

GUÍA RÁPIDA PARA MEDIR LA CORROSIÓN

¹Evelin Gutiérrez, ²José A. Rodríguez

¹Departamento de Ingeniería Aeronáutica, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Boulevard Acceso a Tolcayuca 1009, Ex Hacienda San Javier, CP 43860 Tolcayuca, Hidalgo, México

²Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del conocimiento, km 4.5 Carretera Pachuca-Tulancingo, CP. 42184 Mineral de Reforma, Hidalgo, México

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión consiste en el ataque destructivo de un material debido a la reacción con su entorno. En el proceso de corrosión se desarrollan reacciones redox espontáneas en las que una especie metálica es convertida en un compuesto no deseado como resultado del ataque por alguna sustancia del medio. Desde el punto de vista de la termodinámica, la oxidación es un proceso bastante favorecido para un buen número de metales, incluso en el aire a temperatura ambiente.

La corrosión es un proceso destructivo para los metales cuando no se realiza la protección apropiada de estos. El hierro resulta de especial importancia cuando se trata el tema de corrosión, debido principalmente a las repercusiones económicas asociadas en los países industrializados. El proceso de corrosión de hierro se desarrolla en presencia de agua y oxígeno. Este proceso puede acelerarse por otros factores como el pH del medio, la presencia de sales, la temperatura, el contacto con metales más difíciles de oxidar y los esfuerzos a los que se somete el metal.

Para prevenir la corrosión se puede realizar una selección apropiada de materiales, considerando el tipo de entorno al cual serán expuestos y las condiciones a las cuales estarán sujetos [1].

La prevención de la corrosión del acero es un tema de gran interés entre los grupos de investigación. Una alternativa para proteger a los metales de entornos corrosivos consiste en el uso de *inhibidores*.

2. INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Los inhibidores de corrosión son sustancias químicas que se adicionan en pequeñas cantidades a ciertos entornos corrosivos, al actuar en la interfaz metal-solución disminuyen la velocidad de corrosión del metal expuesto [1].

Los inhibidores de corrosión son generalmente compuestos orgánicos heterocíclicos con buena tendencia a ser adsorbidos sobre los metales a proteger. La eficiencia de los inhibidores de corrosión está asociada a su estructura molecular, longitud de cadena alquílica (o volumen molecular), planaridad, presencia de pares de electrones libres en heteroátomos tales

como azufre (S), nitrógeno (N), oxígeno (O) y fósforo (P), así como también afinidad por la superficie metálica a proteger. En los inhibidores de corrosión es deseable la presencia de electrones pi ó la presencia de anillos aromáticos. Aunque en los estudios realizados siempre es necesario tomar en cuenta que la eficacia de los inhibidores de corrosión es alterada por su concentración, el pH, temperatura y rugosidad del medio, así como del tiempo de contacto con la superficie a proteger.

La unión de los inhibidores de corrosión a la superficie metálica o de óxido metálico puede ocurrir a través de quimisorción, fisisorción, complejación o precipitación [2].

Las observaciones realizadas por diferentes investigadores han demostrado que en presencia de heteroátomos en la estructura del inhibidor de corrosión, su eficiencia sigue la tendencia: O < N < S < P, por supuesto, las eficiencias están determinadas por otras características en las moléculas como se comentó.

Existe gran interés en determinar las características moleculares de un inhibidor de corrosión altamente eficiente. Esto permitiría identificar especies útiles para proteger a los metales considerando el costo, la toxicidad, disponibilidad y sus efectos en el cuidado ambiental.

La Tabla 1 muestra algunos ejemplos de especies utilizadas como inhibidoras de corrosión. Los ejemplos se han clasificado según un heteroátomo característico en su estructura molecular.

Tabla 1. Algunas especies utilizadas en el análisis de prevención de la corrosión.

Heteroátomo	Ejemplo
Nitrógeno (N)	Imidazoles Benzimidazoles Aminas Bases de Schiff Alcaloides
Azufre (S)	Sulfonamidas Sulfonatos Tioles
Oxígeno (O)	Benzoatos Aldehídos Derivados de indanona
Fósforo (P)	Derivados de fosfonato

3. EFICIENCIA DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

La medición de la eficiencia de inhibición de la corrosión (EI) se realiza comparando la corrosión antes y después de ser adicionado el inhibidor al medio corrosivo (Ecuación 1).

$$EI(\%) = \frac{(CR_u - CR_i)}{CR_u} \times 100 \quad (1)$$

donde CR_u es la velocidad de corrosión del sistema no inhibido y CR_i es la velocidad de corrosión del sistema inhibido. Los tiempos a los cuales se determina el efecto de inhibición pueden variar desde horas hasta algunos días según la técnica utilizada en análisis.

Las técnicas empleadas para medir el efecto de los inhibidores de corrosión incluyen: pérdida de peso (WL), polarización potenciodinámica (PP) y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). A continuación, se describen algunas generalidades de las técnicas y observaciones hechas por los investigadores. El objetivo de los siguientes párrafos es brindar un panorama general al lector sobre la corrosión y el análisis aplicado en el uso de inhibidores de corrosión, a través de las experiencias reportadas por diferentes grupos de investigación

3.1 ANÁLISIS DE EFICIENCIA POR PÉRDIDA DE PESO

Las mediciones de pérdida de peso se utilizan para comparar el peso de especímenes de prueba cuando son expuestos a un entorno corrosivo modificado y no modificado por la adición de un inhibidor de corrosión. En los diferentes estudios se establecen los tiempos de exposición del metal al medio corrosivo, generalmente el estudio comparativo se realiza después de varias horas de corrosión del metal (incluso días). La velocidad de corrosión se determina como sigue (ecuación 2) [3]:

$$w_{corr} = \frac{(m_i - m_f)}{S \cdot t} \quad (2)$$

Donde m_i y m_f son el peso (mg) de los especímenes antes y después de la inmersión en el medio corrosivo, respectivamente, S es la superficie del metal expuesto (cm^2) y t es el tiempo de exposición (h). Por lo tanto, la velocidad de corrosión se expresa en $mg/cm^2 \cdot h$.

3.2 ANÁLISIS DE EFICIENCIA POR ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS)

La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) es un método basado en el uso de corriente alterna (CA) para obtener información sobre los mecanismos de corrosión y determinar la eficiencia en su control. La impedancia representa la proporcionalidad entre el voltaje y la corriente. En EIS la respuesta de un electrodo

se interpreta con base en modelos de circuitos de la interfaz electrodo-electrolito, denominados *circuitos equivalentes*. Los circuitos eléctricos simulados en la EIS están compuestos por componentes como resistencias (R), capacitancias (C) e inductancias (L). Dichos elementos se combinan de tal manera que permitan reproducir los espectros de impedancia medidos. En el análisis mediante EIS se emplean tres tipos de gráficos: los diagramas de Nyquist, que muestran el gráfico de la impedancia imaginaria (Z'') vs la impedancia real (Z') y los diagramas de Bode que muestran la magnitud de la impedancia vs el logaritmo de la frecuencia y el ángulo de fase vs logaritmo de la frecuencia.

La Figura 1 se representan algunos elementos característicos de un diagrama de Nyquist. R_Ω , representa la resistencia del electrolito, R_p es la resistencia a la polarización, C corresponde a la capacitancia, que en los casos más simples se relaciona con la capacitancia de la doble capa (C_{dl}), ω es la frecuencia angular, que se relaciona con la frecuencia, f , de acuerdo con $\omega = 2\pi f$, donde f , es la frecuencia en la cual la parte imaginaria de la impedancia es mayor.

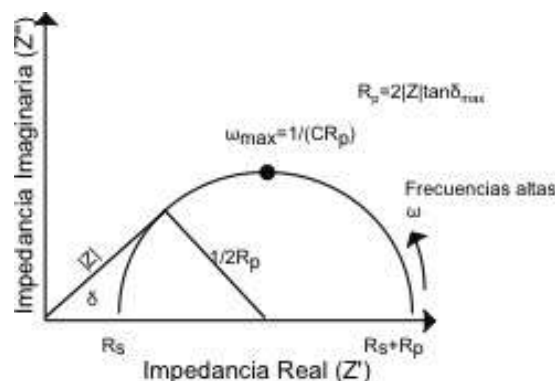


Figura 1. Elementos del diagrama de Nyquist [4]

En la Figura 2, se incluye la representación de tres diagramas de Nyquist básicos y los circuitos equivalentes que pueden ser utilizados para analizar el espectro de impedancia. Cuando el control por difusión es evidente aparece un elemento llamado impedancia de Warburg (W).

A continuación, se describen de forma breve algunas observaciones de diferentes grupos de investigación respecto al desempeño de inhibidores de corrosión, obtenidas a partir de datos de EIS. En las imágenes se ha representado el comportamiento de algunos inhibidores descritos en la literatura, con la finalidad de aportar un panorama general al lector, sin embargo, le recordamos al lector que los diagramas obtenidos mediante EIS deben ser analizados tomando en cuenta los circuitos equivalentes para poder determinar los elementos que se involucran en el proceso de corrosión y poder dilucidar apropiadamente el proceso corrosivo.

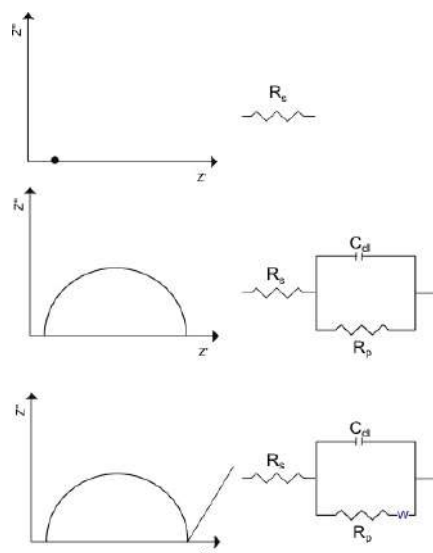


Figura 2. Circuitos equivalentes básicos de la EIS.

En la Figura 3 se muestran el comportamiento de un blanco (HCl) y un inhibidor de corrosión en dos concentraciones, además del circuito equivalente que describe apropiadamente el proceso [5].

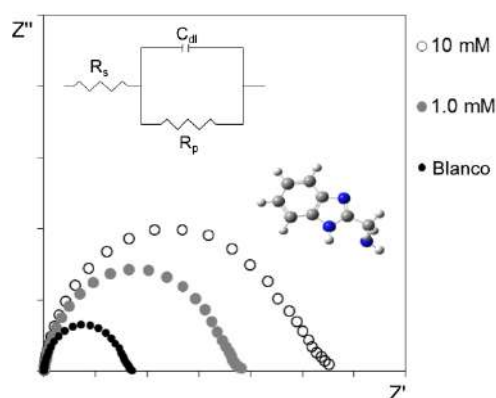


Figura 3. Diagramas de Nyquist del análisis de benzimidazol

En el circuito equivalente que corresponde a la Figura 3, la representación en paralelo de los elementos R_p y C_{dl} representan la interfaz de corrosión, mientras el elemento R_s caracteriza a la resistencia de la solución y el producto de corrosión. La presencia de un único semicírculo es característico cuando el único proceso que ocurre es la transferencia de carga, es decir el proceso de corrosión está limitado principalmente por el transporte de masa de especies químicas activas a la interfaz metal-solución. En todos los casos se observa que no se trata de semicircunferencias perfectas, comportamiento que se dice es característico de electrodos sólidos y asociado a la distribución de frecuencias debido a fenómenos físicos como rugosidad y falta de homogeneidad en las superficies durante la corrosión, presencia de impurezas, límites de grano,

distribución de sitios activos y formación de capas porosas [6].

Como puede verse en la Figura 3 la presencia de un inhibidor de corrosión incrementa los valores de resistencia a la transferencia de carga R_{ct} , donde R_{ct} se puede calcular como $R_{ct}=R_p-R_s$. La presencia de los inhibidores de corrosión y el incremento en su concentración causa una disminución en los valores de C_{dl} . Los comportamientos descritos son resultado de la formación de la película protectora en la interfaz metal/solución y del aumento del espesor de la doble capa electrónica, respectivamente [7].

La ecuación correspondiente al cálculo del valor de C_{dl} es la siguiente:

$$C_{dl} = \frac{1}{2\pi f_{max} R_p} \quad (3)$$

En el análisis de inhibidores de corrosión derivados de tiourea (TU) realizado por Ozcan et al. [8] destacaron la presencia de elongaciones en el diagrama de Nyquist obtenido por la adición de metiltiourea (MTU), así como, dos constantes características en el diagrama de Nyquist derivado del análisis de feniltiourea (PTU), la primer constante de tiempo (altas frecuencias) en el diagrama de Nyquist de PTU fue atribuida a la adsorción del inhibidor en la superficie metálica, mientras que la segunda constante de tiempo, así como las elongaciones observadas se asociaron a todo tipo de especies acumuladas. En el caso de MTU y PTU el efecto también fue atribuido a su tamaño con respecto a TU. La Figura 4 describe un comportamiento general de las observaciones de Ozcan et al. [8].

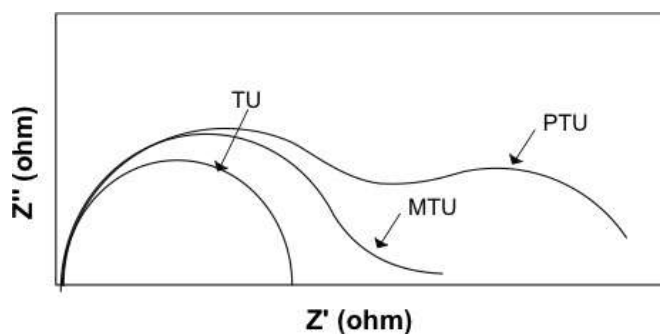


Figura 4. Comportamientos de los inhibidores derivados de TU [8].

Aouniti et al. [9] realizaron el análisis de aminoácidos como inhibidores de corrosión de hierro, los diagramas de Nyquist obtenidos en HCl y HCl adicionado con metionina mostraron bucles capacitivos bien definidos a altas frecuencias, y bucles inductivos a bajas frecuencias, relacionados a la disolución activa del metal. Una representación de sus observaciones se muestra en la Figura 5.

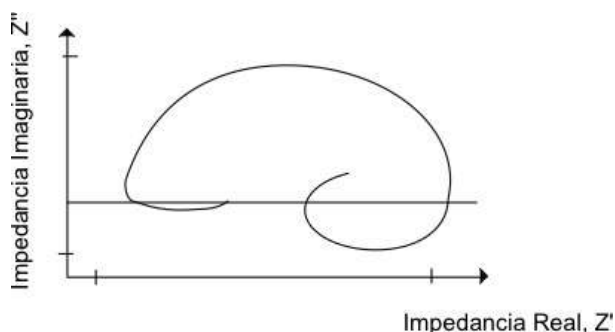


Figura 5. Representación de los diagramas obtenidos por Aouniti et al. [9]

En el análisis oxadiazoles como inhibidores de corrosión se observó que algunas especies estimulan el proceso de corrosión [10]. Dicho comportamiento se puede verificar por el incremento de los valores de C_{dl} . De acuerdo con el grupo de investigación de Lagrenée et al. [10] la aceleración de la corrosión puede asociarse a la disminución del sobrepotencial para el proceso catódico, a la estimulación de las reacciones electroquímicas parciales involucradas en la corrosión y a la participación el inhibidor en la disolución del metal.

Li et al. [11] investigaron la protección del aluminio expuesto a un medio de HCl. La investigación consistió en el uso de compuestos derivados de oxima, $RR'C=NOH$, donde R es un residuo orgánico y R' puede ser un hidrógeno o un grupo orgánico. En los diagramas de Nyquist obtenidos observaron un bucle capacitivo a altas frecuencias seguido por un bucle inductivo a valores de bajas frecuencias. El bucle inductivo a bajas frecuencias se atribuye al aluminio en HCl y a la presencia de los compuestos orgánicos encargados de su protección, mientras que el bucle capacitivo observado a altas frecuencias se relacionó con la capa de óxido formada en el aluminio. En la Figura 6 muestra el circuito equivalente asociado a sus observaciones. Como puede verse el circuito incluye varios elementos para poder representar apropiadamente un proceso más complejo.

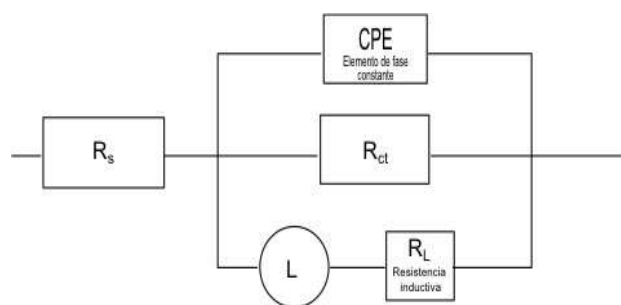


Figura 6. Circuito equivalente propuesto por Li et al. [11].

En el análisis de protección vs corrosión de acero dulce en ácido clorhídrico mediante el uso de ceftazidima, Singh et al. [12] atribuyeron la aparición de un bucle inductivo a bajas frecuencias, a la adsorción de las

especies Cl^- y H^+ . El diagrama equivalente que propusieron para su evaluación se muestra en la Figura 7.

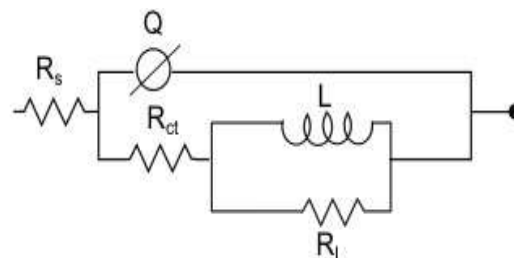


Figura 7. Circuito equivalente propuesto por Singh et al. [12] en la protección de acero dulce.

En la Figura 8 se muestran las características de los diagramas de Bode. Los incrementos del ángulo de fase en los diagramas de Bode proporcionan una idea general de la prevención de la corrosión. Los ángulos de fase más negativos se asocian a un incremento del comportamiento capacitivo electroquímico. La depresión de los ángulos de fase a frecuencias de relajación con la disminución de la concentración de las especies inhibitoras caracteriza a la disminución de la respuesta capacitiva del sistema, lo que se atribuye a una mayor actividad en el proceso de corrosión debido a la baja concentración del inhibidor [12]. Ehteshamzadeh et al. [6] describen en su artículo los elementos del diagrama de Bode ($\log Z$ vs \log frecuencia). Los diagramas de bode muestran tres regiones en ausencia del inhibidor. En la región de altas frecuencias el valor de $\log |Z|$ tiende a cero y el valor de ángulo de fase tiende hacia 0° . Esa respuesta corresponde al comportamiento resistivo de la solución. En la región de frecuencias medias, se puede observar una relación lineal entre $\log |Z|$ vs \log frecuencia, con una pendiente cercana a -1 y una tendencia del ángulo de fase a -90° . Este tipo de respuesta se asocia al comportamiento capacitivo. Una pendiente igual a -1 y un ángulo de fase de -90° se atribuye a un comportamiento capacitivo ideal, que en realidad no ocurre en los sistemas electroquímicos. En la región de bajas frecuencias el comportamiento resistivo del electrodo incrementa. Las desviaciones de -1 de la pendiente de $\log |Z|$ vs $\log f$ se atribuyen a la dispersión de frecuencias de la impedancia interfacial, comportamiento anómalo asociado a la falta de homogeneidad en la superficie del electrodo, resultado de la rugosidad superficial y/o fenómenos interfaciales [13]. Los incrementos en módulo de impedancia indican un mejor desempeño de los inhibidores de corrosión. Los estudios de varias concentraciones de inhibidores de corrosión muestran que el aumento de la concentración del inhibidor incrementa también el valor de modulo de impedancia [14].

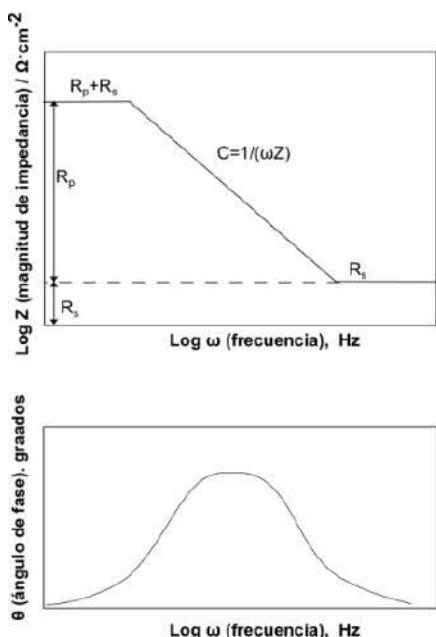


Figura 8. Características de los diagramas de Bode.

3.3 ANÁLISIS DE EFICIENCIA POR POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICA

La polarización potenciodinámica es una técnica muy utilizada en el análisis de protección de metales mediante el uso de inhibidores de corrosión. Para iniciar con el análisis de corrosión mediante esta técnica se recomienda sumergir al electrodo de prueba a potencial de circuito abierto (OCP, por sus siglas en inglés) durante por lo menos 30 min ó hasta 2 h (de acuerdo a su comportamiento) [3]. En la polarización potenciodinámica, el estudio del comportamiento electroquímico de la superficie metálica de interés se realiza mediante el análisis de las curvas de polarización catódica y anódica, obtenidas variando el potencial de valores negativos hacia valores positivos vs el potencial de corrosión a una velocidad establecida por el investigador. En el análisis de corrosión por polarización potenciodinámica se emplean las curvas de Tafel (Figura 9), que permiten determinar parámetros como: potencial de corrosión (E_{corr}) y densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), ambos obtenidos por extrapolación de las pendientes de Tafel catódica y anódica (β_c y β_a). El grado de cobertura de la superficie (θ) y el porcentaje de eficiencia de inhibición ($\eta\%$) de la corrosión se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$\theta = \frac{i_{corr}^0 - i_{corr}}{i_{corr}^0} \quad (4)$$

$$\eta\% = \theta \times 100 \quad (5)$$

Donde i_{corr}^0 y i_{corr} son las densidades de corriente de corrosión en ausencia y presencia de los inhibidores, respectivamente [15]. En la Figura 9 se puede ver un diagrama de polarización hipotético para un sistema con ramas catódica y anódica, donde se pueden

observar los parámetros clave asociados al análisis de corrosión. Entre los prerrequisitos para poder aplicar el método de extrapolación de Tafel se debe considerar que la gráfica de E vs $\log i$ debe tener por lo menos una línea recta bien definida. Además, para una estimación de i_{corr} mediante el método de Tafel las regiones lineales deben extenderse aproximadamente una década en el eje $\log i$ [14].

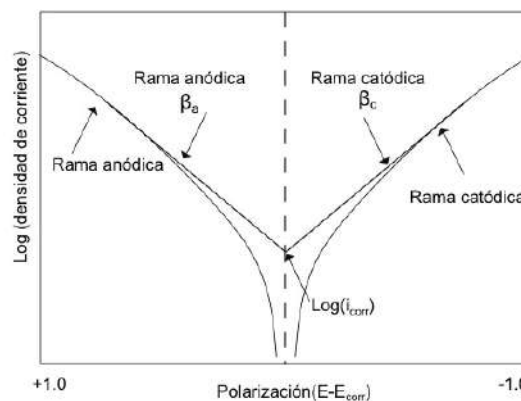


Figura 9. Elementos básicos de las curvas de Tafel

Las reacciones del proceso corrosivo se pueden describir de la siguiente manera, la reacción de oxidación asociada a la disolución del metal, $M \rightarrow M^{z+} + ze^-$ y la reacción de reducción $R^{n+} + ne^- \rightarrow R$. En una solución acuosa aireada neutra o básica, la reacción de reducción puede ser $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$, mientras en una solución de ácido en ausencia de aire, la reacción de reducción puede ser $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$.

En el análisis de la corrosión se suele hablar principalmente del control catódico, anódico y de los inhibidores mixtos, que afectan ambos procesos (Figura 10). También se puede clasificar a inhibidores de corrosión de acuerdo con los desplazamientos en el E_{corr} . Si el valor de E_{corr} en la solución inhibida (comparada con los E_{corr} de la solución no inhibida) es mayor a 85 mV, el inhibidor de corrosión se puede clasificar como catódico o anódico, mientras que desplazamientos de E_{corr} menores a 85 mV permiten clasificar a los inhibidores como inhibidores de corrosión de tipo mixto [3].

En los siguientes párrafos se describen algunas de las observaciones realizadas en el análisis de corrosión mediante el uso de curvas de Tafel. Las figuras mostradas son una representación de las obtenidas por los investigadores citados en los diferentes sitios de este documento.

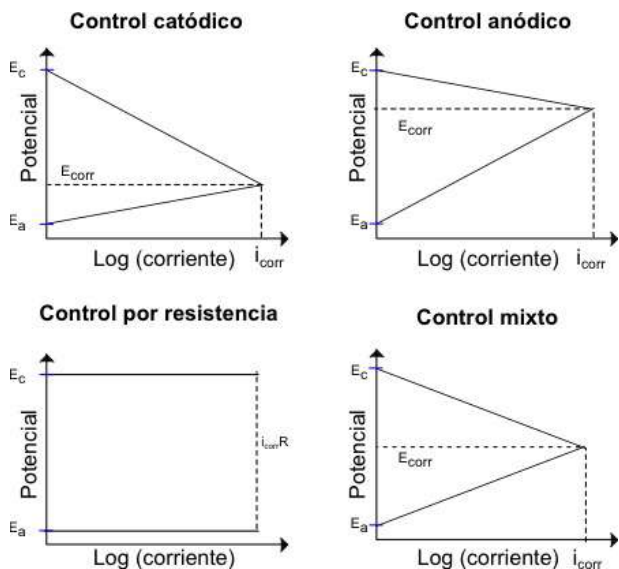


Figura 10. Tipos de control de corrosión [16].

Se ha observado que el uso de inhibidores de corrosión y el incremento de su concentración causa la disminución considerable de la i_{corr} [11,15,17]. En el análisis de semicarbazonas y tiosemicarbazonas (Figura 11) para la protección de acero al carbón se observó la disminución de las densidades de corriente catódica y anódica y el desplazamiento del E_{corr} en dirección anódica. Los inhibidores utilizados en el estudio reducen la disolución anódica del metal y reducen la velocidad de la evolución catódica del hidrógeno [14].

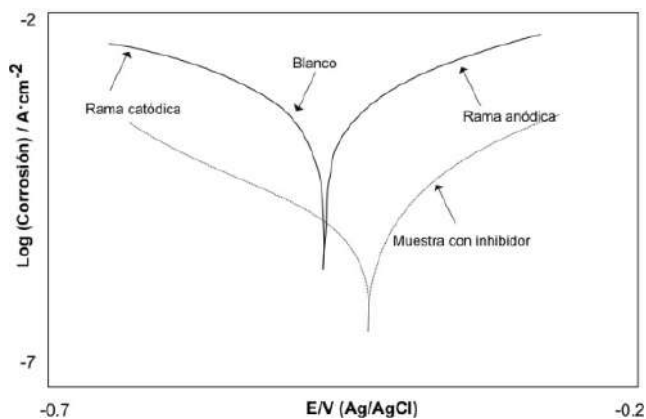


Figura 11. Blanco y el efecto al adicionar un inhibidor.

En el estudio de fosfonatos para la protección del acero realizado por Benabdellah et al. [18] observaron que los fosfonatos empleados disminuyen la densidad de corriente catódica conforme incrementa la concentración del inhibidor, mientras la pendiente permanece casi constante. En el dominio anódico las eficiencias de inhibición son prácticamente las mismas, lo que indica que los fosfonatos evaluados se comportan como inhibidores catódicos.

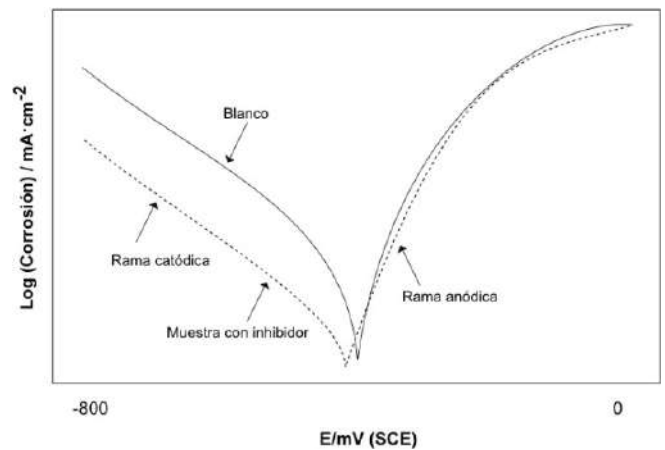


Figura 12. Descripción del comportamiento de un blanco y una muestra inhibida.

Ashassi et al. [19] describieron un incremento repentino en la corriente de corrosión en la región anódica corriente-potencial que atribuyen a la disolución de la superficie de acero, conduciendo a la desorción del inhibidor de la superficie del electrodo. Las bases de Schiff utilizadas en el estudio afectan tanto a la reacción catódica como a la reacción anódica, por lo que dichos compuestos se consideran inhibidores mixtos. Saady et al. [3] en el estudio de derivados de indanona observaron incrementos de corriente significativos en potenciales de la zona anódica, también atribuidos a la desorción del inhibidor de corrosión de las zonas anódicas de la superficie metálica.

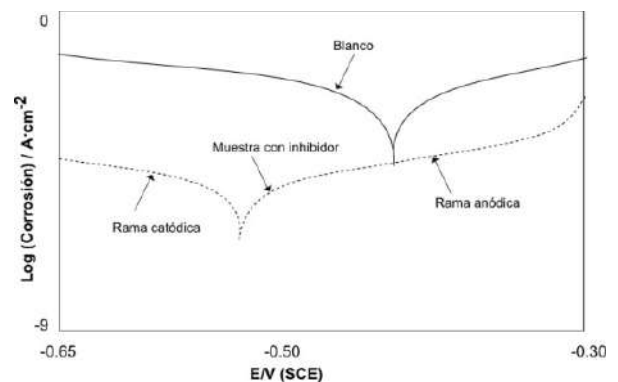


Figura 13. Descripción del comportamiento de un blanco y una muestra inhibida [18]

4. CONCLUSIONES

La corrosión es un proceso de importancia para países industrializados, ya que representa una inversión importante dado sus efectos. Es por ello y otras razones que se considera un tema de investigación interesante y actual. El objetivo de este artículo es aportar una primera aproximación al lector interesado en el análisis de la corrosión, mediante información relevante de las experiencias reportadas por diferentes investigadores y especialistas en el tema. A pesar de que no se abordó el

análisis de las ecuaciones matemáticas involucradas en las técnicas de espectroscopía de impedancia electroquímica y polarización potenciodinámica le recordamos que sin lugar a dudas el análisis matemático es un factor clave para comprender los fenómenos que ocurren en la interfaz electrodo-electrolito.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Roberge, P. R. (2019). Handbook of corrosion engineering. McGraw-Hill Education.
2. Lukovits, I., Kalman, E., & Zucchi, F. (2001). Corrosion inhibitors—correlation between electronic structure and efficiency. *Corrosion*, 57(1), 3-8.
3. Saady, A., El-Hajjaji, F., Taleb, M., Alaoui, K. I., El Biache, A., Mahfoud, A., ... & Quraishi, M. A. (2018). Experimental and theoretical tools for corrosion inhibition study of mild steel in aqueous hydrochloric acid solution by new indanones derivatives. *Materials discovery*, 12, 30-42.
4. Mansfeld, F. (1981). Recording and analysis of AC impedance data for corrosion studies. *Corrosion*, 37(5), 301-307.
5. Gutiérrez, E., Rodríguez, J. A., Cruz-Borbolla, J., Alvarado-Rodríguez, J. G., & Thangarasu, P. (2016). Development of a predictive model for corrosion inhibition of carbon steel by imidazole and benzimidazole derivatives. *Corrosion Science*, 108, 23-35.
6. Ehteshamzadeh, M., Jafari, A. H., Naderi, E., ... & Hosseini, M. G. (2009). Effect of carbon steel microstructures and molecular structure of two new Schiff base compounds on inhibition performance in 1 M HCl solution by EIS. *Materials Chemistry and Physics*, 113, 986-993.
7. Shukla, S. K., & Quraishi, M. A. (2009). Cefotaxime sodium: a new and efficient corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution. *Corrosion Science*, 51(5), 1007-1011.
8. Özcan, M., Dehri, İ. L. Y. A. S., & Erbil, M. (2004). Organic sulphur-containing compounds as corrosion inhibitors for mild steel in acidic media: correlation between inhibition efficiency and chemical structure. *Applied surface science*, 236(1-4), 155-164.
9. Aouniti, A. K. K. F., Khaled, K. F., & Hammouti, B. (2013). Correlation between inhibition efficiency and chemical structure of some amino acids on the corrosion of armco iron in molar HCl. *Int. J. Electrochem. Sci*, 8, 5925-5943.
10. Lagrenée, M., Mernari, B., Chaibi, N., Traisnel, M., Vezin, H., & Bentiss, F. (2001). Investigation of the inhibitive effect of substituted oxadiazoles on the corrosion of mild steel in HCl medium. *Corrosion science*, 43(5), 951-962.
11. Li, X., Deng, S., & Xie, X. (2014). Experimental and theoretical study on corrosion inhibition of oxime compounds for aluminium in HCl solution. *Corrosion Science*, 81, 162-175.
12. Singh, A. K., Shukla, S. K., Singh, M., & Quraishi, M. A. (2011). Inhibitive effect of ceftazidime on corrosion of mild steel in hydrochloric acid solution. *Materials Chemistry and Physics*, 129(1-2), 68-76.
13. Kissi, M., Bouklah, M., Hammouti, B., & Benkaddour, M. (2006). Establishment of equivalent circuits from electrochemical impedance spectroscopy study of corrosion inhibition of steel by pyrazine in sulphuric acidic solution. *Applied surface science*, 252(12), 4190-4197.
14. Goulart, C. M., Esteves-Souza, A., Martinez-Huitle, C. A., Rodrigues, C. J. F., Maciel, M. A. M., & Echevarria, A. (2013). Experimental and theoretical evaluation of semicarbazones and thiosemicarbazones as organic corrosion inhibitors. *Corrosion Science*, 67, 281-291.
15. Aljourani, J., Raeissi, K., & Golozar, M. A. (2009). Benzimidazole and its derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in 1M HCl solution. *Corrosion science*, 51(8), 1836-1843.
16. Revie, R. W. (2008). Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering. John Wiley & Sons.
17. Benali, O., Larabi, L., Traisnel, M., Gengembre, L., & Harek, Y. (2007). Electrochemical, theoretical and XPS studies of 2-mercapto-1-methylimidazole adsorption on carbon steel in 1 M HClO₄. *Applied surface science*, 253(14), 6130-6139.
18. Benabdellah, M., Dafali, A., Hammouti, B., Aouniti, A., Rhomari, M., Raada, A., ... & Robin, J. J. (2007). The role of phosphonate derivatives on the corrosion inhibition of steel in HCl media. *Chemical Engineering Communications*, 194(10), 1328-1341.
19. Ashassi-Sorkhabi, H., Shaabani, B., & Seifzadeh, D. (2005). Corrosion inhibition of mild steel by some Schiff base compounds in hydrochloric acid. *Applied Surface Science*, 239(2), 154-164.