10^{-2}	78
100	1.1×10^{-2}	3.2×10^{-2}	84
125	8.2×10^{-3}	2.8×10^{-2}	87
150	8×10^{-3}	2.6×10^{-2}	88
175	7.5×10^{-3}	2.4×10^{-2}	88
200	4×10^{-3}	1.7×10^{-2}	92

Los resultados indican que en presencia del PLI con longitud de cadena alquílica de 4 carbonos se reduce la V_{corr} del acero AISI 1018 de 0.22 a 0.017 g / cm² h, a una concentración de 200 ppm. El PLI estudiado tiene un comportamiento sobresaliente como inhibidor de corrosión, este efecto se puede relacionar

principalmente con su estructura química, la cual contiene heteroátomos de N y dobles enlaces que han sido reportados como causantes del incremento de la densidad electrónica de un IC, característica que favorece su adsorción sobre la superficie metálica generando una capa protectora contra la corrosión metálica.

3.4 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)

3.4.1 EIS con P(VIM2C) [IM]

A continuación se presentan los resultados de EIS con diagramas de Nyquist que relacionan la impedancia real (Z') vs la impedancia imaginaria (Z''), así como diagramas de Bode que representan la impedancia en términos de magnitud y fase angular como función de la frecuencia en escala logarítmica (Tribollet, 2008). El análisis de ambas gráficas es una herramienta empleada para comprender el comportamiento eléctrico de la interfase metal-solución, y es indispensable para proponer el mecanismo de inhibición a la corrosión de los PLIs estudiados.

La Figura 26 muestra las gráficas de Nyquist del acero AISI 1018 en H_2SO_4 1 M con y sin P(VIM2C) [IM]. En el espectro de impedancia se pueden distinguir dos zonas diferentes, una a altas frecuencias (AF) y otra a bajas frecuencias (BF). En la zona de AF, valores de Z' bajos, se observa un semicírculo característico de un loop capacitivo, relacionado con el fenómeno de transferencia de carga de la doble capa eléctrica; mientras que a BF, valores de Z' altos, se presenta un loop inductivo caracterizado por tener una apariencia de “gancho”, relacionado con el proceso de adsorción de especies electroactivas sobre la superficie del metal, tales como, iones sulfato (SO_4)⁻² generados por la disociación de H_2SO_4 en agua, protones (H^+) característicos de soluciones altamente ácidas (Zhang et al., 2018), y/o macromoléculas del IC (Zheng et al., 2014).

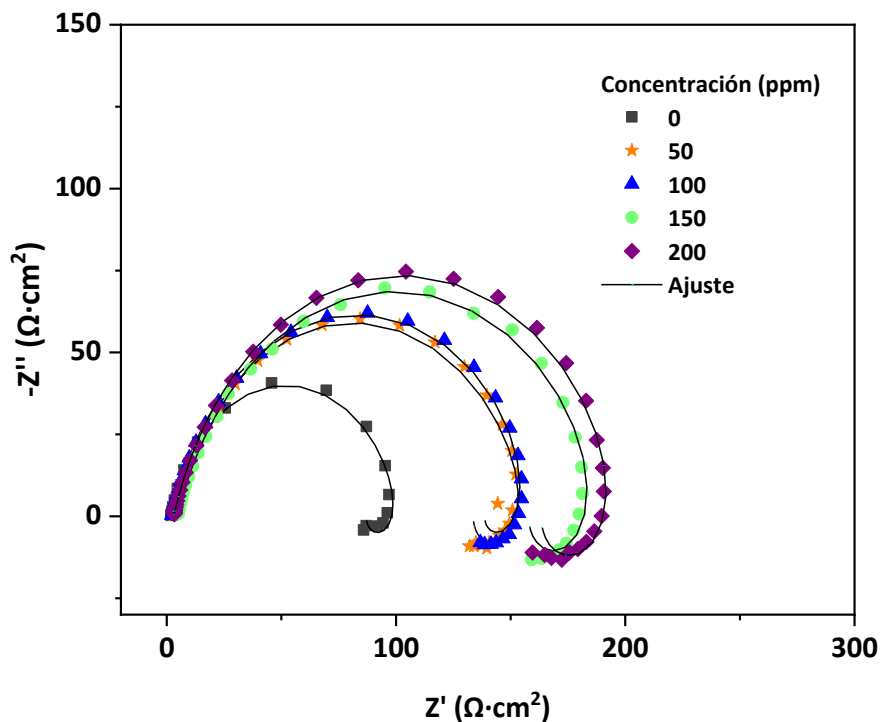


Figura 26. Diagrama de Nyquist de acero AISI 1018 en H_2SO_4 1 M y diferentes concentraciones de P(VIM2C) [IM].

Por otra parte, se observa que los diámetros de los loops capacitivos de los gráficos de Nyquist incrementan con el aumento de la concentración del PLI, este comportamiento ha sido ampliamente relacionado con un efecto de inhibición a la corrosión de algunos compuestos, por lo tanto, se infiere que el PLI retarda la velocidad de corrosión del acero (Zheng et al., 2014). Además, la depreciación de los semicírculos indica un comportamiento capacitivo no ideal, donde las muestras presentan cierto grado de rugosidad superficial.

Los diagramas de Bode de los sistemas de acero en H_2SO_4 1 M con y sin P(VIM2C) [IM] se presentan en la Figura 27, se observa que con la adición del IC incrementa la impedancia Z a bajas frecuencias, indicando un aumento de la resistencia al flujo de electrones. Además, se observan curvas con puntos máximos de fase angular aproximadamente a 100 Hz, indicando una constante de tiempo que se relaciona con el elemento de fase constante de la doble capa eléctrica (CPE_{dl}) Además, se presentan puntos máximos a AF entre 10 y 30° indicando otra constante de tiempo relacionada con otro CPE. Sin embargo, en ausencia de inhibidor esta constante de tiempo no se observa. Indicando que en ausencia de PLI el circuito eléctrico equivalente (CEE) que ajuste los resultados de impedancia debe presentar únicamente un CPE, Figura 28, relacionado con

el efecto de la doble capa eléctrica; mientras que en los sistemas con P(VIM2C) [IM], un CPE adicional relacionado con la adsorción del PLI ajusta mejor los resultados de impedancia, Figura 29.

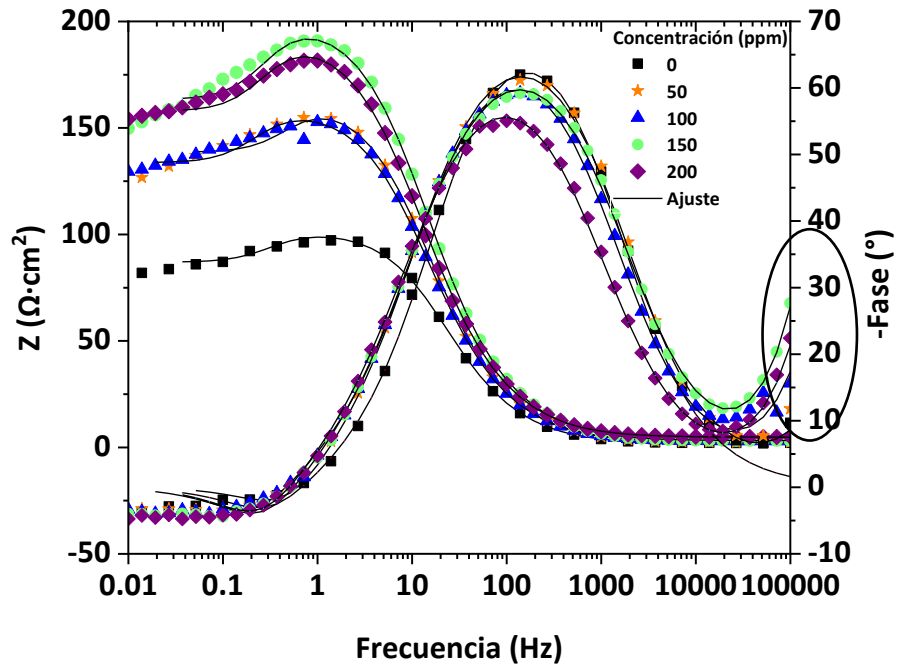


Figura 27. Diagrama de Bode del acero AISI 1018 en H_2SO_4 1 M y diferentes concentraciones de P(VIM2C) [IM].

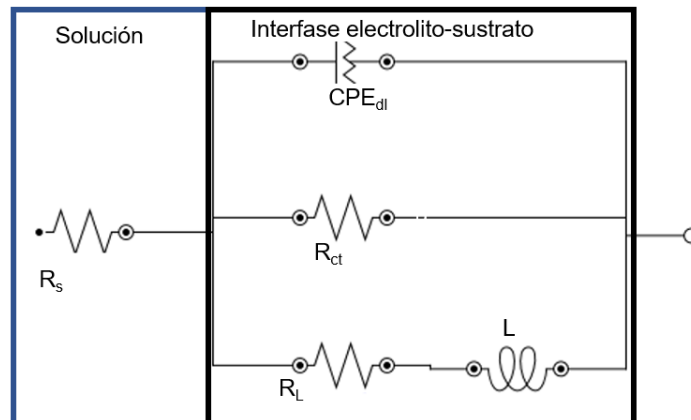


Figura 28. Circuito eléctrico equivalente para sistema de acero en H_2SO_4 1M.

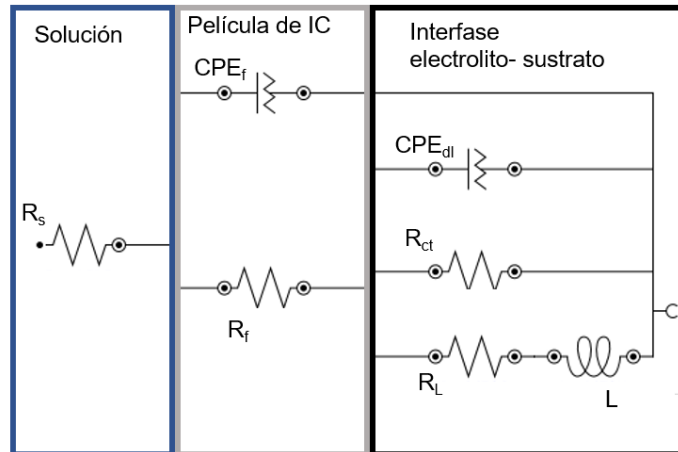


Figura 29. Circuito eléctrico equivalente para sistema de acero en H₂SO₄ 1M y diferentes concentraciones de P(VIM2C) [IM].

Los CEE, Figura 28 y 29, están compuestos por diferentes elementos eléctricos que representan un elemento en la interfase metálica: una resistencia a la solución (R_s), la cual representa la resistencia a la caída óhmica producida por la separación entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia; un elemento de fase constante relacionado con la doble capa eléctrica (CPE_{dl}); una resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}), los cuales describen el proceso de transferencia de carga en la interfaz acero-electrolito; una resistencia y elemento inductivo (R_L y L), los cuales representan las especies adsorbidas, como sulfatos (SO_4^{2-}) y protones (H^+), a consecuencias de las reacciones de oxidación; y un elemento de fase constante y una resistencia eléctrica (CPE_f y R_f) relacionados con la formación de una película de PLIs adsorbidos a la superficie. El uso de CPE en lugar de elementos capacitivos (C) se realizó para reducir el efecto de heterogeneidad superficial de las muestras metálicas (Cabrera et al., 2007). La impedancia de un CPE se calcula con la Ecuación 6 (Qiang et al., 2017):

$$Z_{CPE} = Y_0^{-1} (j\omega)^{-n} \quad (6)$$

donde, Y_0 es un factor de proporcionalidad y representa la frecuencia en el valor máximo del componente imaginario en el espectro de impedancia, j es un numero imaginario $(-1)^{1/2}$, $\omega=2\pi f$ es la frecuencia angular del valor máximo de impedancia real en un espectro de impedancia y n es el exponente del CPE y representa la desviación de un comportamiento de capacitancia ideal.

La Tabla 16 muestra los parámetros de EIS obtenidos mediante la simulación de los circuitos con NOVA, en donde se muestra los valores de los componentes de los CEE.

Tabla 16. Resultados de EIS de acero AISI 1018 en H₂SO₄ 1M y P(VIM2C) [IM].

C_{inh}	(ppm)	0	50	100	150	200
R_s	(Ω cm²)	1.96	4.13	0.08	-1.29	-0.41
CPE_f	Y₀ (nΩ⁻¹sⁿcm⁻²)	-	4.64	3.36	2.34	2.08
n		-	1.10	1.10	1.10	1.10
R_f	(Ω cm²)	-	1.85	2.77	4.44	5.15
CPE_{dl}	Y₀ (μΩ⁻¹sⁿcm⁻²)	15	15.1	13.3	13.7	1.65x10 ⁻⁵
n		0.85	0.83	0.82	0.81	0.80
C	nF	-	25.1	1.81	1.24	1.10
R_{ct}	(Ω cm²)	100.08	154.64	162.55	194.21	201.28
R_L	(Ω cm²)	565.40	865.06	777.43	811.35	785.91
L	(Hz cm²)	310	311	622	529	529
R_p	(Ω cm²)	100.08	152.78	165.33	198.65	206.43
χ²		6x10 ⁻²	2 x10 ⁻²	3 x10 ⁻²	3 x10 ⁻²	2 x10 ⁻²
El_{EIS}	%	-	34	39	50	52

Se observa que los valores de R_{ct} en presencia de P(VIM2C) [IM] son mayores respecto al blanco, indicando la presencia de una capa de PLI adsorbido a la superficie del acero, que inhibe los procesos de transferencia de carga. Mientras que los valores de C_{dl}, disminuyen con el incremento de la concentración de IC. Diferentes estudios indican que existe una relación inversamente proporcional de la C_{dl} con el espesor de una película formada por moléculas de inhibidor y un comportamiento directamente proporcional respecto a la constante dieléctrica del material adsorbido, por lo anterior, es posible deducir que el espesor de la capa protectora formada por macromoléculas de PLI incrementa a altas concentraciones del P(VIM2C) [IM] en el medio (J. Zhang et al., 2018). Además, se observa que los valores de n, que están relacionados con la rugosidad y heterogeneidad de la superficie metálica, sufren una variación de 0.8 a 0.85; lo cual indica la rugosidad de la superficie metálica y una desviación del comportamiento capacitivo ideal, confirmando el uso de CPE en lugar de una capacitancia. Debido al rango de los valores de n (cerca de 1), CPE presenta un comportamiento capacitivo (Stanly & Parameswaran, 2010; Zheng et al., 2014).

En la Tabla 16 se reportan los valores de eficiencias de inhibición por EIS (EI_{EIS}) los cuales se obtuvieron a partir de la Ecuación 7:

$$EI_{EIS} = \frac{R_p^I - R_p^0}{R_p^I} * 100 \quad (7)$$

donde R_p se obtiene con la suma de la resistencia a la transferencia de carga y la resistencia de la película de PLI Ecuación 8 y los subíndices I y 0 indican la presencia y ausencia de IC en el medio corrosivo.

$$R_p = R_{ct} + R_f \quad (8)$$

En la Figura 26 se observa que el tamaño del diámetro aumentó con la adición del IC, presentando un mayor diámetro a 200 ppm; esto debido a la transferencia de carga, reflejado en el aumento de los valores de R_{ct} (Tabla 16). El análisis de las eficiencias de inhibición por EI_{EIS} refleja la relación directamente proporcional entre la concentración y la EI presentando el mismo comportamiento con respecto a las técnicas electroquímicas previamente discutidas.

Los análisis electroquímicos de impedancia en sistemas de acero AISI 1018 en HCl 1M y P(VIM2C) [IM] se discuten a continuación. En la Figura 30 se observa que los diagramas de Nyquist en presencia de HCl no presentan el comportamiento inductivo a LF que el mostrado en H_2SO_4 , indicando un proceso de adsorción de productos de corrosión o de las moléculas inhibidoras en la superficie del acero, en ausencia y presencia del inhibidor, respectivamente, no es tan fuerte (Amiery et al., 2016). Además, se presenta un incremento en el diámetro de los espectros con el incremento de la concentración de PLI, es decir existe un efecto de inhibición de la corrosión de acero con la adición de P(VIM2C) [IM] en el medio corrosivo de HCl.

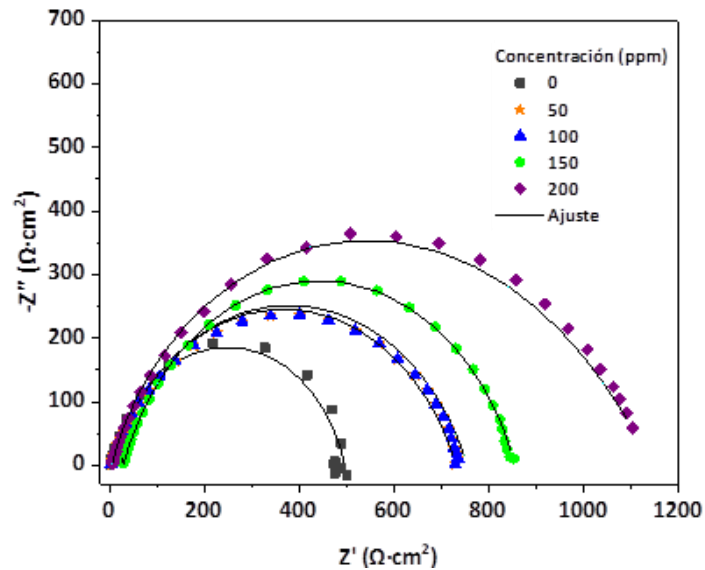


Figura 30. Diagrama de Nyquist de acero AISI 1018 en HCl como medio corrosivo y P(VIM2C) [IM].

En el CEE para los sistemas en HCl en ausencia de IC, Figura 31, se utilizó el circuito más simple, Simplified Randes Cell, compuesto solamente de 2 resistencias y un elemento de fase constante: R_s , R_{ct} y CPE_{dl} , teniendo las mismas funciones que el CEE para H_2SO_4 . Mientras que en presencia de P(VIM2C) [IM] se agregaron dos elementos eléctricos adicionales relacionados con la presencia de macromoléculas de PLI adsorbidas a la superficie metálica, CPE_f y R_f , como se muestra en la Figura 32. Los CPE se determinaron mediante el análisis de los diagramas de Bode muestra un aumento respecto a los valores de impedancia, siendo su valor máximo a 200 ppm, lo cual soporta lo discutido en el diagrama de Nyquist, a mayor concentración mayor EI , mientras que en fase angular, los cuales en ausencia de IC muestra un único pico máximo a ~ 100 kHz, indicando una constante de tiempo relacionada con un CPE y en presencia de IC se observan dos picos, el primero en el rango de 30 a 1000 Hz y otro a ~ 100 kHz, sugiriendo dos constantes de tiempo relacionadas con dos CPE Figura 33, además se forma se observa un incremento a bajas frecuencias en los valores de Z ,

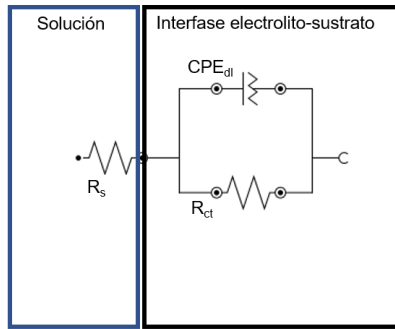


Figura 31. Circuito eléctrico equivalente para sistema de acero en HCl 1M.

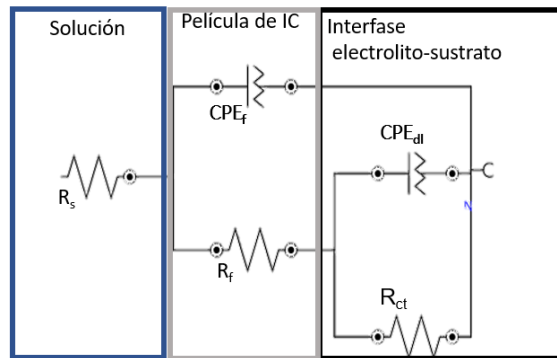


Figura 32. Circuito eléctrico equivalente para sistemas de acero en HCl 1M y diferentes concentraciones de P(VIM2C) [IM].

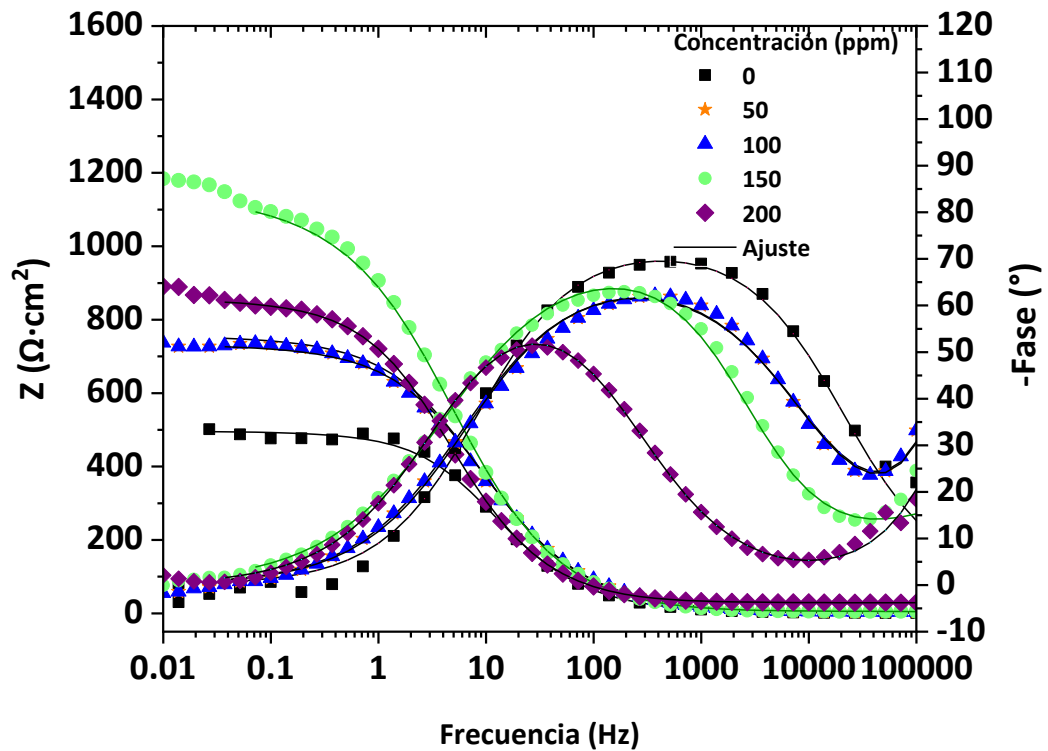


Figura 33. Diagrama de Bode del acero AISI 1018 en HCl como medio corrosivo y P(VIM2C) [IM].

Como se observa en la Tabla 17, los valores de CPE_{dl} disminuyen con la concentración de PLI, mientras que los valores de R_f aumentan con respecto a la concentración indicando un proceso de adsorción de moléculas de PLI predominantemente a 200 ppm, confirmando los resultados de las pruebas electroquímicas de resistencia a la polarización y polarización de Tafel. Además, los valores bajos de χ^2 (máximo de 0.084) sugieren el ajuste adecuado de los datos experimentales con los CEE mostrados previamente.

Tabla 17. Resultados de EIS de acero AISI 1018 en HCl 1M y P(VIM2C) [IM].

C_{inh}	(ppm)	0	50	100	150	200
R_s	($\Omega\text{ cm}^2$)	0.81	-4.3	-3.9	-202.98	1.36
CPE_f	$Y_0(n\Omega^{-1}s^n\text{cm}^{-2})$	-	0.763	0.857	0.067	6.9
n		-	1.1	1.1	0.99	0.53
R_f	($\Omega\text{ cm}^2$)	-	7.15	6.78	231.81	5.17
CPE_{dl}	$Y_0(p\Omega^{-1}s^n\text{cm}^{-2})$	80.6	67.8	65.6	91.3	31.7
n		0.82	0.75	0.75	0.78	0.85
C	nF	-	4.30	4.81	5.61	6.46
R_{ct}	($\Omega\text{ cm}^2$)	494.73	751.98	729.37	828.31	1178.86
R_p	($\Omega\text{ cm}^2$)	494.73	751.98	736.15	1060.13	1184.03
χ^2		9×10^{-2}	5×10^{-2}	4×10^{-2}	1×10^{-2}	8×10^{-2}
EI_{EIS}	%	-	30	34	53	58

Respecto a la EI_{EIS} , se observa el mismo efecto presentado en las técnicas de polarización potenciodinámica y resistencia a la polarización, a mayor concentración mayor la EI , presentando la mayor eficiencia a 200 ppm. Sin embargo, es posible que la película formada por macromoléculas de PLI no sea uniforme ni homogénea, hecho que se refleja con las EI bajas obtenidas por las diferentes técnicas. Algunos autores han nombrado a esta película como capa defectuosa, tal es el caso del trabajo realizado por Tian et al. en 2017, quienes afirman que dicha capa no termina de formarse de manera óptima, explicando las EI bajas de algunos IC (Tian et al., 2017).

3.4.2 EIS con P(VIM4C) [IM]

Se realizaron pruebas de EIS de acero AISI 1018 en medios de H_2SO_4 y HCl con P(VIM4C) [IM], como se muestra en los diagramas de Nyquist de la Figura 34.

Los diámetros de los espectros de EIS aumentan considerablemente al agregar el inhibidor al medio corrosivo, indicando un aumento de la resistencia a la transferencia de carga con respecto al blanco y confirmando el efecto de inhibición a la corrosión de acero AISI 1018 del P(VIM4C) [IM]. El comportamiento de los espectros de Nyquist es considerablemente diferente respecto a los sistemas en presencia de P(VIM2C) [IM], en especial a LF, donde no se observa el loop inductivo, es decir, en presencia del P(VIM4C) [IM] se reduce la adsorción de especies de electroactivas de sulfato (SO_4^{2-})_{ads} y protones (H^+)_{ads} sobre la superficie de acero. La presencia del PLI modifica la interfase metálica de una manera sobresaliente, indicando un cambio en el mecanismo de corrosión del acero con la adición del IC (Zheng et al., 2014).

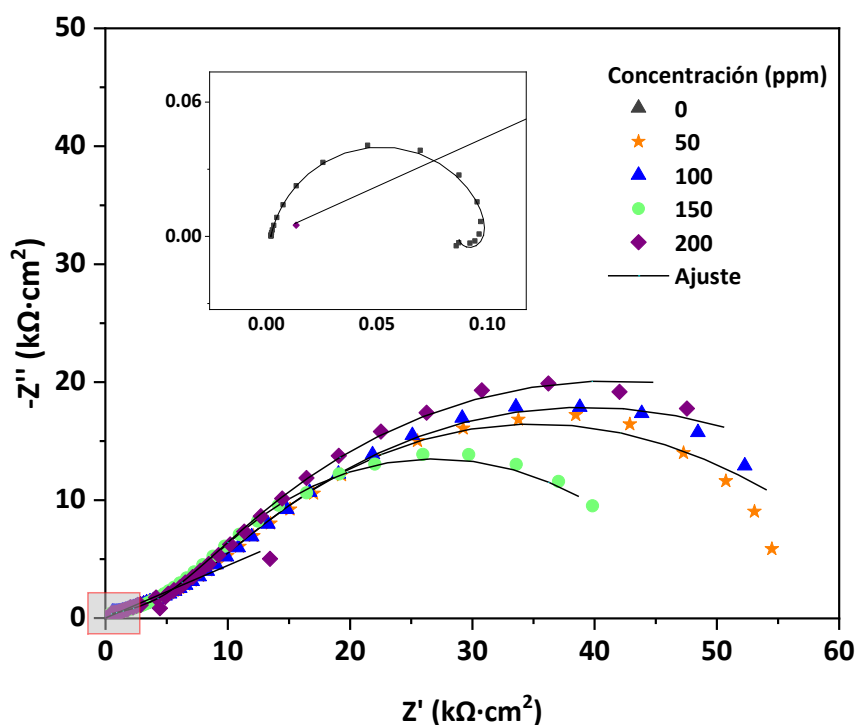


Figura 34. Diagrama de Nyquist de acero AISI 1018 en H_2SO_4 1 M y diferentes concentraciones de P(VIM4C) [IM].

El diagrama de bode de fase de la Figura 35, muestra un aumento en los límites de Z, mientras que en el diagrama de fase se observa dos puntos máximos uno a LF aproximadamente a 0.2 Hz y otro a HF a aproximadamente 100 kHz, indicando dos constantes de tiempo diferentes. Por lo tanto, el CEE de los sistemas de acero en H_2SO_4 y P(VIM4C) [IM] mostrado en la Figura 36, presenta un CPE_{dl} y un CPE_f , este último relacionado con la presencia de IC en la interfase metálica, debido a la ausencia del loop inductivo presente en los diagramas de

Nyquist en presencia del IC, el uso de los componentes inductivos (R_L y L) no fue requerido en el CEE. La película de macromoléculas de PLI formada sobre la superficie metálica retarda el paso de los iones sulfatos y protones del seno de la solución hacia la superficie del acero.

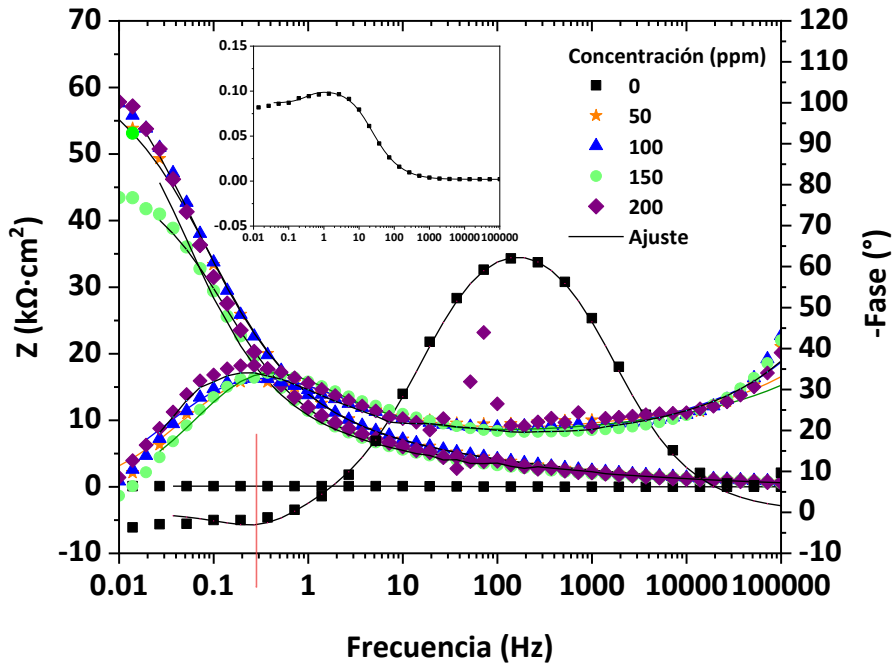


Figura 35. Diagrama de Bode del acero AISI 1018 en H_2SO_4 como medio corrosivo y P(VIM4C) [IM].

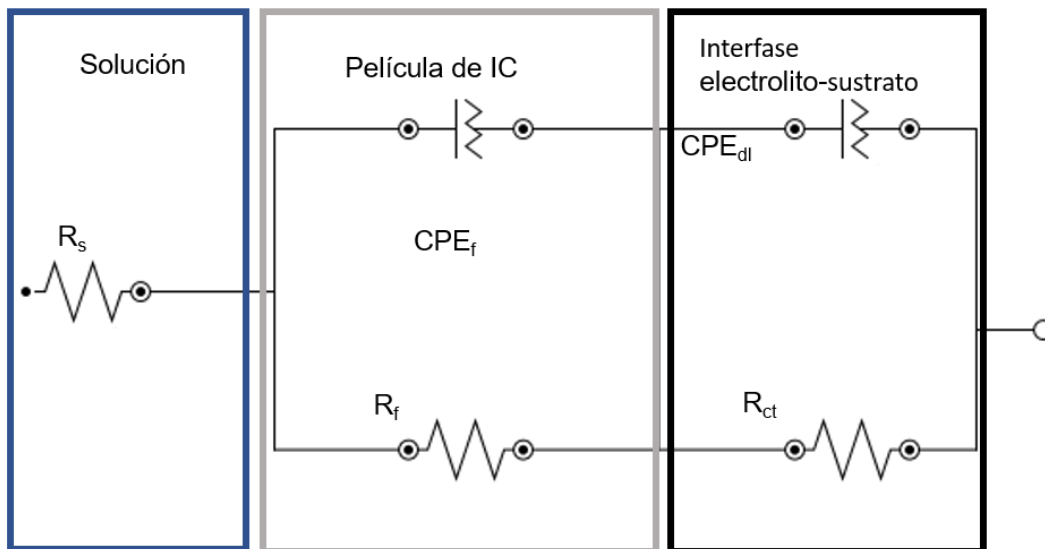


Figura 36. Circuito eléctrico equivalente para sistema de acero en H_2SO_4 y HCl 1M y diferentes concentraciones de P(VIM4C) [IM].

En la Tabla 18 se observa el efecto de inhibición del PLI, donde los valores de R_{ct} en presencia de P(VIM4C) [IM] son de 30 a 50 veces mayores respecto al blanco, indicando la formación de una película de IC sobre la superficie metálica que retarda la transferencia de electrones y de iones entre el sustrato y el electrolito, y con ello la cinética de las reacciones electroquímicas se modifica. Por otra parte, se observa que los valores de n en CPE_{dl} presentan un valor entre 0.7-0.85, indicando un comportamiento capacitivo no ideal, es debido a esto el remplazo de capacitancias por CPE, además se observan valores altos en R_f , indicando una capa protectora más eficiente que la que se formó con P(VIM2C) [IM]. Respecto a los valores de EI_{EIS} se presentan eficiencias por encima del 99% demostrando las propiedades de inhibición sobresalientes de P(VIM4C) [IM].

Tabla 18. Resultados de EIS de acero AISI 1018 en H_2SO_4 1M y P(VIM4C) [IM].

C_{inh}	(ppm)	0	50	100	150	200
R_s	($\Omega\text{ cm}^2$)	1.96	-585.19	-802.87	-441.01	-1096.88
CPE_f	Y_0 ($n\Omega^{-1}s^n\text{cm}^{-2}$)	-	4.38	4.07	3.7	7.32
n		-	0.2	0.19	0.78	0.14
R_f	($k\Omega\text{ cm}^2$)	-	48.1	28.3	31.1	38.2
CPE_{dl}	Y_0 ($\mu\Omega^{-1}s^n\text{cm}^{-2}$)	15	3.62	3.31	4.92	3.96
n		0.85	0.73	0.7	0.21	0.7
C	μF	-	2.46	1.62	2.01	2.92
R_{ct}	($\Omega\text{ cm}^2$)	0.1	40.7	50.9	33.1	56.5
R_L	($\Omega\text{ cm}^2$)	565.4	-	-	-	-
L	($Hz\text{ cm}^2$)	310	311	622	529	529
R_p	($k\Omega\text{ cm}^2$)	310.12	-	-	-	-
χ^2		6×10^{-2}	8×10^{-2}	8×10^{-2}	1.2×10^{-1}	9×10^{-2}
EI_{EIS}	%	-	99	99	99	99

Resultados similares se obtuvieron para sistemas de acero en HCl y P(VIM4C) [IM], es decir, aumento en los diámetros de los diagramas de Nyquist con la concentración de PLI, Figura 37, indicando el gran efecto de inhibición a la corrosión del P(VIM4C) [IM] (Zheng et al., 2014).

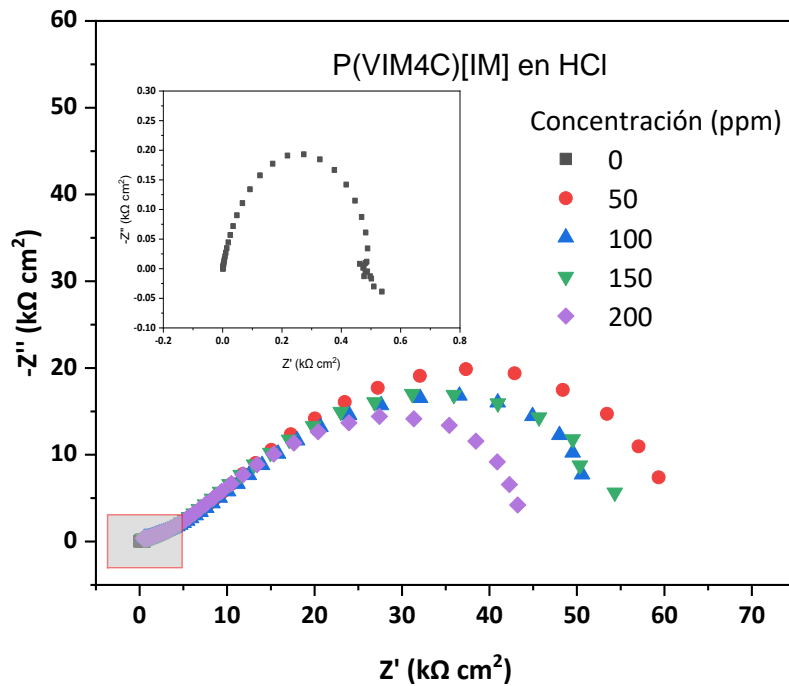


Figura 37. Diagrama de Nyquist de acero AISI 1018 en HCl 1M y diferentes concentraciones de P(VIM4C) [IM].

La Figura 37 muestra que la adición de P(VIM4C) [IM] en solución de HCl 1M presenta un comportamiento de los diagramas de Bode similar a los sistemas en H_2SO_4 1 M a 50, 100, 150 y 200 ppm presentando altos valores respecto a Z a 0.01 Hz, soportando los valores en bajas frecuencias de los diagramas de Nyquist y dos constantes de tiempo, por ello, el ajuste de estos datos experimentales se realizó con el CEE de la Figura 36. indicando que el PLI posee comportamientos similares en ambos medios corrosivos inhibiendo la corrosión de manera eficiente, tal como se observa en los valores de la Tabla 19. Se observa un incremento en los valores de R_{ct} de los sistemas que contienen P(VIM4C) [IM]. Adicionalmente, se observa que los valores de E_{EIS} se encuentran por encima del 98%, hecho que confirma que el P(VIM4C) [IM] tiene propiedades de inhibición sobresalientes. Este PLI presenta las mejores eficiencias en ambos medios, debido al tamaño de la molécula mayor respecto al P(VIM2C) [IM], esto se presenta de manera más clara en la Tabla 4, donde se observa la enorme diferencia en peso molecular entre ambos PLIs, por una diferencia notable de átomos de Carbono derivada de la adición de dos ramas alquílicas en P(VIM4C) [IM], generando que durante el proceso de adsorción exista un área de recubrimiento más grande, (Likhanova et al., 2010).

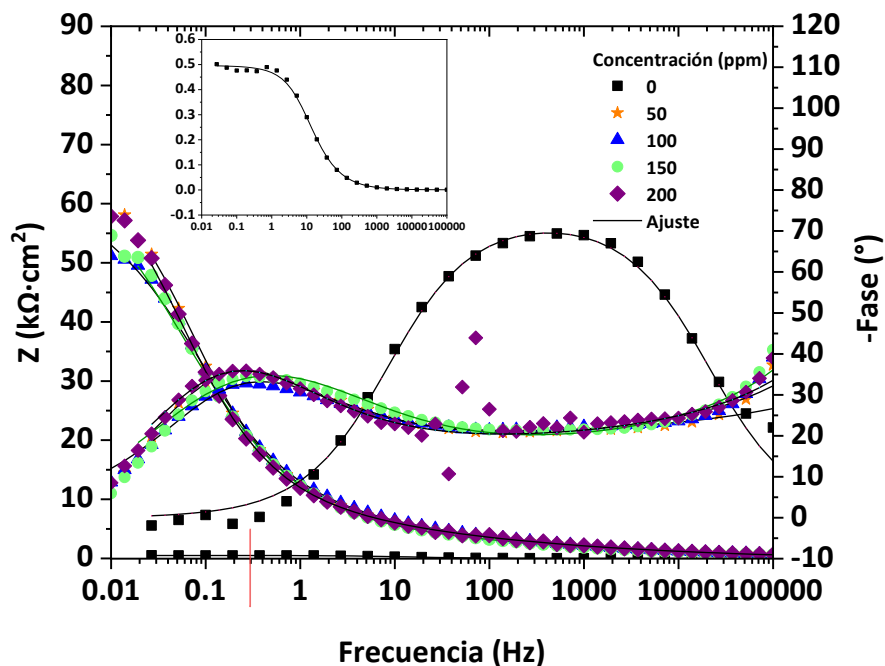


Figura 38. Diagrama de Bode del acero AISI 1018 en HCl como medio corrosivo y P(VIM4C) [IM].

Tabla 19. Resultados de EIS de acero AISI 1018 en HCl 1M y P(VIM4C) [IM].

C_{inh}	(ppm)	0	50	100	150	200
R_s	$(\Omega \text{ cm}^2)$	0.81	-221.92	-554.09	-715.23	-599.32
CPE_f	$Y_0 (n\Omega^{-1}s^n\text{cm}^{-2})$	-	3.9	3.48	4.89	4.13
n		-	0.77	0.19	0.99	0.74
R_f	$(k\Omega \text{ cm}^2)$	-	43.3	40.7	12.44	50.89
CPE_{dl}	$Y_0 (p\Omega^{-1}s^n\text{cm}^{-2})$	8.06	4.61	4.98	3	5.4
n		1.1	0.23	0.71	0.63	0.19
C	nF	-	0.29	1.36	4.43	2.11
R_{ct}	$(\Omega \text{ cm}^2)$	0.5	46.9	54	59.6	52.9
R_p	$(k\Omega \text{ cm}^2)$	0.49	90.2	94.7	72.1	10.4
χ^2		6×10^{-2}	8×10^{-2}	6×10^{-2}	6×10^{-2}	3×10^{-2}
EI_{EIS}	%	-	99.4	99.5	99.3	99.5

3.5 Isotermas de adsorción

Como se ha concluido por las pruebas electroquímicas aplicadas, la inhibición a la corrosión del acero AISI 1018 en medio ácido y en presencia de PLIs, se debe a las interacciones entre las macromoléculas de los PLIs con la superficie del acero, por un proceso de adsorción. Sin embargo, existen dos tipos de adsorción de ICs: adsorción física (fisorción) y adsorción química (quimisorción) (Mansfeld, 1987).

La fisorción es el resultado de las fuerzas electrostáticas de atracción entre la superficie del metal y los iones orgánicos o dipolos de IC, dichas especies interactúan rápidamente con la superficie metálica mediante interacciones electrostáticas. La adsorción electrostática posee una baja energía de activación y es independiente de la temperatura (Mansfeld, 1987).

Mientras que la adsorción química, involucra la transferencia de carga o carga compartida de las moléculas de IC a la superficie del metal, generando la formación de enlaces químicos; la quimisorción depende de la temperatura y se lleva a cabo de manera más lenta respecto a la adsorción electrostática, pero con una mayor energía de activación. Además, el enlace que ocurre en la transferencia del electrón depende de la naturaleza del metal y del inhibidor. En los IC la presencia de heteroátomos con pares de electrones libres en la molécula adsorbida favorecerá la transferencia de estos (Mansfeld, 1987).

Para determinar el tipo de adsorción de los PLIs se emplearon modelos teóricos de isotermas de adsorción, los cuales se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Isotermas de Adsorción (Sastri, Ghali, & Elboudjaini, 2012).

Nombre	Isoterma	Gráfica
Langmuir	$\frac{\theta}{1 - \theta} = K_{ads}C_{inh}$	$\frac{C}{\theta} = C$
Frumkin	$\left[\frac{\theta}{1 - \theta} \right] e^{f\theta} = K_{ads}C_{inh}$	θ vs $\log C$
Temkin	$e^{f\theta} = K_{ads}C_{inh}$	θ vs $\ln C$
Freundlich	$\theta = K_{ads}C_{inh}$	$\ln C$ vs $\ln \theta$

θ = fracción de la superficie cubierta; K_{ads} = constante de adsorción; C_{inh} = concentración del inhibidor; n =número de moléculas de agua reemplazadas por el inhibidor; f =parámetro de interacción del inhibidor.

donde el valor de θ se calculó a partir de las EI_{EIS} con la Ecuación 9:

$$\theta = \frac{EI_{EIS}}{100} \quad (9)$$

En el ANEXO C se presenta el ajuste de los datos experimentales a las diferentes isothermas de adsorción. Las isothermas de adsorción de Langmuir y Temkin presentaron un mejor ajuste como se observa en la Figura 39 y 40. Se empleo el método de regresión lineal y se obtuvo la ecuación de la línea recta, así como el coeficiente de correlación (R^2); donde este último se encontró en el rango de 0.94 a 1, confirmando que el mejor modelo teórico para la determinación de parámetros termodinámicos fueron los modelos de Langmuir y Temkin. Estos resultados indican que los IC fueron adsorbidos a la superficie del metal, creando una capa protectora la cual retarda la interacción del metal con el medio corrosivo. La capa protectora formada se genera por la interacción de las macromoléculas del PLI colocándose una encima de otra, este comportamiento es debido al resultado de las interacciones iónicas entre las macro cadenas adyacentes (Arellanes et al., 2014; Likhanova et al., 2010).

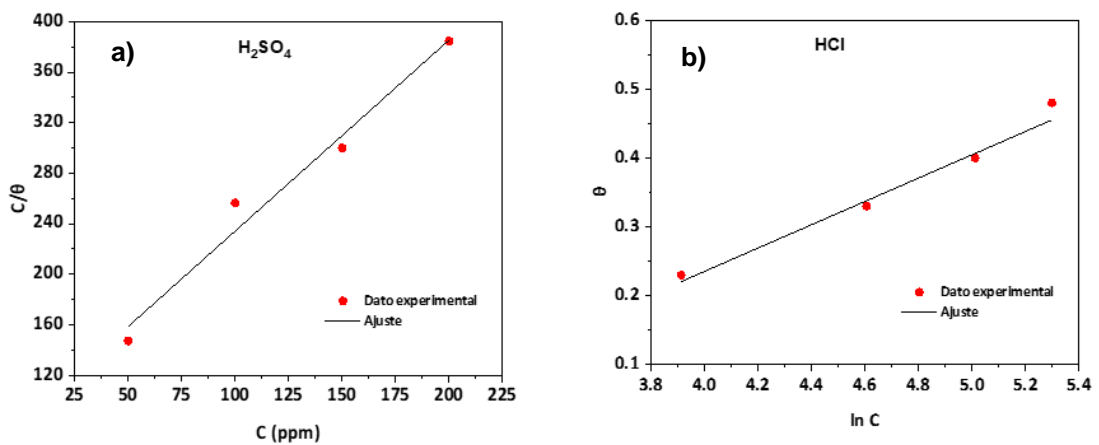


Figura 39. Isotherma de adsorción de Langmuir (a) y Temkin (b) en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM2C) [1M]: a) H₂SO₄ 1M y b) HCl 1M.

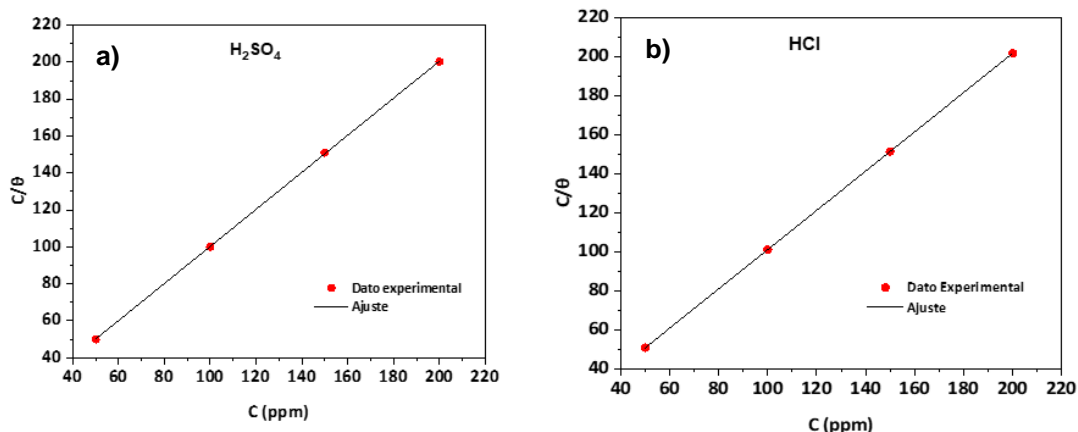


Figura 40. Isotherma de adsorción de Langmuir en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM4C) [IM]: a) H₂SO₄ 1M y b) HCl 1M.

Con la ecuación de la línea recta se determinaron los valores de las constantes de equilibrio de adsorción (K_{ads}) utilizando las ecuaciones presentadas en la Tabla 20, a partir de la intersección de acuerdo con la Ecuación y 11 para el modelo de Langmuir y de Temkin respectivamente:

$$K_{ads} = \frac{1}{intersección} \quad (10)$$

$$K_{ads} = e^{-intersección} \quad (11)$$

Una vez obtenida la K_{ads} se calculó el cambio de la energía libre de Gibbs estándar de adsorción (ΔG°_{ads}):

$$\Delta G^{\circ}_{ads} = RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (12)$$

donde R es la constante de los gases ideales 8.14×10^{-3} kJ/mol K, T es la temperatura en K, el valor de 55.5 representa la concentración del agua en mol/L. La Tabla 21 muestra parámetros termodinámicos calculados con la isothermas de adsorción.

Tabla 21. Parámetros termodinámicos de adsorción del acero AISI 1018 en H₂SO₄ y HCl 1M y PLIs a partir de la isoterma de adsorción de Langmuir y Temkin.

Isoterma	Medio corrosivo	IC	Pendiente	Intersección	α	K_{ads} (mol ⁻¹)	$-\Delta G^{\circ}_{ads}$ (kJ mol ⁻¹)	R ²
Langmuir	H ₂ SO ₄ 1M	P(VIM2C) [IM]	1.51	0.1421	----	7037	32	0.94
		P(VIM4C) [IM]	1	3	----	33300000	52.9	1
	HCl 1M	P(VIM4C) [IM]	1	20	----	5000000	48.2	1
Temkin	HCl 1M	P(VIM2C) [IM]	0.17	-0.44	-0.08	1554.57	28	0.96

Como se observa en la Tabla 21, en H₂SO₄ se obtuvieron valores mayores de K_{ads}, en H₂SO₄ para ambos ICs, siendo K_{ads} un parámetro que representa la fuerza de adsorción o desorción, entre el adsorbato y el adsorbente, entre mayor sea este valor, mayor será la eficiencia de adsorción, indicando una mayor adsorción de los ICs sobre el acero AISI 1018 en este medio ácido, esto se corrobora con las *EI* de las técnicas electroquímicas anteriores donde se presentó mayor *EI* en H₂SO₄ con respecto a HCl (Corrales et al., 2019).

Por otra parte la isoterma de Langmuir estipula que no existe interacción entre las moléculas adsorbidas y la energía de adsorción es independiente de la fracción de la superficie cubierta (θ) y asume que la superficie sólida contiene un cierto número de sitios de adsorción y cada uno es ocupado por solo una especie adsorbida, esto se ve reflejado en los valores de la pendiente, al estar en la unidad o cercanos a la unidad tal como se presenta en la Tabla 21 para P(VIM4C) [IM], donde se observa que en ambos medios el valor de la pendiente es de 1, respecto a los valores de la pendientes en ambos medios con P(VIM2C) [IM], se observan valores por encima de la unidad, lo que indica que cada sitio de adsorción es ocupado por más de una especie adsorbida, sean productos de corrosión o las macromoléculas del PLI (Behpour et al., 2008; Shaban et al., 2015). Respecto a la isoterma de Temkin, este modelo sugiere la formación de multicapas, debido a complejos de hierro depositados sobre la superficie del acero, así como la adsorción de las macromoléculas del PLI, además, este modelo considera las interacciones entre el adsorbato (IC) y el adsorbente (superficie del acero) representado por el parámetro α el cual se obtiene mediante la Ecuación 13:

$$\alpha = -\frac{f}{2} \quad (13)$$

donde f es el parámetro de interacción del inhibidor. En sistema de HCl - P(VIM2C) [IM] se tiene que $\alpha < 0$, indicando un fenómeno de repulsión entre las moléculas del IC, que provoca que el compuesto deje expuestas zonas no protegidas en la superficie del acero (Bentiss et al., 2012; El-Shafei, Moussa, & El-Far, 2001).

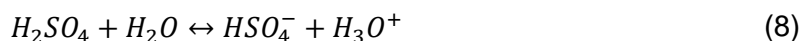
Los valores de ΔG°_{ads} generalmente se pueden relacionar con el tipo de adsorción presente entre los IC y la superficie metálica: si los valores son iguales o mayores a -20 kJ mol^{-1} se trata de una adsorción del tipo física o fisorción, si

los valores son iguales o menores a -40 KJ mol^{-1} , significa que existe una adsorción del tipo química o quimisorción (Döner et al., 2011; Rugmini et al., 2018). Por lo anterior, el P(VIM 2C) [IM] se adsorbe a la superficie metálica tanto física como químicamente, es decir, la adsorción del inhibidor se debe a las fuerzas electrostáticas entre las moléculas del PLI con la superficie del acero, a través del anillo imidazol (Gómez et al., 2019; Jafari et al., 2019).

Por otra parte, el P(VIM4C) [IM] presento valores entre -48.2 y -52 kJ/mol indicando un proceso de quimisorción, derivado de la transferencia de cargas entre las moléculas de imidazol y la superficie del acero (Yadav et al., 2010).

3.6 Mecanismo de inhibición a la corrosión del acero con PLIs

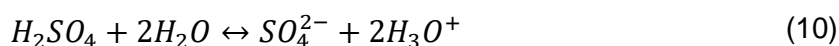
Cuando se disocia el ácido sulfúrico en agua este se disocia en dos etapas, siendo la primera expresada por la Reacción (8):



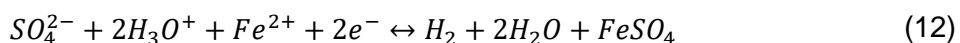
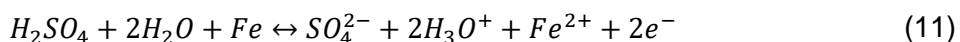
Como productos de esta reacción se encuentran iones hidronio (H_3O^+) e iones de sulfato ácido (HSO_4^-), siendo este último disociado nuevamente por reacción (9), la cual muestra la segunda reacción donde el sulfato ácido se disocia con el agua, se observa que ahora se genera el ion sulfato (SO_4^{2-}) y nuevamente el ion hidronio (Pavlov, 2011; Warnan et al., 2016).



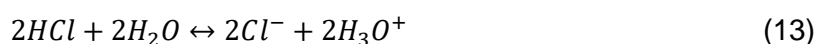
Combinando las Reacciones (8) y (9) se obtiene la reacción neta de la disociación del ácido sulfúrico en agua (10).



Retomando la Reacción (1), del comportamiento de oxidación del hierro y acoplándola con la Reacción (10):

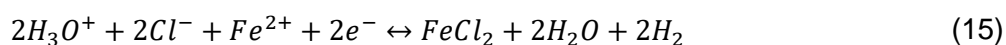
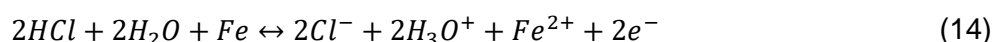


Las Reacciones (11) y (12) muestran el proceso de óxido reducción del acero en ácido sulfúrico, en la cual se observa la unión entre los iones de hierro con los iones sulfatos para obtener sulfato de hierro, así como la obtención de hidrógeno (12). Ahora, disociando el ácido clorhídrico en el agua:



En la Reacción (13) se observa la disociación del ion cloruro (Cl^-) y nuevamente la generación del ion hidronio, siendo este último atraído hacia las moléculas de

agua (Raymond Chang, 2017). Por lo tanto, las reacciones de óxido-reducción del acero en presencia de ácido clorhídrico son:



La Reacción 15 muestra la obtención de cloruro de Hierro y del hidrógeno molecular, generados en la zona anódica y catódica respectivamente.

Los PLIs en soluciones ácidas pelean con las especies corrosivas de la solución (H_2O , SO_4^{2-} , Cl^- , H^+ H_3O), por los sitios activos de la superficie del hierro, generando la formación de complejos los cuales retardan la disolución como la evolución del H_2 , debido a las estructura del anillo imidazolio y el enlace entre C-N pueden formar enlaces del tipo pi, a pesar de esto, no solo los electrones pi pueden ocupar los sitios del hierro, también acepta enlaces del tipo d (Zhang & Hua, 2009).

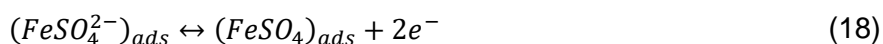
3.6.1 Zona anódica

En soluciones ácidas como en H_2SO_4 y HCl las cuales tiene un $pH < 4$ la capa de óxido ferroso se disuelve dejando la superficie metálica en contacto directo con la solución corrosiva (Winston R., 2008), afectando las zonas anódicas y catódicas.

En lo que respecta a las reacciones anódicas en presencia de H_2SO_4 la reacción de disolución de hierro (reacción de oxidación) se muestra en la Reacción 16, en el cual el hierro en su estado estable (Fe^0), pierde electrones generando su forma iónica, la cual puede ser Fe^{2+} o Fe^{3+} , sin embargo, debido a las condiciones de pH y de acuerdo al diagrama de Pourbaix, solo se genera la forma iónica Fe^{2+} , por lo que la Reacción 16 queda de la siguiente manera:

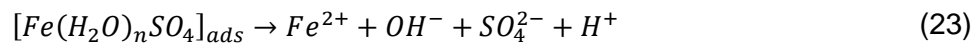
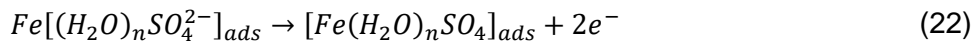
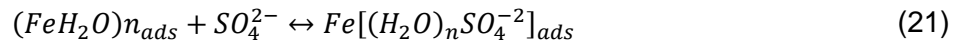


Sin presencia de inhibidor, los iones de hierro y sulfato interactúan en la interfase metal solución, para la formación de sulfato de hierro $FeSO_4$ representado por las Reacciones 17-19 (Loto & Loto, 2016).

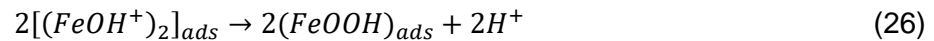
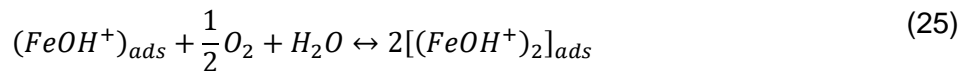


Se observa que los iones SO_4^{2-} son atraídos hacia las zonas anódicas de la superficie del acero, siendo adsorbidas para formar el complejo $FeSO_4^{2-}$, posteriormente al perder sus electrones forman el $FeSO_4$, el cual es liberado a

la solución en forma de Fe^{2+} y SO_4^{2-} . De los resultados presentados en el análisis de EIS se concluye que sin presencia de inhibidor existe un efecto de adsorción con SO_4^{2-} . Además, la presencia de agua puede formar compuestos de hierro hidratados (FeH_2O), generando productos de corrosión como la rozenita ($FeSO_4 \cdot 4H_2O$), el cual al perder sus electrones se libera a la solución en forma iónica Fe^{2+} , OH^- , SO_4^{2-} y H^+ dicho procedimiento se describe en las Reacciones 20-23 (Likhanova et al., 2010; Ma et al., 2016).



Otra reacción del acero expuesto en soluciones acuosas ácidas genera los complejos acuosos de hidróxido de Hierro, y debido a la presencia del oxígeno disuelto en la solución electrolítica se genera oxihidróxido de hierro, tal como se indica en las Reacciones 24-26 (Kolotyrkin et al., 1988).



En la Figura 41 se muestra el mecanismo de las reacciones anteriores.

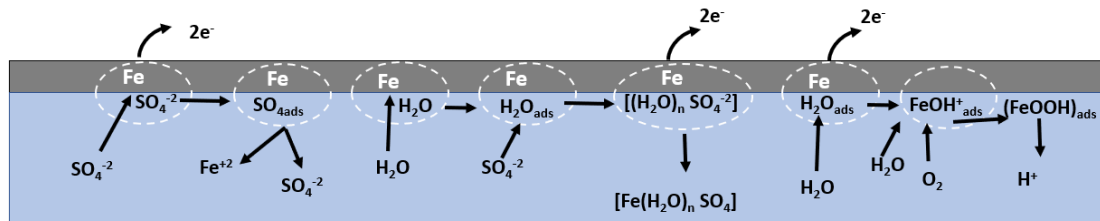
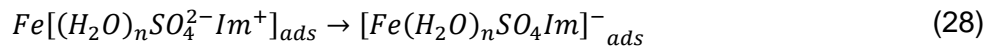
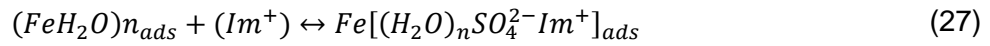


Figura 41. Mecanismo de Inhibición de los sitios anódicos en el acero AISI 1018 en H_2SO_4 .

Mediante las pruebas electroquímicas de Tafel en presencia de P(VIM2C) [IM] en H_2SO_4 , se observa un comportamiento mixto con tendencia hacia la zona anódica, indicando que el PLI inhibe principalmente las reacciones anódicas, evitando la disolución de hierro por la adsorción de las macromoléculas del PLI, generando interacciones con el complejo $[Fe(H_2O)_nSO_4^{-2}]$. Dichas interacciones entre las macromoléculas del PLI se crean por fuerzas de Van der Waals o por el intercambio de electrones entre las moléculas inhibidoras y el $[Fe(H_2O)_nSO_4]_{ads}$, esto se soporta con los valores de ΔG°_{ads} que sugieren un proceso de adsorción físico y químico:



La Figura 42 muestra el mecanismo de inhibición en las zonas anódicas del acero mediante el uso de P(VIM2C) [IM].

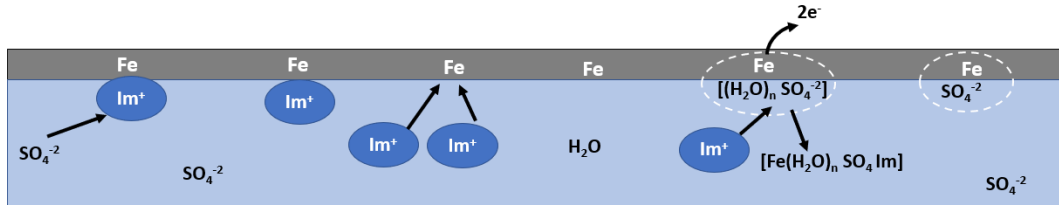


Figura 42. Mecanismo de Inhibición en los sitios anódicos en el acero AISI 1018 en H₂SO₄ y P(VIM2C) [IM].

Respecto a P(VIM4C) [IM] se sugiere que la adsorción de iones de PLI se genera una vez que se forman enlaces químicos entre el PLI y el Fe (Reacción 28), esto se observa en la Figura 43.

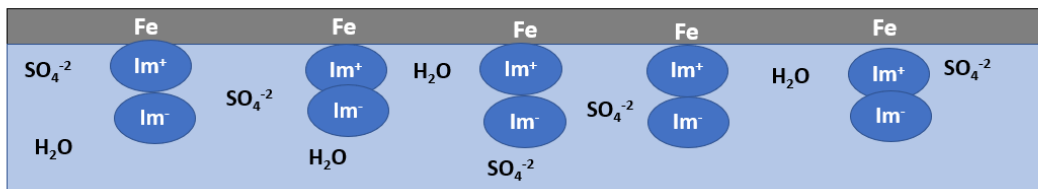


Figura 43. Mecanismo de Inhibición en los sitios anódicos en el acero AISI 1018 en H₂SO₄ y P(VIM4C) [IM].

En HCl se generan las siguientes reacciones (Nofrizal et al., 2012; Shahid, 2011):



Las Reacciones 29-32 presentan las reacciones anódicas del hierro en presencia de HCl, se observa que en presencia del ion cloruro, estos iones se combinan con Fe para formar FeCl⁻, el cual al perder su electrón forma el cloruro de hierro FeCl, posteriormente formando FeCl⁺, finalmente estos son liberados a la solución en forma de Fe²⁺ y Cl⁻, tal como se muestra en la Figura 44.

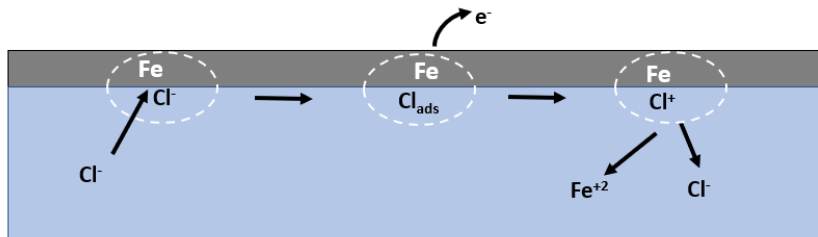


Figura 44. Mecanismo de Inhibición de los sitios anódicos en el acero AISI 1018 en HCl.

En presencia de P(VIM2C) [IM], al igual que en H₂SO₄, se observa un comportamiento mixto con tendencias anódica, lo cual indica una preferencia a retardar la disolución del hierro. Las macromoléculas del PLI son adsorbidas e interactúan con (FeCl⁻)_{ads} (Q. B. Zhang & Hua, 2009):

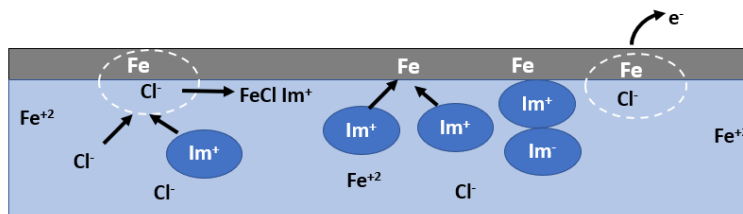
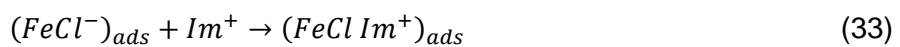


Figura 45. Mecanismo de Inhibición de los sitios anódicos en el acero AISI 1018 en HCl y P(VIM2C) [IM].

Sin embargo, debido a las bajas eficiencias presentadas se infiere que el efecto de inhibición solo se presenta en ciertas zonas, mientras que en zonas superficiales no protegidas se presentan las Reacciones 29-32.

La adición de P(VIM4C) [IM] en el medio corrosivo, retarda tanto las reacciones anódicas como catódicas, siendo estas últimas las principalmente afectadas, como lo indican los resultados electroquímicos. Además, de acuerdo con los resultados de ΔG°_{ads} y los valores de la pendiente, su adsorción sobre la superficie de acero se debe al intercambio de electrones entre las moléculas del PLI y los átomos de hierro, de esta manera cada sitio activo de la superficie del metal es ocupado por una especie adsorbida.

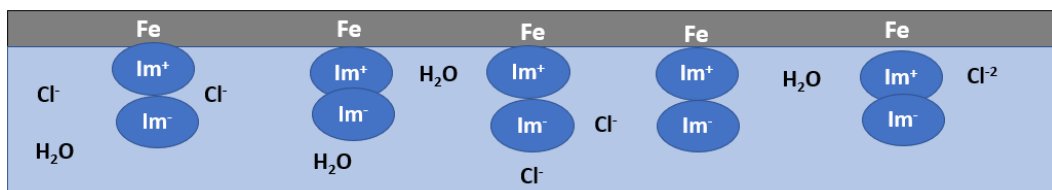
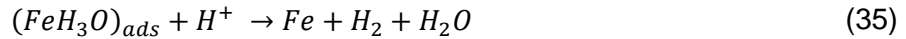
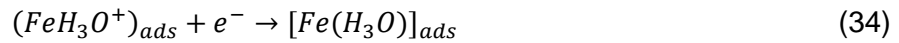


Figura 46. Mecanismo de Inhibición de los sitios anódicos en el acero AISI 1018 en HCl y P(VIM4C) [IM].

3.6.2 Zona catódica

La principal reacción de reducción es la reacción de evolución de hidrógeno y se lleva a cabo en las zonas catódica, en la cual se presenta la adsorción del ion hidronio (H_3O^+) y la desorción del gas de hidrógeno (Kowsari et al., 2016):



Se observa una adsorción del ion hidronio en la superficie del metal formando el complejo FeH_3O_{ads} , posteriormente al interactuar con otro ion hidronio se desorbe como hidrógeno en forma de gas; este proceso ocurre en ambos medios corrosivos como se observa en la Figura 47.

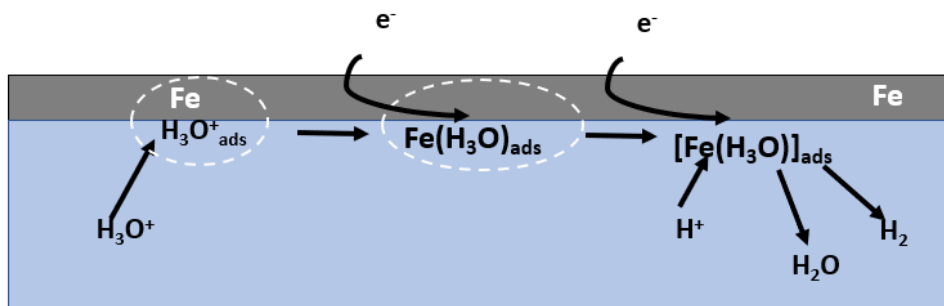
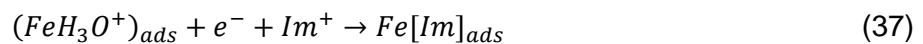


Figura 47. Mecanismo de Inhibición de los sitios catódicos en el acero AISI 1018 en H_2SO_4 y HCl .

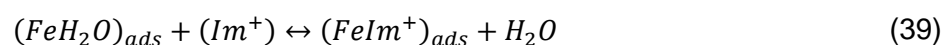
El P(VIM2C) [IM] muestran una tendencia inhibitoria hacia zonas catódicas y anódicas (mixto), con tendencia hacia la última zona. El PLI puede reemplazar las moléculas de agua adsorbidas por su adsorción a la superficie mediante fuerzas de Van der Waals y/o intercambio de electrones, lo cual se representa en las Reacciones 36 y 37, respectivamente (Yesudass et al., 2016).



Por otra parte, considerando la adsorción de moléculas de agua hacia la superficie del hierro mediante la Reacción 38:



En presencia de PLI, las moléculas de agua adsorbidas son reemplazadas por las macromoléculas del PLI, tal como se refleja en la Reacción 39.



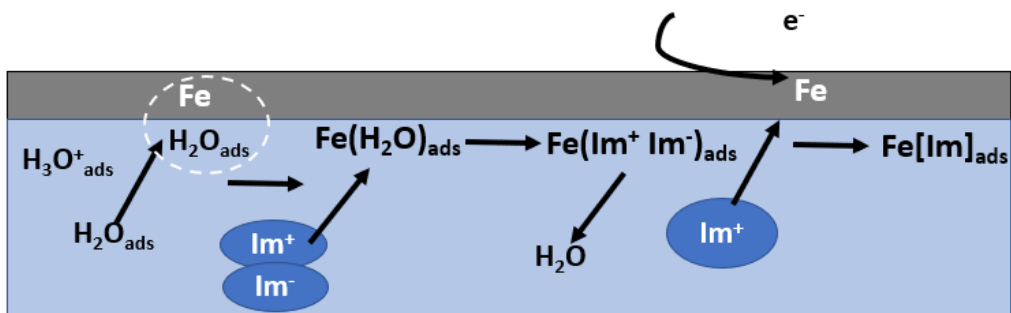


Figura 48. Mecanismo de Inhibición de los sitios catódicos en el acero AISI 1018 en H_2SO_4 , HCl y P(VIM2C) [IM].

Respecto al P(VIM4C) [IM], es posible concluir que el PLI desplaza casi en su totalidad a las moléculas de agua, esto debido a la estructura molecular del PLI el cual supera en tamaño molecular al agua, ocupando mayor área superficial. Adicionalmente, considerando los resultados de las isotermas de adsorción, la adsorción de P(VIM4C) [IM] sobre la superficie metálica es de tipo química (Reacción 37) y cada sitio activo de la superficie del metal es ocupado por una especie adsorbida.

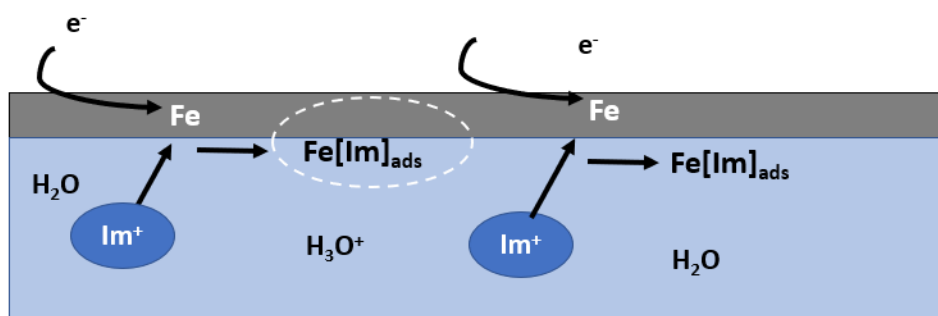


Figura 49. Mecanismo de Inhibición de los sitios catódicos en el acero AISI 1018 en H_2SO_4 , HCl y P(VIM4C) [IM].

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se evaluaron dos PLIs entrecruzados a base de imidazolio P(VIM2C) [IM] y P(VIM4C) [IM] como IC para el acero AISI 1018 en H₂SO₄ y HCl 1M a temperatura ambiente. En base a los resultados obtenidos se concluyó lo siguiente:

Mediante las pruebas electroquímicas de polarización Tafel y resistencia a la polarización se demostró que en presencia de los PLIs se reduce la densidad de corriente de corrosión y aumenta la resistencia eléctrica, indicando que los PLIs funcionan como inhibidores de corrosión. Los análisis de ΔE_{corr} mostraron desplazamientos de -15 a +25 mV, indicando que ambos PLIs son inhibidores de tipo mixto, es decir, retardan las reacciones anódicas y catódicas por un bloque de sitios activos.

Mediante la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica, se observó en ambos medios corrosivos un aumento en la resistencia a la transferencia de carga, indicando un efecto inhibitorio directamente proporcional a la concentración de los PLI. Respecto al P(VIM4C) [IM] en H₂SO₄ y HCl se observa la desaparición de un loop inductivo, así como un aumento drástico en R_{ct} , demostrando las altas eficiencias de este PLI debido a la capa protectora presente entre la superficie del acero y la solución.

Se comprobó que la EI es directamente proporcional con la concentración de los ICs, obteniéndose máximas eficiencias a 200 ppm y en medio de H₂SO₄ 1M. El PLI más eficiente fue el P(VIM4C) [IM] con EI por encima del 95%, demostrando que el tamaño de la cadena alquílica del inhibidor tiene una influencia positiva en la EI .

El ajuste lineal de los datos experimentales a modelos de isothermas de adsorción indicó que los ICs siguen un comportamiento de isoterma de Langmuir para H₂SO₄ en presencia de ambos PLIs y en HCl con P(VIM4C) [IM], mientras que el modelo de Temkin se ajustó en HCl en presencia de P(VIM2C) [IM], demostrando repulsión entre las moléculas del IC. El P(VIM4C) [IM] mostró tener más adherencia a la superficie del metal, y bloquea mayor cantidad de sitios catódicos y anódicos inhibiendo mejor la corrosión respecto al P(VIM2C) [IM].

REFERENCIAS

- Abiola, O. K., & James, A. O. (2010). The effects of Aloe vera extract on corrosion and kinetics of corrosion process of zinc in HCl solution. *Corrosion Science*, 52(2), 661–664. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.10.026>
- Abiola, O. K., & Otaigbe, J. O. E. (2009). The effects of Phyllanthus amarus extract on corrosion and kinetics of corrosion process of aluminum in alkaline solution. *Corrosion Science*, 51(11), 2790–2793. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.07.006>
- Al-Amiery, A. A., Binti Kassim, F. A., Kadhum, A. A. H., & Mohamad, A. B. (2016). Synthesis and characterization of a novel eco-friendly corrosion inhibition for mild steel in 1 M hydrochloric acid. *Scientific Reports*, 6(January), 1–13. <https://doi.org/10.1038/srep19890>
- Alcántara, J., de la Fuente, D., Chico, B., Simancas, J., Díaz, I., & Morcillo, M. (2017). Marine atmospheric corrosion of carbon steel: A review. *Materials*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/ma10040406>
- Arellanes-Lozada, P., Olivares-Xometl, O., Guzmán-Lucero, D., Likhanova, N. V., Domínguez-Aguilar, M. A., Lijanova, I. V., & Arce-Estrada, E. (2014). The inhibition of aluminum corrosion in sulfuric acid by poly(1-vinyl-3-alkylimidazolium hexafluorophosphate). *Materials*, 7(8), 5711–5734. <https://doi.org/10.3390/ma7085711>
- Asadi, N., Ramezanzadeh, M., Bahlakeh, G., & Ramezanzadeh, B. (2019). Utilizing Lemon Balm extract as an effective green corrosion inhibitor for mild steel in 1M HCl solution: A detailed experimental, molecular dynamics, Monte Carlo and quantum mechanics study. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 95, 252–272. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.07.011>

ASTM G102.pdf. (n.d.).

Atta, A. M., El-Mahdy, G. A., Allohedan, H. A., & Abdullah, M. M. S. (2015). Poly (ionic liquid) based on modified ionic polyacrylamide for inhibition steel corrosion in acid solution. *International Journal of Electrochemical Science*, *10*(12), 10389–10401.

Azeez, F. A., Al-Rashed, O. A., & Nazeer, A. A. (2018). Controlling of mild-steel corrosion in acidic solution using environmentally friendly ionic liquid inhibitors: Effect of alkyl chain. *Journal of Molecular Liquids*, *265*, 654–663. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.093>

B. E Conway, J. 'M. B. (2002). Modern Aspects of Electrochemistry. In *New York* (Vol. 32).

Bashir, S., Lgaz, H., Chung, I. I. I. M., & Kumar, A. (2019). Potential of Venlafaxine in the inhibition of mild steel corrosion in HCl: insights from experimental and computational studies. *Chemical Papers*, *73*(9), 2255–2264. <https://doi.org/10.1007/s11696-019-00775-0>

Behpour, M., Ghoreishi, S. M., Soltani, N., Salavati-Niasari, M., Hamadani, M., & Gandomi, A. (2008). Electrochemical and theoretical investigation on the corrosion inhibition of mild steel by thiosalicylaldehyde derivatives in hydrochloric acid solution. *Corrosion Science*, *50*(8), 2172–2181. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.020>

Bentiss, F., Outirite, M., Traisnel, M., Vezin, H., Lagrenée, M., Hammouti, B., ... Jama, C. (2012). Improvement of corrosion resistance of carbon steel in hydrochloric acid medium by 3,6-bis(3-pyridyl)pyridazine. *International Journal of Electrochemical Science*, *7*(2), 1699–1723.

Berradja, A. (2019). Electrochemical Techniques for Corrosion and Tribocorrosion Monitoring: Methods for the Assessment of Corrosion Rates. *Corrosion Inhibitors*, 1–26. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86743>

Bruce Mackay, N. A., Marko Stipanicev, Øystein B., Jackson, E. J., Jenkins, A., Melot, D., Schele, J., & Vittonato, J. (2016). La corrosión: La lucha más

extensa. *Oilfield Review*, 28(2), 16. Retrieved from https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish16/may16/03-corrosion.pdf

Cabrera-Sierra, R., Marín-Cruz, J., & González, I. (2007). Comunicaciones técnicas. *Bol. Soc. Quím. Méx*, 1(1), 32–41.

Cano, E., & Lafuente, D. (2013). Corrosion inhibitors for the preservation of metallic heritage artefacts. *Corrosion and Conservation of Cultural Heritage Metallic Artefacts*, 570–594. <https://doi.org/10.1533/9781782421573.5.570>

Castillo Borja, F. (2015). Líquidos iónicos: métodos de síntesis y aplicaciones. *ConCiencia Tecnológica*, (49), 52–56.

Collin, G., & Höke, H. (2000). Acridine. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 9(4). https://doi.org/10.1002/14356007.a01_147

Corrales-Luna, M., Le Manh, T., Romero-Romo, M., Palomar-Pardavé, M., & Arce-Estrada, E. M. (2019). 1-Ethyl 3-methylimidazolium thiocyanate ionic liquid as corrosion inhibitor of API 5L X52 steel in H₂SO₄ and HCl media. *Corrosion Science*, 153(March), 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.03.041>

Corte Morquecho, E. D., & Estrella Peña, J. (2010). Obtención de Curvas Galvanostáticas y Ensayos de Resistencia a la Polarización en Varillas de Construcción ASTM A42 en Solución de Agua al Resumen para Determinar la Velocidad de. *Revista Tecnológica ESPOL*, xx(1), 1–9.

Davis, J. R. (2000). Corrosion: understanding the basics. In *Choice Reviews Online* (Vol. 37). <https://doi.org/10.5860/choice.37-6294>

Dean, S. W. (1986). Electrochemical Techniques for Corrosion Engineering. *Electrochemical Methods of Corrosion Testing*.

Dehghani, A., Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, B., & Ramezanzadeh, M. (2019a). A combined experimental and theoretical study of green corrosion inhibition of mild steel in HCl solution by aqueous Citrullus lanatus fruit (CLF) extract.

Journal of Molecular Liquids, 279, 603–624.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.02.010>

Dehghani, A., Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, B., & Ramezanzadeh, M. (2019b). Potential of Borage flower aqueous extract as an environmentally sustainable corrosion inhibitor for acid corrosion of mild steel: Electrochemical and theoretical studies. *Journal of Molecular Liquids*, 277, 895–911. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.008>

Döner, A., Solmaz, R., Özcan, M., & Kardaş, G. (2011). Experimental and theoretical studies of thiazoles as corrosion inhibitors for mild steel in sulphuric acid solution. *Corrosion Science*, 53(9), 2902–2913. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.05.027>

Durkee, M. M. (1987). Soybean Oil in the Food Industry. *Industrial and Engineering Chemistry*, 28(8), 898–903. <https://doi.org/10.1021/ie50320a006>

El-Shafei, A. A., Moussa, M. N. H., & El-Far, A. A. (2001). Corrosion inhibition character of thiosemicarbazide and its derivatives for C-steel in hydrochloric acid solution. *Materials Chemistry and Physics*, 70(2), 175–180. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(00\)00496-X](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(00)00496-X)

Farag, A. A., Migahed, M. A., & Badr, E. A. (2019). Thiazole Ionic Liquid as Corrosion Inhibitor of Steel in 1 M HCl Solution: Gravimetric, Electrochemical, and Theoretical Studies. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 5(3). <https://doi.org/10.1007/s40735-019-0246-4>

Farag, A. A., & Noor El-Din, M. R. (2012). The adsorption and corrosion inhibition of some nonionic surfactants on API X65 steel surface in hydrochloric acid. *Corrosion Science*, 64, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.07.016>

Fattah-alhosseini, A., & Noori, M. (2016). Corrosion inhibition of SAE 1018 carbon steel in H₂S and HCl solutions by lemon verbena leaves extract. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 94, 787–793. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.09.029>

- Gomez-Herrero, E., Tobajas, M., Polo, A., Rodriguez, J. J., & Mohedano, A. F. (2019). Removal of imidazolium-based ionic liquid by coupling Fenton and biological oxidation. *Journal of Hazardous Materials*, *365*, 289–296. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.097>
- Gómez-Sánchez, G., Likhanova, N. V., Arellanes-Lozada, P., Arriola-Morales, J., Nava, N., Olivares-Xometl, O., ... Corro, G. (2019). Electrochemical, surface and 1018-steel corrosion product characterization in sulfuric acid with new imidazole-derived inhibitors. *International Journal of Electrochemical Science*, *14*(9), 9255–9272. <https://doi.org/10.20964/2019.09.65>
- Guzmán-Lucero, D., Olivares-Xometl, O., Martínez-Palou, R., Likhanova, N. V., Domínguez-Aguilar, M. A., & Garibay-Feblés, V. (2011). Synthesis of selected vinylimidazolium ionic liquids and their effectiveness as corrosion inhibitors for carbon steel in aqueous sulfuric acid. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *50*(12), 7129–7140. <https://doi.org/10.1021/ie1024744>
- Guzman Lucero Diego, Likhanova Natalya, López Falcon Dennis, Palomeque Santiago Jorge, Guzmán Pantoja, J. (2017). *Patent No. 03-2017-083111353600-01*.
- Haldhar, R., Prasad, D., & Saxena, A. (2018). Armoracia rusticana as sustainable and eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 0.5M sulphuric acid: Experimental and theoretical investigations. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *6*(4), 5230–5238. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.025>
- Hara, K., Arakawa, H., Dssc, C., Cell, S., Physics, D., Jeerage, K. M., ... Lee, J. (2013). Theory , Experiment , and. In *Journal of Applied Electrochemistry* (Vol. 125). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.02.003>
- Heinemann, B. (1994). *Corrosion Control* (Ltd). Oxford.
- HOFMAN, K. (1953). *Imidazole and Its Derivatives* (Interscien). New York.
- Jafari, H., Akbarzade, K., & Danaee, I. (2019). Corrosion inhibition of carbon steel immersed in a 1 M HCl solution using benzothiazole derivatives. *Arabian*

Journal of Chemistry, 12(7), 1387–1394.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.11.018>

kamali Ardakani E, Kowsari E, E. A. (2008). Inhibition of mild steel corrosion in acidic medium using synthetic and naturally occurring polymers and synergistic halide additives. *Corrosion Science*, 50(7), 1998–2006.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.04.015>

Kamali Ardakani, E., Kowsari, E., & Ehsani, A. (2019). Imidazolium-derived polymeric ionic liquid as a green inhibitor for corrosion inhibition of mild steel in 1.0 M HCl: Experimental and computational study. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 127065. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127065>

Kolotyркиn, Y. M., Losev, V. V., & Chemodanov, A. N. (1988). Relationship between corrosion processes and oxygen evolution on anodes made from noble metals and related metal oxide anodes. *Materials Chemistry and Physics*, 19(1–2), 1–95. [https://doi.org/10.1016/0254-0584\(88\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0254-0584(88)90002-8)

Kowsari, E., Arman, S. Y., Shahini, M. H., Zandi, H., Ehsani, A., Naderi, R., ... Mehdipour, M. (2016). In situ synthesis, electrochemical and quantum chemical analysis of an amino acid-derived ionic liquid inhibitor for corrosion protection of mild steel in 1M HCl solution. *Corrosion Science*, 112, 73–85.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.07.015>

Krische, M. J. (2007). Topics in Current Chemistry: Preface. In *Topics in Current Chemistry* (Vol. 279). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72879-5>

Lee, H., & Jeoung, E. H. (1998). Reactivities of five-membered heterocycles in hydride transfer reactions in-solvent. *Journal of Organic Chemistry*, 63(21), 7275–7279. <https://doi.org/10.1021/jo980707s>

Likhanova, N. V., Domínguez-Aguilar, M. A., Olivares-Xometl, O., Nava-Entzana, N., Arce, E., & Dorantes, H. (2010). The effect of ionic liquids with imidazolium and pyridinium cations on the corrosion inhibition of mild steel in acidic environment. *Corrosion Science*, 52(6), 2088–2097.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.02.030>

- Lord, H. L., Zhan, W., Pawliszyn, J., & Pawliszyn, J. (2012). Fundamentals and applications of needle trap devices. In *Comprehensive Sampling and Sample Preparation* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381373-2.00056-9>
- Loto, C. A., & Loto, R. T. (2016). Corrosion inhibition effect of *Allium Ceba* extracts on mild steel in H₂SO₄. *Der Pharma Chemica*, 8(20), 272–281.
- Ma, Y., Han, F., Li, Z., & Xia, C. (2016). Acidic-Functionalized Ionic Liquid as Corrosion Inhibitor for 304 Stainless Steel in Aqueous Sulfuric Acid. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4(9), 5046–5050. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01492>
- Mansfeld, F. (1987). *Corrosion Mechanisms* (Marcel Dek; I. Marcel Dekker, Ed.). New York.
- Materials, A. S. for T. and. (1999). *ASTM-G3 89.pdf*.
- Mccafferty, E., & Einar Bardal. (2004). to Corrosion. In *Mechanics of Composite Materials* (Springer). <https://doi.org/10.1007/b97510>
- Mecerreyes, D. (2011). Polymeric ionic liquids: Broadening the properties and applications of polyelectrolytes. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 36(12), 1629–1648. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.05.007>
- Metrohm. (2011). Corrosion: 3 . Measurement of Polarization Resistance. *Measurement*, 3–4. Retrieved from http://www.metrohm-autolab.com/download/Applicationnotes/Autolab_Application_Note_COR03.pdf
- Molyneux, P. (2018). *Synthetic Polymers : Properties and Behavior Author*.
- Muñoz, E. A. C. (2008). *Implantación Iónica por plasma en Titanio y Aceros Inoxidables usados en prótesis e instrumental médico*. 1–91.
- Nahl, J. (2016). *Corrosion Inhibition on Mild Steel in 1 . 0 M HCl Solution by 1-Vinylimidazolium-3- methyltriphenyl Phosphonium Dihexafluoroantimonate Salt Ayssar Nahlé , Ideisan Abu-Abdoun , Ibrahim Abdel-Rahman*

Department of Chemistry , College of Sciences , University . 7(8), 2955–2964.

- Nofrizal, S., Rahim, A. A., Saad, B., Bothi Raja, P., Shah, A. M., & Yahya, S. (2012). Elucidation of the corrosion inhibition of mild steel in 1.0 M HCl by catechin monomers from commercial green tea extracts. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, *43(4)*, 1382–1393. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-1030-3>
- Pavlov, D. (2011). H₂SO₄ Electrolyte – An Active Material in the Lead–Acid Cell. In *Lead-Acid Batteries: Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-52882-7.10003-5>
- PEMEX. (2000). *NRF-005-PEMEX-2000 Proteccion interior de ductos con inhibidores*.
- Popoola, L. T., Grema, A. S., Latinwo, G. K., Gutti, B., & Balogun, A. S. (2013). Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation. *International Journal of Industrial Chemistry*, *4(1)*, 1–15. <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-35>
- Qiang, Y., Zhang, S., Guo, L., Zheng, X., Xiang, B., & Chen, S. (2017). Experimental and theoretical studies of four allyl imidazolium-based ionic liquids as green inhibitors for copper corrosion in sulfuric acid. *Corrosion Science*, *119*, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.02.021>
- Raymond Chang, K. A. G. (2017). Chemistry. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rebolledo-Libreros, M. E., Reza, J., Trejo, A., & Guzmán-Lucero, D. J. (2017). Evaluation of copolymers from 1-vinyl-3-alkylimidazolium bromide and N-vinylcaprolactam as inhibitors of clathrate hydrate formation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *40*, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.02.008>
- Ren, Y., Luo, Y., Zhang, K., Zhu, G., & Tan, X. (2008). Lignin terpolymer for corrosion inhibition of mild steel in 10% hydrochloric acid medium. *Corrosion*

Science, 50(11), 3147–3153. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.08.019>

Reza, J., Trejo, A., Rebolledo-Libreros, M. E., & Guzmán-Lucero, D. (2018). Inhibition of structure II hydrates formation by salt-tolerant N-vinyl lactam-based terpolymers. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 56, 175–192. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.05.039>

Rugmini Ammal, P., Prajila, M., & Joseph, A. (2018). Effect of substitution and temperature on the corrosion inhibition properties of benzimidazole bearing 1, 3, 4-oxadiazoles for mild steel in sulphuric acid: Physicochemical and theoretical studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 1072–1085. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.031>

Salhi, A., Tighadouini, S., El-Massaoudi, M., Elbelghiti, M., Bouyanzer, A., Radi, S., ... Zarrouk, A. (2017). Keto-enol heterocycles as new compounds of corrosion inhibitors for carbon steel in 1 M HCl: Weight loss, electrochemical and quantum chemical investigation. *Journal of Molecular Liquids*, 248, 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.10.040>

Sanumi, O., & Makhatha, E. (2018). Corrosion behavior of synthetic polymer inhibitors in acidic environment: A review. *2018 IEEE 9th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies, ICMIMT 2018, 2018-Janua*, 69–73. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT.2018.8340423>

Sastri, V. S. (2011). Green Corrosion Inhibitors Theory and Practice. In *New Jersey* (Wiley). New Jersey.

Sastri, V. S., Ghali, E., & Elboudjaini, M. (2012). Corrosion Prevention and Protection: Practical Solutions. In *Corrosion Prevention and Protection: Practical Solutions*. <https://doi.org/10.1002/9780470024546>

Schweitzer, P. E. . P. A. (2006). Fundamentals of Metallic Corrosion. *Fundamentals of Metallic Corrosion*. <https://doi.org/10.1201/9780849382444>

Seymour R.B., C. C. E. (1995). *Introducción a la química de los polímeros*

(Reverte; Reverté, Ed.). Boca Ratón, Florida.

Shaban, S. M., Aiad, I., El-Sukkary, M. M., Soliman, E. A., & El-Awady, M. Y. (2015). Evaluation of some cationic surfactants based on dimethylaminopropylamine as corrosion inhibitors. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 1029–1038. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.05.012>

Shahid, M. (2011). Corrosion protection with eco-friendly inhibitors. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2(4), 0–6. <https://doi.org/10.1088/2043-6262/2/4/043001>

Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. (2012). *Astm G31-2012. i*(Reapproved).

Stanly Jacob, K., & Parameswaran, G. (2010). Corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid solution by Schiff base furoin thiosemicarbazone. *Corrosion Science*, 52(1), 224–228. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.09.007>

SUMITEC. (2009). Acero AISI-SAE 1018. Retrieved from www.sumiteccr.com

Tian, H., Li, W., Hou, B., & Wang, D. (2017). Insights into corrosion inhibition behavior of multi-active compounds for X65 pipeline steel in acidic oilfield formation water. *Corrosion Science*, 117, 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.01.010>

Toussaint, A. (2015). *Use of Organic and Inorganic Corrosion Inhibitors in High Performance Coatings*.

Tribollet, M. E. O. B. (2008). *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (JOHN WILEY). New Jersey: New Jersey.

Uhlig Herbert, H. (2011). The Corrosion Handbook. In *New York* (John Wiley).

Verma, C., Ebenso, E. E., & Quraishi, M. A. (2017). Ionic liquids as green and sustainable corrosion inhibitors for metals and alloys: An overview. *Journal of Molecular Liquids*, 233(2016), 403–414.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.111>

Verma, C., Ebenso, E. E., & Quraishi, M. A. (2018). Ionic Liquids as Green Corrosion Inhibitors for Industrial Metals and Alloys. *Green Chemistry*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70421>

Wahdan, M. H., Hermas, A. A., & Morad, M. S. (2002). Corrosion inhibition of carbon-steels by propargyltriphenylphosphonium bromide in H₂SO₄ solution. *Materials Chemistry and Physics*, 76(2), 111–118. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(01\)00526-0](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00526-0)

Wang, X., Yang, H., & Wang, F. (2011). An investigation of benzimidazole derivative as corrosion inhibitor for mild steel in different concentration HCl solutions. *Corrosion Science*, 53(1), 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.09.029>

Warnan, J., Kuehnel, M. F., Friend, R. H., Crespo-quesada, M., Pazos-oto, L. M., & Reisner, E. (2016). *Dissociation of Sulfuric Acid in Aqueous Solution: Determination of the Photoelectron Spectran Fingerprints of H₂SO₄, HSO₄⁻, and SO₄²⁻ in Water*. 6–12. <https://doi.org/10.1038/ncomms12555>

Winston R., U. H. (2008). Corrosion and Corrosion Control. In *Wiley- Interscience* (Wiley-Int, Vol. 288). <https://doi.org/10.1136/bmj.288.6417.643>

Xia, S., Qiu, M., Yu, L., Liu, F., & Zhao, H. (2008). Molecular dynamics and density functional theory study on relationship between structure of imidazoline derivatives and inhibition performance. *Corrosion Science*, 50(7), 2021–2029. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.04.021>

Yadav, D. K., Maiti, B., & Quraishi, M. A. (2010). Electrochemical and quantum chemical studies of 3,4-dihydropyrimidin-2(1H)-ones as corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solution. *Corrosion Science*, 52(11), 3586–3598. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.06.030>

Yesudass, S., Olasunkanmi, L. O., Bahadur, I., Kabanda, M. M., Obot, I. B., & Ebenso, E. E. (2016). Experimental and theoretical studies on some selected ionic liquids with different cations/anions as corrosion inhibitors for mild steel

in acidic medium. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 64, 252–268. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.04.006>

Yuan, J., Mecerreyes, D., & Antonietti, M. (2013). Poly(ionic liquid)s: An update. *Progress in Polymer Science*, 38(7), 1009–1036. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.04.002>

Zaki Ahmad. (2006). • ISBN: 0750659246 • Pub. Date: September 2006 • Publisher: Elsevier Science & Technology Books.

Zeng, W., Du, Y., Xue, Y., & Frisch, H. L. (2007). Mark-Houwink-Staudinger-Sakurada constants. *Physical Properties of Polymers Handbook*, 199(Part_1), 1073. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-69002-5>

Zhang, J., Zhang, L., Tao, G., & Chen, N. (2018). Inhibition effect and adsorption behavior of two imidazolium-based ionic liquids on X70 steel in sulfuric acid solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(9), 8645–8656. <https://doi.org/10.20964/2018.09.17>

Zhang, Q. B., & Hua, Y. X. (2009). Corrosion inhibition of mild steel by alkylimidazolium ionic liquids in hydrochloric acid. *Electrochimica Acta*, 54(6), 1881–1887. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.10.025>

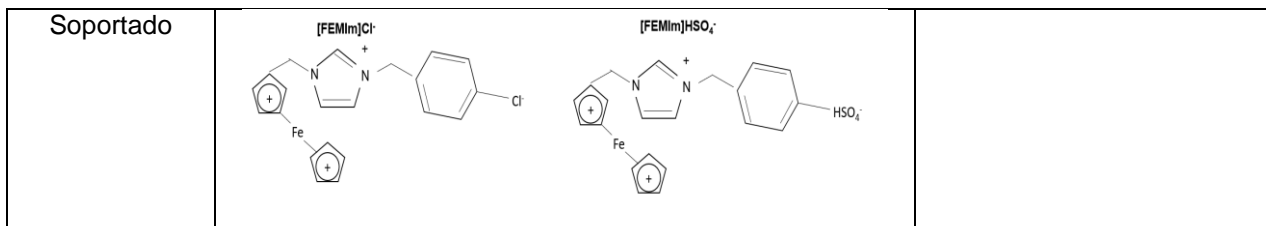
Zheng, X., Zhang, S., Li, W., Yin, L., He, J., & Wu, J. (2014). Investigation of 1-butyl-3-methyl-1H-benzimidazolium iodide as inhibitor for mild steel in sulfuric acid solution. *Corrosion Science*, 80, 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.11.053>

ANEXO A: Clasificación de líquidos iónicos

La Tabla A-1 muestra una de las clasificaciones para los LIs de acuerdo con su naturaleza química.

Tabla A-1 Clasificación de Líquidos iónicos (Verma et al., 2018).

TIPO DE LI	EJEMPLOS	OBSERVACIÓN
Neutral	<p>Hexafluorofosfato</p> <p>Tiocianato</p> <p>Tricianuro</p> <p>bis (trifluorometanosulfonil) amida</p> <p>p-tolueno sulfonato</p>	Los aniones son asociados con cationes de buena interacción electrostática, bajo punto de fusión.
Ácido		LIs con cationes o aniones ácidos, mejor solubilidad en agua, buena eficiencia como catalizador.
Base		LIs naturalmente básicos, debido a la presencia de uno o más grupos aminos (1, 2 o 3 aminos).
Funcional		LIs que posee un grupo funcional covalente vinculado en el anión y/o catión



En lo que respecta a la base catiónica, los LI pueden dividirse en seis grupos:

- Cationes heterocíclicos de cinco miembros.
- Cationes heterocíclicos benzo-fusionados de 6 miembros.
- Cationes a bases de amonio, sulfonio y fosfonio.
- Cationes de imidazolio funcionalizados.
- Cationes quirales.

Siendo los cationes heterocíclicos de cinco miembros los más empleados como IC.

La Figura A-1 muestra los cationes heterocíclicos de 5 miembros, los cuales son los cationes de imidazolio, pirazolio, oxazolio, triazolio, tiazolio y metimazolio, si bien las sales de haluro son sólidas a temperaturas ambiente, existen aniones que disminuyen los puntos de fusión de las sales por debajo de la temperatura ambiente. Estos compuestos son parte fundamental de más de la mitad de las componentes producidos por la naturaleza (Lee & Jeoung, 1998).

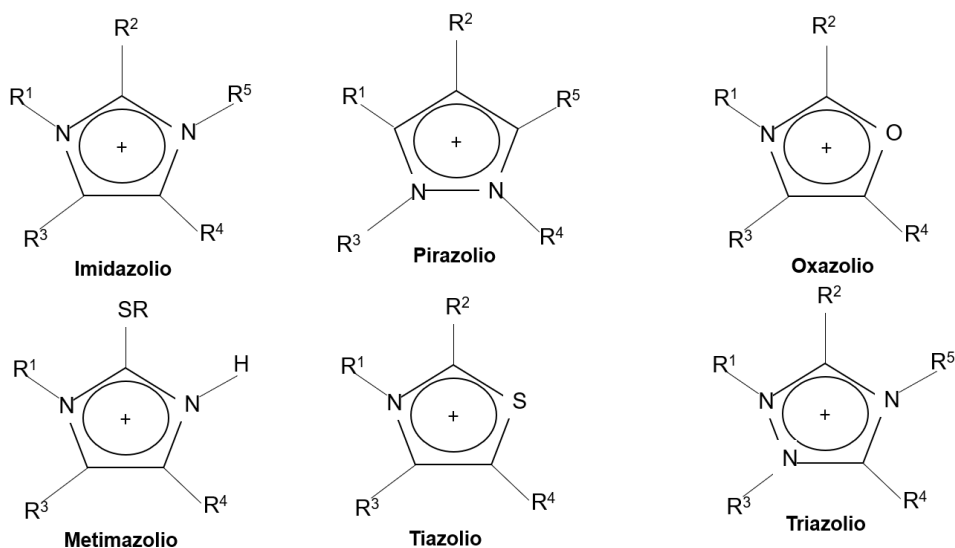


Figura A-1. Cationes heterocíclicos de cinco miembros (Krische, 2007)..

ANEXO B: Síntesis y caracterización de PLIs

B.1. Síntesis de PLIs

En este estudio se evaluaron dos PLIs como inhibidores de corrosión de acero AISI 1018 en medio ácido: imidazolato de poli(1-vinil-3-etilimidazoleo), P(VIM2C) [IM] e imidazolato de poli(1-vinil-3-butimidazoleo), P(VIM4C) [IM], los cuales se presentan en la Tabla 4.

A continuación, se muestra la metodología empleada para llevar a cabo la síntesis de los PLIs:

- a) Obtención de líquidos iónicos vinílicos
- b) Síntesis de homopolímeros derivados de bromuros de poli(1-vinil-3-alkilimidazolio).
- c) Síntesis de homopolímeros derivados de imidazolatos de poli(1-vinil-3-alkilimidazolio).

Los compuestos químicos que se utilizaron para llevar a cabo la síntesis de los PLIs fueron adquiridos de Sigma-Aldrich Co. En la Tabla B-1 se muestran los compuestos químicos usados para este fin, así como algunas de sus características.

Tabla B-1. Reactivos químicos para la obtención de monómeros vinílicos.

No.	Nombre	Abreviación	Peso molecular, g/gmol	Pureza, %	Estado físico	Número CAS
1	1-vinilimidazol	VIM	94.11	≥ 99	Líquido	1072-63-5
2	1-Bromobutano	C4	137.2	99	Líquido	109-65-9
3	1-Bromohexano	C6	165.07	98 %	Líquido	111-25-01
4	Metóxido de sodio	Metox-Na	54.20	25 % en metanol	Líquido	124-41-4

Otros disolventes que se utilizaron dentro del proceso de síntesis y purificación de los polímeros fueron: agua destilada e isopropanol como disolventes para llevar a cabo las síntesis y acetona como disolvente para la precipitación o purificación de los polímeros.

Obtención de líquidos iónicos vinílicos

Los monómeros iónicos derivados de 1-vinilimidazol se obtuvieron mediante procedimientos de síntesis descritos en la literatura (Guzmán-Lucero et al., 2011; Patent No. 03-2017-083111353600-01, 2017; Rebolledo-Libreros, Reza, Trejo, & Guzmán-Lucero, 2017; Reza, Trejo, Rebolledo-Libreros, & Guzmán-Lucero, 2018). Como un ejemplo de su obtención, se describe la síntesis de bromuro de 1-vinil-1-butimidazolio (VIM4C) y el esquema de esta reacción se observa en la Figura B-1.

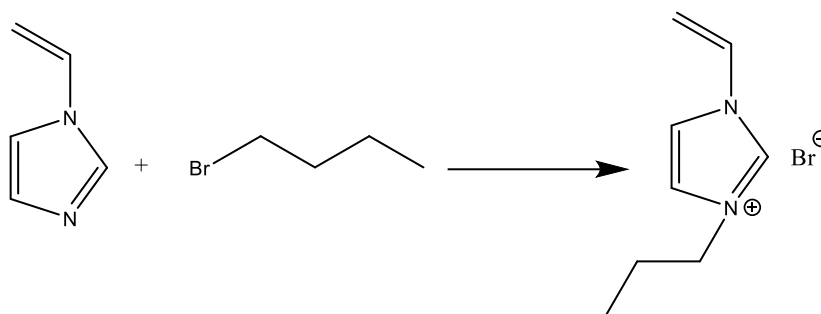


Figura B-1. Esquema de la síntesis de 1-vinil-1-butimidazolio (VIM4C).

Se equipó con un refrigerante y un termómetro un matraz de 100 ml de fondo redondo de 2 bocas, se colocaron 10.39 g (0.11 moles) de 1-vinilimidazol y 15.09 g (0.11 moles) de 1-bromobutano junto con una barra magnética. Se incrementó la temperatura hasta que el termómetro de la disolución de reacción alcanzó los 40 °C dejándolo reaccionar durante 10 horas y en agitación constante, con el transcurso del tiempo se observó la formación de otra fase, que es transparente y de color amarillo. Finalizando el tiempo de reacción, se enfrió hasta temperatura ambiente, lavando el líquido resultante con hexano. Durante el lavado el líquido de la reacción se solidificó en un polvo blanco. Se hicieron tres ciclos de lavado en hexano y, finalmente, el polvo blanco se secó a 45 °C y a vacío durante 4 horas. El polvo blanco tuvo un punto de fusión de 57 °C. De esta manera el monómero vinílico de VIM4C quedó listo para usarse en las reacciones de polimerización. Finalmente, todos los monómeros que se obtuvieron se caracterizaron por RMN de ¹H.

Síntesis de homopolímeros derivados de bromuros de poli(1-vinil-3-alkilimidazolio)

El homopolímero de bromuro de poli(1-vinil-3-butimidazolio) se sintetizó por la técnica de polimerización en disolución. El monómero VIM4C se polimerizó en

disolución acuosa en una concentración de sólidos totales de 1.565 moles/L, una concentración de iniciador respecto a los monómeros de 0.007 moles de iniciador/moles monómero a 50 °C. Se utilizó el iniciador de polimerización el dihidrocloruro de 2,2'-azobis(2-metilpropionamida), (V50), que se adquirió de la compañía Sigma-Aldrich Co. La síntesis de los polímeros derivados de bromuros de poli(1-vinil-3-alkilimidazolio) se llevó a cabo mediante el método previamente reportado en la literatura (Arellanes-Lozada et al., 2014).

Bromuro de poli(1-vinil-3-butylimidazolio), P(VIM4C) [Br]: En un matraz de fondo redondo de tres bocas y equipado con un refrigerante se colocaron 30 g (0.129 moles) de VIM4C, se le agregaron 82.8 mL de agua desionizada, Figura B-2. Se disolvió completamente el monómero y se eliminó el aire disuelto en la disolución mediante vacío. Se ajustó la temperatura de reacción a 50 °C, se dejó homogenizar la temperatura de la disolución para que alcance la temperatura de reacción y se agrega el iniciador de polimerización. El iniciador se disolvió en 5 mL de agua desionizada la disolución de reacción mediante una bomba de jeringa. Durante todo el tiempo de la reacción se burbujeó nitrógeno en la disolución y se deja que la reacción transcurra durante 10 h. Al terminar este tiempo, se observó la formación de una disolución viscosa, la cual se precipitó en acetona. El precipitado se secó en una estufa de vacío a 45 °C durante 6 h. El homopolímero se caracterizó por RMN de ^1H e infrarrojo.

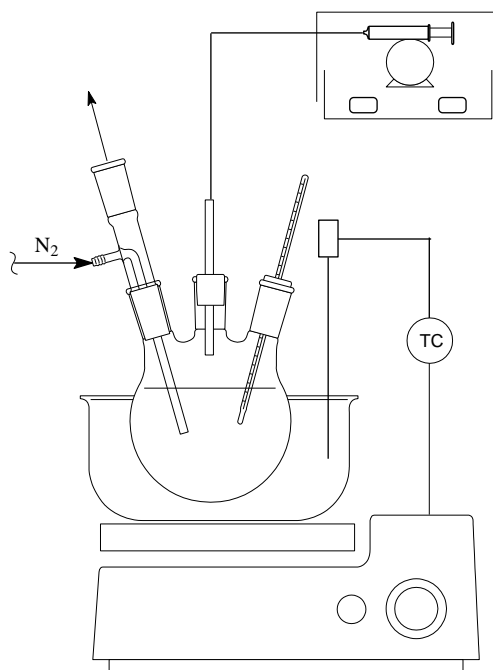


Figura B-2. Esquema del sistema de reacción de los homopolímeros de bromuro de poli(1-vinil-3-alkilimidazolio).

En la Figura B-3 se muestra el esquema de las reacciones para la obtención de los polímeros de bromuro de poli(1-vinil-3-alquil-imidazolio).

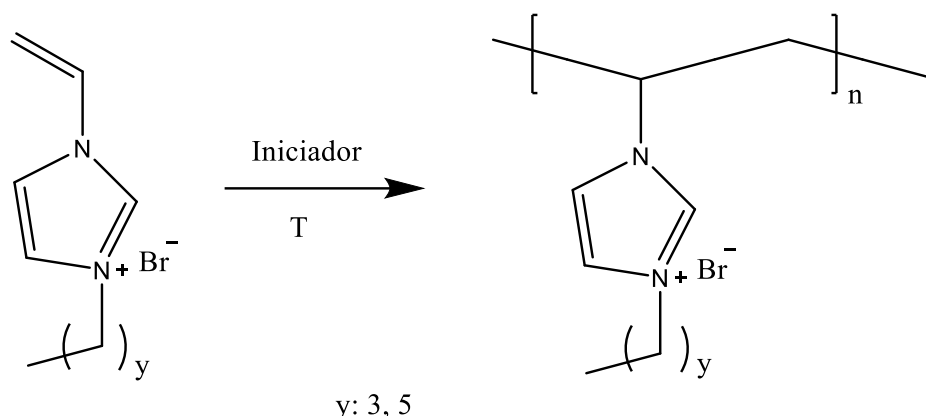


Figura B-3. Esquema de la reacción de polimerización para los bromuros de poli(1-vinil-3-alquilimidazolio).

Síntesis de homopolímeros derivados de imidazolatos de poli(1-vinil-3-alquilimidazolio)

Para la obtención de los polímeros de imidazolato de poli(1-vinil-3-alquilimidazolio), se llevó a cabo una reacción de intercambio iónico utilizando imidazolato de sodio. En la Figura B-4 se presenta el esquema de la reacción de la obtención de los dos homopolímeros.

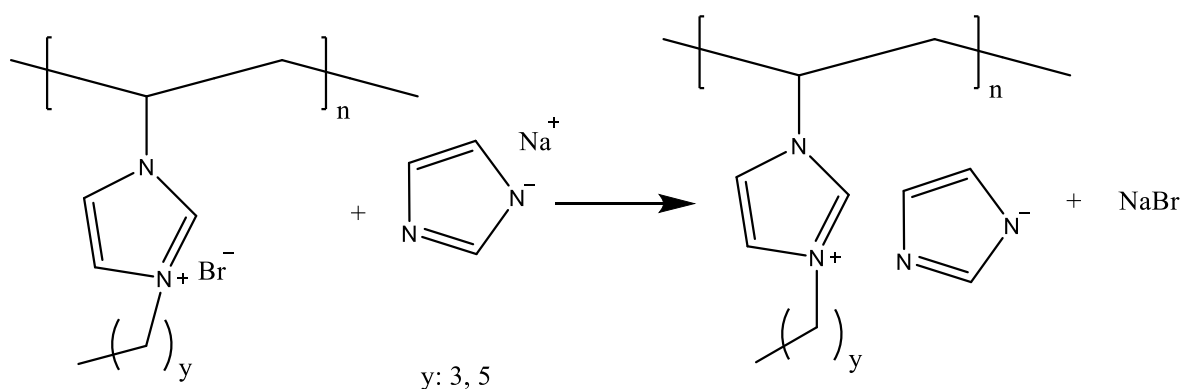


Figura B-4. Reacción de intercambio iónico para la obtención de los imidazolatos de poli(1-vinil-3-alquil-imidazolio).

A continuación, se presenta un ejemplo del procedimiento experimental de la obtención de uno de los homopolímeros. Imidazolato de poli(1-vinil-3-butilimidazolio), P(VIM4C) [IM]: En un vaso de precipitados se disolvieron 10.98 g (0.054 mol) de P(VIM4C) [Br] en 15 mL de metanol y se le agregaron 5.4 g (0.054 mol) de imidazolato de sodio. La reacción se llevó a cabo a temperatura y presión ambiental durante 30 min. Al terminar este periodo se precipitó en acetona. Se obtuvo una resina de color guinda muy oscura. Se secó en una estufa de vacío a 40 °C durante 8 h.

B.2. Caracterización de los PLIs

La estructura química de los terpolímeros se caracterizó utilizando las técnicas de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) por ^1H y ^{13}C en disolución, y de infrarrojo. Las características de los equipos fueron las siguientes: para RMN se utilizó un JEOL Eclipse-300 para ^1H (300 MHz) y para la espectroscopia infrarroja se usó un equipo Bruker Equinox 55.

En la Figura B-5 se muestra el cambio de las señales en ^1H de RMN en diferentes etapas de la síntesis hasta la obtención de homopolímero P(VIM4C) [IM]. Respecto al monómero VIM4C, la Figura B-5 (a), se aprecia con claridad las señales de los hidrógenos vinílicos en las posiciones 6 (dd en 5.44 ppm), 5 (dd en 5.97 ppm) y 4 (q en 7.33), las cuales desaparecen completamente al formarse los homopolímeros, debido a la desaparición del grupo vinílico. Las señales restantes en las posiciones; 10 (t, en 1.01 ppm) de los hidrógenos del grupo metilo, 9 (sx, en 1.41 ppm), 8 (sx, en 1.94 ppm) y 7 (t, en 4.32 ppm) corresponden a los hidrógenos de los dos grupos metilenos. Finalmente se encuentran en las posiciones 1, 2 y 3 (s en 7.5, 8.7 y 9.48 ppm) de los hidrógenos del heterociclo imidazólico. La Figura B-5 (b) y Figura B-5 (c) corresponde a los polímeros P(VIM4C) [Br] y P(VIM4C) [IM], respectivamente. No se observan las señales vinílicas y las señales de grupo metilo en la posición 10 y los dos metilenos en las posiciones 9 y 8 aparecen ensanchas, una característica de que la estructura que se formó es un polímero. También se alcanza a distinguir una nueva señal, muy ancha, en la posición 11 en 2.70 ppm, la cual corresponde a un grupo metileno de la cadena principal del polímero. En la Figura B-5 (b) se distingue además la señal de la posición 12 en 4.61 ppm, que corresponde al hidrógeno del grupo metileno de la cadena principal, del cual el grupo lateral imidazolío. En la Figura B-5 (c) se pueden observar en absorciones correspondientes a tres nuevas señales en 7.06 ppm (2 hidrógenos) y en 7.69 ppm para las posiciones 13, 14 y 15, las cuales corresponden a los hidrógenos del grupo imidazolato. De acuerdo con el análisis anterior, se puede concluir que se logró obtener la estructura química del homopolímero de imidazolatos de poli(1-vinil-3-butilimidazolío).

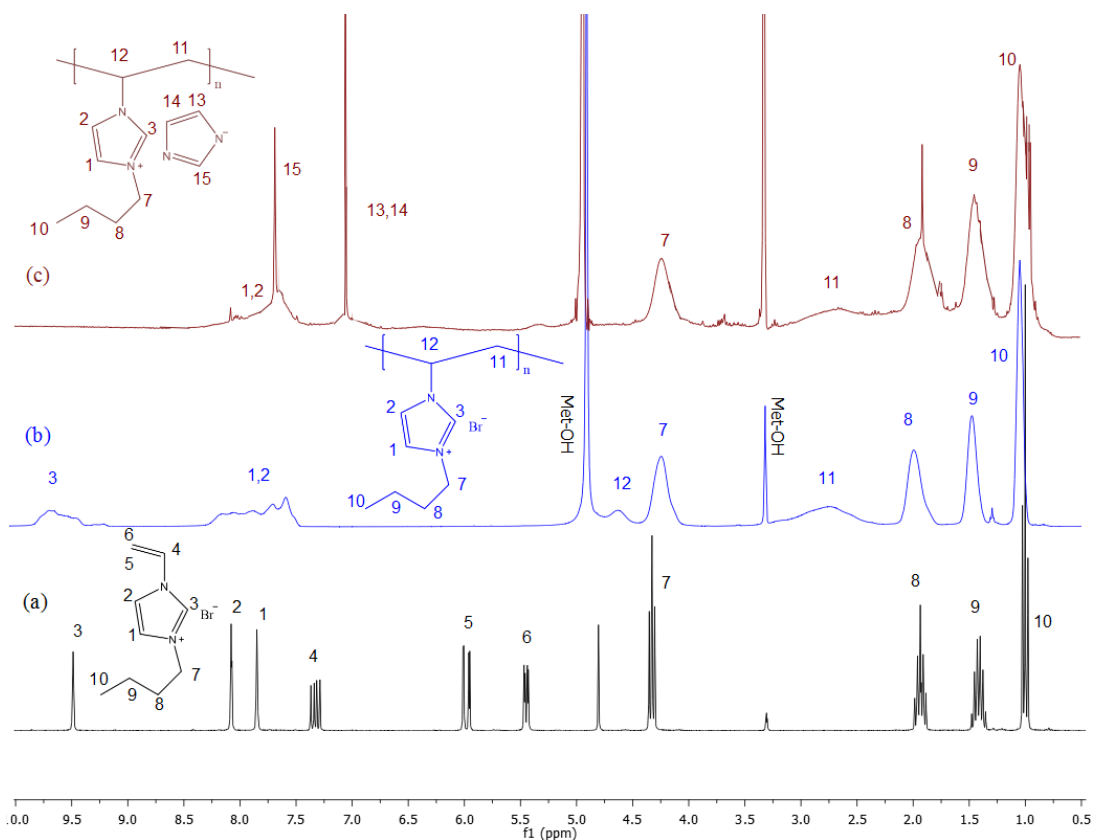


Figura B-5. RMN de ¹H de monómero (a) VIM4C[Br] y de los homopolímeros (b) P(VIM4C) [Br] y (c) P(VIM4C) [IM].

Viscosidad de los homopolímeros

La viscosimetría es un método que se usa con mucha frecuencia para conocer la masa molecular de los polímeros debido a que es una técnica que necesita poca instrumentación, es rápida y fácil (Seymour R.B., 1995). La viscosidad de una disolución diluida de un polímero depende de la naturaleza del polímero y el disolvente, la concentración de polímero, su masa molecular promedio y la distribución de la masa molecular, la temperatura y la velocidad de corte.

Las viscosidades se obtuvieron en un viscosímetro Ubbelohde adecuado para los tiempos de escurrimiento de las disoluciones poliméricas (Ubbelohde 0B, 1C ó 1B) Certificados por Cannon Instrument Company en el año de 2007). Estos viscosímetros proporcionan tiempos de flujo independientes del volumen del líquido en el bulbo de reserva. El control de temperatura se hizo en un baño de temperatura constante Cannon CT 500 serie III a 25 ± 0.1 °C. El disolvente que se usó para hacer la disolución de los polímeros fue agua destilada con 0.1 M de NaCl e isopropanol a una concentración polimérica (C) de 0.5 g/dL (0.005 g/mL). Cuando el intervalo de la concentración de la disolución polimérica esta

entre de 0.01 g/mL y 0.001 g/mL, las densidades del disolvente (ρ_0) y de la disolución (ρ) son en la práctica iguales: $\rho_0 \approx \rho$. Por lo tanto, la Ecuación B.1 se puede expresar en función de los tiempos de escurrimiento del disolvente (t_0) y de la disolución (t).

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{\rho \cdot t}{\rho_0 \cdot t_0} \quad (\text{B.1})$$

Dando como resultado la Ecuación B.2, conocida como viscosidad relativa (η_{rel}) o relación de viscosidades (del disolvente (η_0) y la disolución (η)).

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{t}{t_0} \quad (\text{B.2})$$

La viscosidad inherente (η_{inh}) se calculó de acuerdo con la Ecuación B.3:

$$\eta_{inh} = \frac{\ln(\eta_{rel})}{C} \quad (\text{B.3})$$

En una disolución muy diluida, la velocidad de corte es cercana a cero, se puede obtener el número de viscosidad limite o viscosidad intrínseca, η_{int} , (Zeng, Du, Xue, & Frisch, 2007) , la cual se encuentra descrita por la Ecuación B.4 y Ecuación B.5:

$$\eta_{int} = \lim_{C \rightarrow 0}(\eta_{red}) = \lim_{C \rightarrow 0}(\eta_{inh}) \quad (\text{B.4})$$

$$\eta_{int} = \lim_{C \rightarrow 0} \left[\frac{\ln \frac{t}{t_0}}{C} \right] \quad (\text{B.5})$$

La Figura B-6 muestra de manera gráfica cómo se determinó la viscosidad intrínseca de los homopolímeros. Se utilizaron 3 concentraciones de disoluciones poliméricas y se calculó la viscosidad inherente y reducida. Cada una de ellas se ajustó a una línea recta y la viscosidad intrínseca corresponde al valor en la intersección con el eje de las ordenadas, el cual fue de 1.49 dL/g. La viscosidad intrínseca, η_{int} , es una medida directa del volumen hidrodinámico de una molécula aislada del polímero y, por lo tanto, la viscosimetría puede proveer información directa sobre la conformación del polímero cuando las condiciones experimentales varían (temperatura, grado de ionización, naturaleza y concentración de solutos de moléculas pequeñas que se agregan a la disolución, etc.) (Molyneux, 2018).

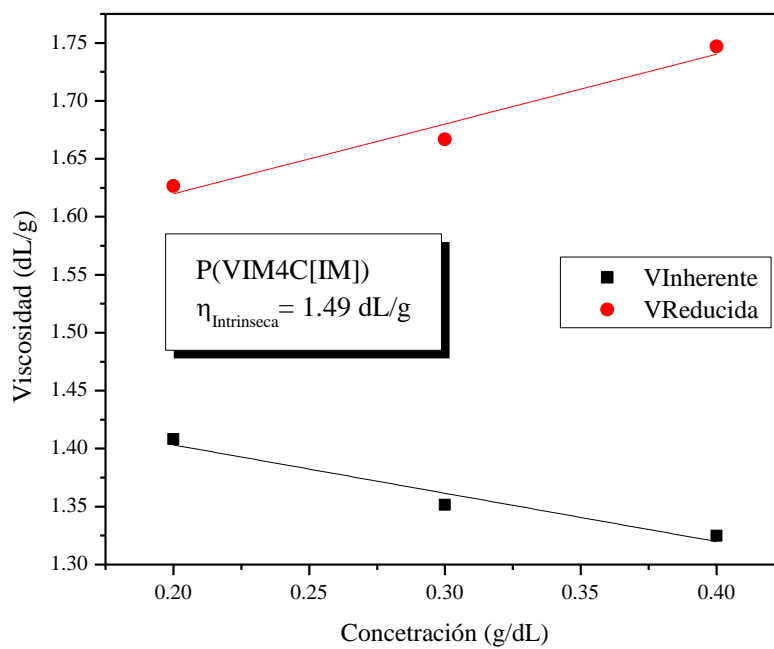


Figura B-6. Determinación de la viscosidad intrínseca.

ANEXO C: Isotermas de adsorción

A continuación, se presentan los diferentes ajustes de isotermas de adsorción a los datos experimentales del acero AISI 1018 en medio ácido.

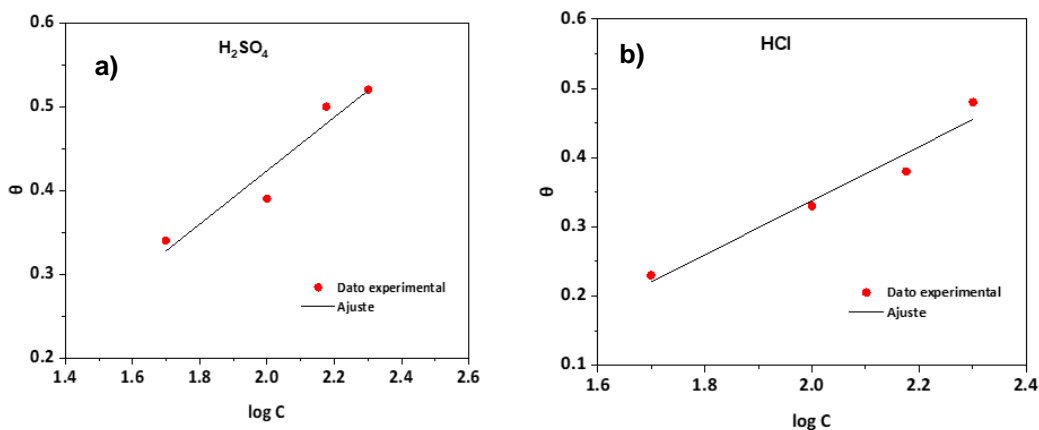


Figura C-1. Isoterma de adsorción de Frumkin en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM2C) [IM]: a) H₂SO₄ 1M y b) HCl 1M.

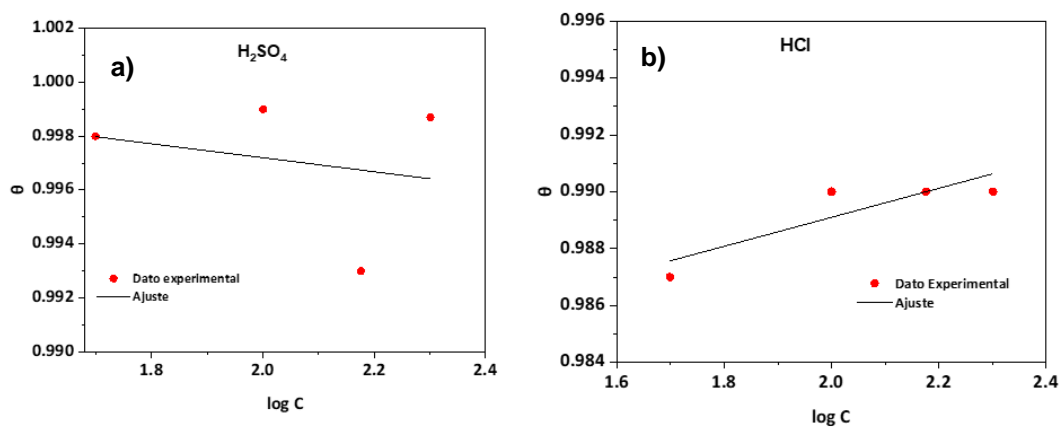


Figura C-2. Isoterma de adsorción de Frumkin en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM4C) [IM]: a) H₂SO₄ 1M y b) HCl 1M.

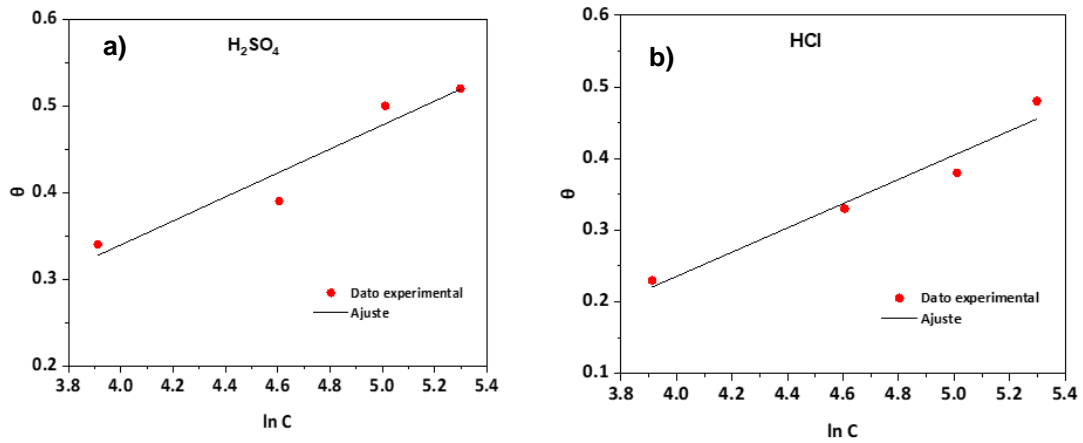


Figura C-3. Isotherma de adsorción de Temkin en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM2C) [IM]: a) H_2SO_4 1M y b) HCl 1M.

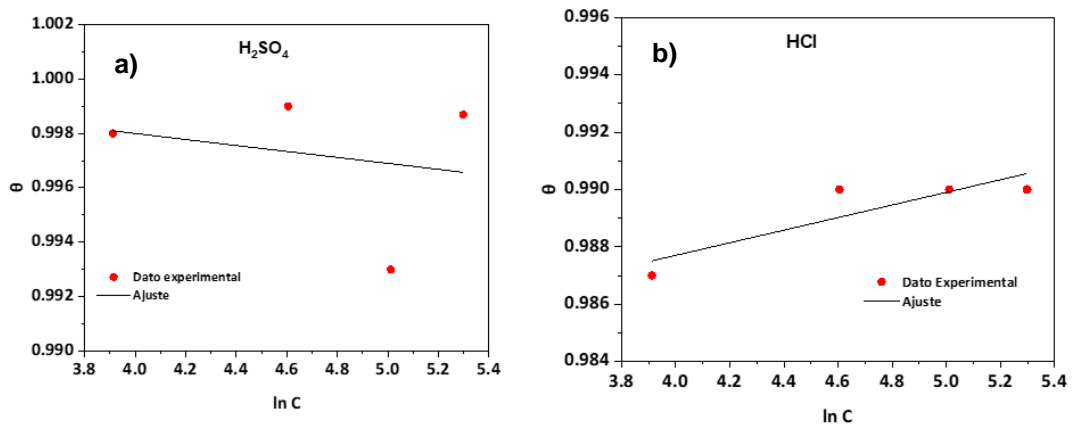


Figura C-4. Isotherma de adsorción de Temkin en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM4C) [IM]: a) H_2SO_4 1M y b) HCl 1M.

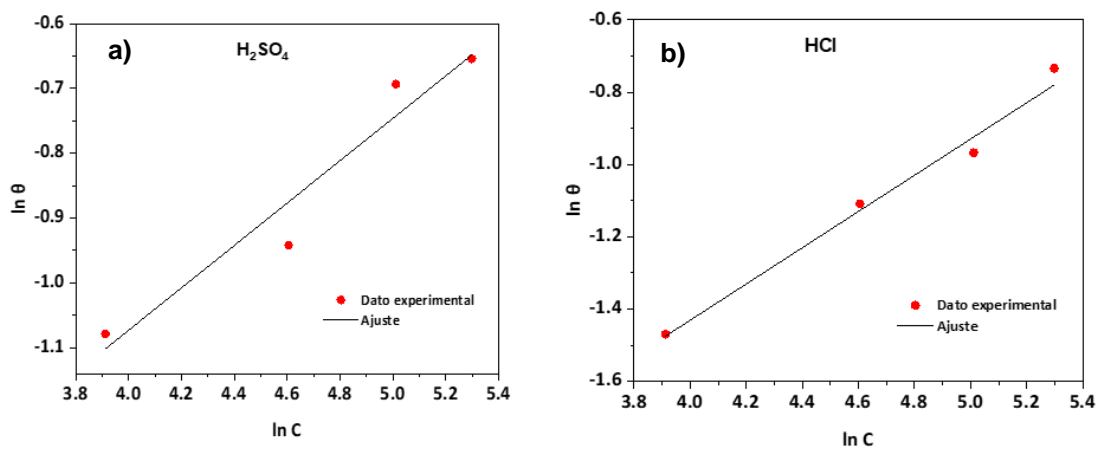


Figura C-5. Isotherma de adsorción de Freundlich en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM2C) [IM]: a) H_2SO_4 1M y b) HCl 1M.

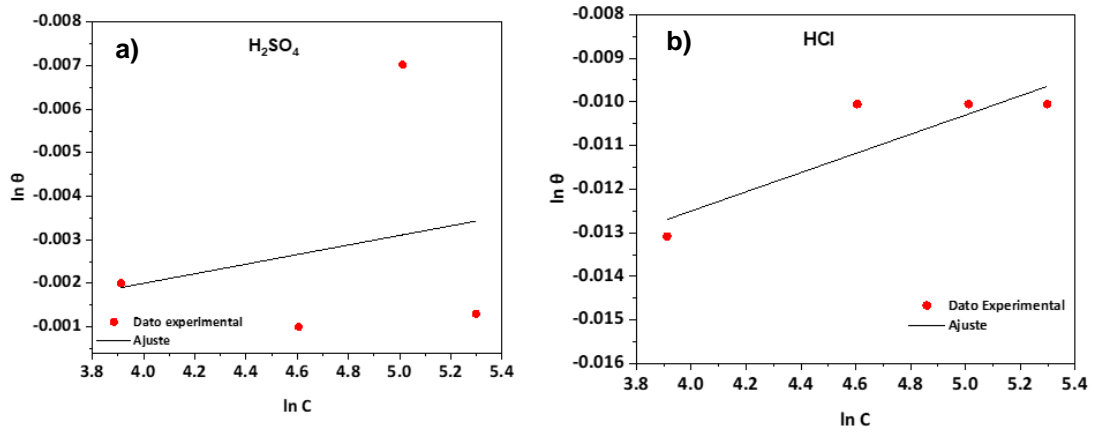


Figura C-6. Isoterma de adsorción de Freundlich en acero AISI 1018 en medio ácido y P(VIM4C) [1M]: a) H_2SO_4 1M y b) HCl 1M.