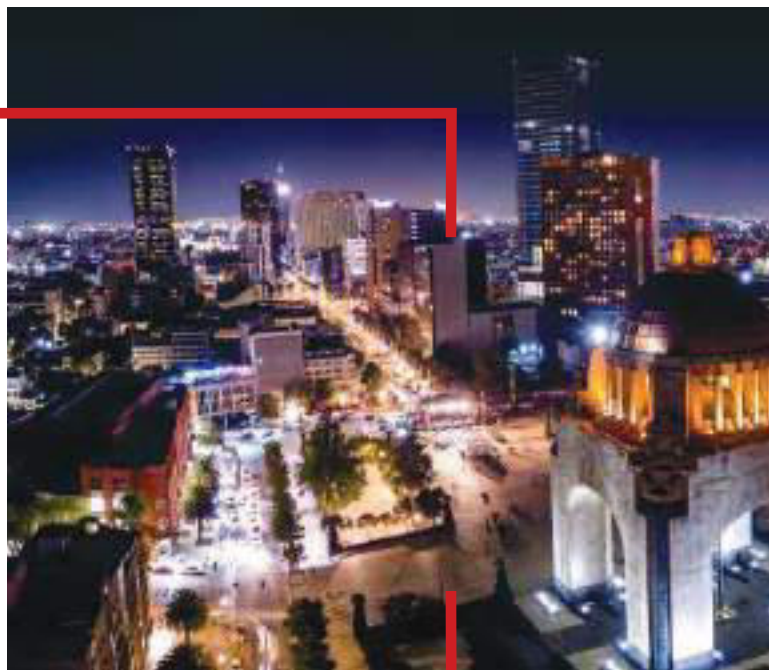




Sociedad Mexicana  
de Electroquímica

# Memorias del Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica



ISSN 2448-6191



**XL CONGRESO NACIONAL DE LA SOCIEDAD  
MEXICANA DE ELECTROQUÍMICA 2025**

18th Meeting of the Mexican Section of the  
Electrochemical Society  
CDMX

Ciudad de México, México  
Septiembre 2025

## Reserva de Derechos

Este libro incluye artículos clasificados dentro de las áreas de las ciencias electroquímicas de: Electroquímica Analítica (EA), Ingeniería Electroquímica y Aplicaciones Tecnológicas (IE), Electroquímica Molecular y Bioelectroquímica (EMB), Electroquímica Ambiental (EAM), Corrosión y Tratamientos de Superficies (CTS), Conversión y Almacenamiento de Energía (CAE), Educación Electroquímica (EE).

Los autores participantes son responsables directos del contenido de sus artículos y asumen toda responsabilidad por la publicación de estos, motivo por el cual el compilador de la memoria se declara exento de toda responsabilidad relacionada con el contenido de los mismos.

Derechos reservados

Septiembre, 2025

D.R. ©Publicaciones SMEQ

Barranca del Muerto 26, Col. Crédito Constructor

Alcaldía Benito Juárez, 03940, Ciudad de México, México

[www.SMEQ.org.mx/Memorias/XLSMEQ.pdf](http://www.SMEQ.org.mx/Memorias/XLSMEQ.pdf)

Ciudad de México, México – septiembre 2025



Reservados todos los derechos. Ni todo el material ni parte de él pueden ser reproducidos, archivados o transmitidos en forma ninguna o mediante sistemas electrónico, mecánicos de fotocopia, memoria o cualquier otro sin permiso escrito de los titulares.

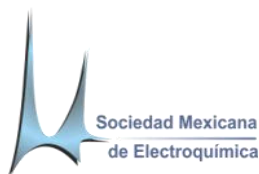
Memorias del Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica Vol.9, No. 1, 2025 - Julio 2026, es una publicación anual de la Sociedad Mexicana de electroquímica A.C. editada a través de Publicaciones SMEQ por la Sociedad Mexicana de Electroquímica, Barranca del Muerto 26, Col. Crédito Constructor. Alcaldía Benito Juárez, 03940, Ciudad de México, México [www.smeq.org.mx](http://www.smeq.org.mx). Reserva de Derecho al Uso Exclusivo **04-2017-072515390400- 203**, otorgada por el Instituto Nacional del Derecho de Autor e **ISSN 2448-6191**.

Responsable de la última actualización de este Número en la Sociedad Mexicana de Electroquímica, Dr. Facundo Almeraya Calderón, Barranca del Muerto 26, Col. Crédito Constructor. Alcaldía Benito Juárez, 03940, Ciudad de México, México. Fecha de última modificación, 20 de Octubre 2024.

Los autores participantes son responsables directos del contenido de sus artículos y asumen toda responsabilidad por la publicación de estos, motivo por el cual, los compiladores y recopiladores de la memoria se declaran exentos de toda responsabilidad relacionada con el contenido de los mismos.

Liga de acceso:

<http://www.SMEQ.org.mx/Memorias/XLSMEQ.pdf>



XL CONGRESO NACIONAL DE LA SOCIEDAD  
MEXICANA DE ELECTROQUÍMICA 2025

58th Meeting of the Mexican Section of the  
Electrochemical Society



## ESTUDIO DE LA CORROSIÓN EN ACEROS: FUNDAMENTOS Y EVALUACIÓN DESDE LA PERSPECTIVA DE LA ESPECTROSCOPIA DE LA IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS)

H. Herrera Hernández<sup>1\*</sup>, C.O. González Morán<sup>2</sup>, I.Z. Ramírez León<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Investigación en Electroquímica y Corrosión de Materiales Industriales,  
Universidad Autónoma del Estado de México, Blvd. Universitario s/n, Atizapán de Zaragoza,  
Estado de México 54500, México.

<sup>2</sup>Laboratorio de Investigación de Materiales y Procesos Inteligentes, Universidad Autónoma del  
Estado de México, Blvd. Universitario s/n, Atizapán de Zaragoza 54500, Mexico.

E-mail: [hherrerah@uaemex.mx](mailto:hherrerah@uaemex.mx)

### RESUMEN

La impedancia ha demostrado ser una herramienta versátil durante más de dos décadas, ampliamente utilizada en la electroquímica y física, para estudiar materiales conductores y sus interfaces mediante la aplicación de estímulos externos de voltaje (V) o corriente (I). En años recientes, su uso se ha extendido al campo de la biotecnología para el diagnóstico microbiológico. No obstante, su mayor relevancia se encuentra en el área de la corrosión, donde la Espectroscopia de impedancia Electroquímica (EIS) se ha consolidado como una de las metodologías más eficaces para el control, evaluación y monitoreo de este fenómeno. La corrosión constituye un problema de gran impacto económico y social, al generar altos costos de mantenimiento, contaminación y sustitución de estructuras metálicas, especialmente de acero. Este proceso se origina por la interacción química con medios acuosos y ocurre en la interfase metal/electrolito a través de mecanismos de transferencia de carga y difusión iónica. Comprender estos mecanismos resulta fundamental para diseñar estrategias de control y prolongar la vida útil de los materiales en servicio en ambientes agresivos. La EIS permite caracterizar los procesos electroquímicos asociados a la corrosión, aportando información sobre la cinética de reacción. Los datos obtenidos en la forma de Nyquist mediante un potenciostato/galvanostato y su posterior validación con un circuito eléctrico equivalente (CEE) proporcionan una interpretación física confiable del sistema en estudio en condiciones experimentales. Este trabajo expone aspectos fundamentales del uso de la EIS en la evaluación de la corrosión de aceros, destacando su aplicabilidad como una técnica no destructiva.

**Palabras Clave:** Espectroscopía de Impedancia Electroquímica, Proceso de corrosión, Transferencia de carga, Impulso eléctrico, Circuito equivalente, Aceros, Reacciones químicas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las mediciones de impedancia en corriente alterna (AC) se han utilizado durante más de veinte años en electroquímica y física para investigar las propiedades eléctricas de materiales conductores y sus interfaces, empleando un impulso eléctrico externo (voltaje, V, o corriente, I) como fuerza impulsora. Su aplicación sigue siendo una de las técnicas más útiles para el control y monitoreo de la corrosión. La corrosión ha sido desde hace tiempo uno de los obstáculos más costosos para numerosas industrias, ya que se trata de un fenómeno destructivo del acero causado por la interacción química con ambientes acuosos, que ocurre en la interfaz entre el metal y el electrolito, generando un proceso de transferencia de carga eléctrica o difusión iónica. En consecuencia, mediante la técnica EIS es posible determinar el mecanismo que enfrentan las reacciones de corrosión en términos cinéticos [1,2].

La corrosión de los aceros representa, a nivel mundial, uno de los problemas más costosos a los que las industrias se enfrentan diariamente. Este fenómeno ocurre tanto por las condiciones agresivas presentes durante los procesos de fabricación de piezas de acero, como por la falla prematura de herramientas debido a la corrosión bajo esfuerzo (SCC) o por el deterioro progresivo de componentes en equipos y maquinaria en servicio. La industria de la construcción es un claro ejemplo, dado que el acero constituye un material esencial en la edificación de puentes, túneles, torres, edificios, aeropuertos, carreteras, plantas e infraestructuras ferroviarias. Estas estructuras suelen estar expuestas al aire libre, bajo condiciones atmosféricas variables, y con frecuencia en entornos altamente contaminados que aceleran la degradación del acero a tasas de corrosión significativas. Además, los aceros se emplean ampliamente en sectores como la minería, el transporte de fluidos por tuberías, la construcción naval, la maquinaria agrícola y el equipo pesado, donde también son vulnerables a diversos mecanismos de corrosión [1–4].

De acuerdo con Zaki Ahmad [5], el concepto de corrosión debe definirse considerando el entorno en el cual los materiales metálicos permanecen en servicio durante largos periodos de exposición. En este sentido, prácticamente todos los ambientes son corrosivos en mayor o menor medida, incluyendo: i) la humedad del aire, ii) aguas dulces, destiladas, fluviales, salinas y marinas, iii) atmósferas urbanas, marinas e industriales, iv) vapor y gases, v) amoníaco y sulfuro de hidrógeno, vi) dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, así como vii) gases combustibles, ácidos, álcalis y suelos.

Por lo que, el concepto de corrosión en los aceros se define como un proceso electroquímico natural que destruye la integridad de la estructura metálica en presencia de cualquier ambiente que contenga humedad y oxígeno. Este proceso involucra dos reacciones electroquímicas que pueden ocurrir de manera espontánea en la interfase entre el metal y el medio acuoso, de acuerdo con la ley de la termodinámica. La primera corresponde a la reacción del metal base con especies químicas del medio (Ec. 1) (es decir, la reacción de oxidación anódica, mediante la cual el sustrato metálico libera electrones). La segunda es la reacción de reducción de un agente oxidante (Ec. 2) (es decir, la reacción catódica, que compensa la deficiencia de electrones mediante la reducción de protones en la superficie metálica).

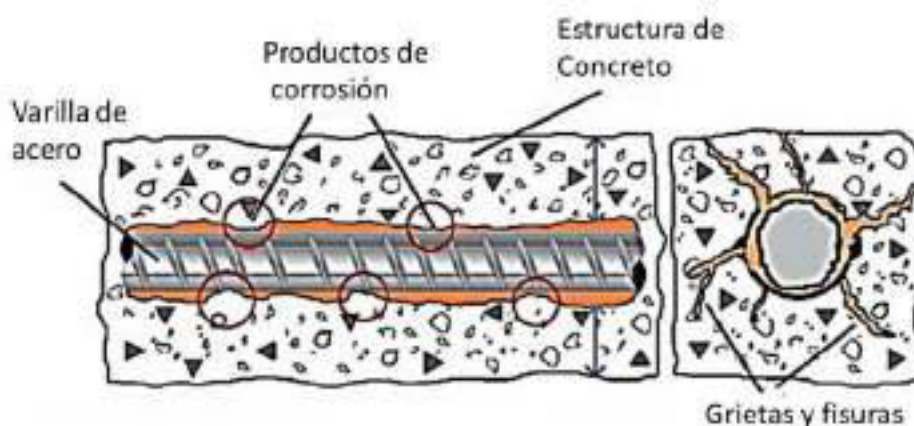
Reacción anódica (disolución del hierro):	Reacción catódica (reducción de oxígeno):	Reacción total:
$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ (1)	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ (2)	$2\text{Fe} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_2$ (3)
Oxidación a Herrumbre (4) $2\text{Fe}(\text{OH})_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3$ $2\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$		

El intercambio de electrones entre las reacciones anódicas y catódicas genera un flujo de corriente electrónica a través de la interfase metálica, conocido como potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ). Este corresponde al valor en el cual ambas reacciones acopladas se encuentran en equilibrio. Sin embargo, al aplicar un potencial eléctrico a la superficie metálica significativamente mayor que el  $E_{\text{corr}}$ , es posible favorecer la reacción de disolución del metal (Ec. 3 y 4), generando especies

solubles que se difunden en la solución acuosa [4,5]. En este sentido, la corrosión del acero en un ambiente húmedo y aireado se desarrolla mediante un proceso electroquímico que involucra reacciones anódicas y catódicas acopladas. La reacción anódica (Ec. 1) consiste en la oxidación del hierro, en la que cada átomo de  $\text{Fe}^0$  pierde dos electrones para formar  $\text{Fe}^{2+}$ . Esta reacción presenta un potencial estándar aproximado de  $-0.44$  a  $-0.50$  V frente al electrodo estándar de  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ , y de manera aislada, su energía libre de Gibbs ( $\Delta G^\circ \approx +85$  kJ/mol), lo que indica que no es capaz de desarrollarse espontáneamente. Sin embargo, la reacción catódica (Ec. 2), que corresponde a la reducción de oxígeno disuelto en presencia de agua formando iones hidróxido, tiene un potencial estándar de aproximadamente  $-0.40$  V y un  $\Delta G^\circ \approx -154$  kJ/mol, lo que la hace ser espontánea. El acoplamiento de estas dos semirreacciones da lugar a la reacción total (Ec. 3 y 4). En este proceso, los electrones liberados por la oxidación del hierro fluyen hacia los sitios catódicos donde ocurre la reducción del oxígeno. La energía liberada por la reacción catódica es suficiente para compensar la energía requerida por la reacción anódica, resultando en un  $\Delta G^\circ$  total negativo ( $\approx -69$  kJ/mol), lo que confirma la espontaneidad del proceso de corrosión. El flujo de electrones desde el ánodo hacia el cátodo a través de la superficie metálica genera la corriente de corrosión, mientras que la formación de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  representa el inicio de la capa de productos de corrosión, que posteriormente puede transformarse en óxidos e hidróxidos de hierro más estables. Este análisis permite comprender la cinética de la corrosión y la relación entre las semirreacciones, mostrando la importancia de cómo la reducción catódica impulsa la oxidación del acero en ambientes húmedos y aireados.

Esto sugiere que el hierro ( $\text{Fe}^0$ ) contenido en el acero como componente base se oxida y que este proceso depende de la energía libre, actuando como fuerza motriz del potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ). La transferencia de carga (iones/electrones) a través de la interfase metálica reacciona con el oxígeno presente en la superficie del acero, dando lugar al crecimiento de un producto de corrosión inestable en forma de una capa de óxido poroso y grueso (conocida como óxido o herrumbre), que ocupa un mayor volumen que el material original. Sin embargo, los óxidos de hierro hidratados no se consideran una capa protectora sobre los aceros en presencia de iones

negativos como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  o  $\text{NO}_3^{2-}$ . La Figura 1 muestra un ejemplo típico del mecanismo de degradación de estructuras de concreto debido a la corrosión del acero de refuerzo embebido en ellas: i) inicialmente, los poros del concreto sirven como vía de acceso para los iones negativos provenientes del ambiente; ii) posteriormente, la corrosión reduce el área de la sección transversal de la barra de acero; iii) se producen óxidos (óxido férrico hidratado, herrumbre) con un volumen mayor, generando tensiones de tracción en las áreas circundantes del concreto, lo que provoca agrietamiento y, eventualmente, falla estructural del concreto [6]. En otras condiciones, puede formarse una delgada película de óxido sobre el metal base que proporciona protección frente al ataque corrosivo, lo cual es esencial para que los aceros sean funcionales cuando se exponen a condiciones atmosféricas severas durante su uso. Esta película pasiva es tan delgada que resulta imperceptible; sin embargo, puede autorepararse de manera inmediata cuando se raya o se retira de manera intencional. Un ejemplo de esta propiedad es la existencia de diversos tipos de aceros inoxidable, que generalmente contienen una proporción significativa de cromo (12 a 25 % en peso) junto con níquel y molibdeno. La presencia de cromo previene la formación de hidróxido férrico  $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$  como producto de la corrosión, ya que reacciona con el oxígeno del ambiente para formar una capa de óxido pasiva adherente ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), confiriendo así una resistencia notable al ataque corrosivo del metal subyacente. Además, esta capa de óxido puede regenerarse por sí misma en presencia de oxígeno [4, 7–9].



**Figura 1.** Modelo físico y químico que representa la falla del concreto debido a la corrosión del acero de refuerzo.

Basándose en estos conceptos fundamentales, una de las principales ventajas del acero inoxidable es su alta resistencia a la corrosión. En combinación con otros elementos de aleación, también puede ofrecer una elevada resistencia mecánica, lo que lo convierte en un material adecuado para múltiples aplicaciones donde se requiere durabilidad en ambientes agresivos. Su uso se extiende a sectores domésticos (cubiertos, cuchillas, electrodomésticos y electrónicos), arquitectónicos (estructuras, pasamanos, barras de refuerzo de concreto, componentes de edificios, cables para puentes y obras costeras), transporte (sistemas de escape automotrices, contenedores navales, camiones de desechos y cisternas de químicos), químico (recipientes a presión, contenedores, tuberías, plantas químicas, tratamiento de aguas residuales), petróleo y gas (estructuras de plataformas, maquinaria, tanques de almacenamiento y tuberías), médico (instrumental quirúrgico, implantes, equipos, aditamentos dentales, alambres y brackets en ortodoncia), así como otros usos comunes (envases de alimentos, botellas de bebidas, resortes, sujetadores, tornillos, tuercas, arandelas y cables) [10].

Para los aceros convencionales producidos mediante procesos de fundición, los productos de acero más utilizados son aquellos que contienen pequeñas cantidades de elementos de aleación, como los aceros al carbono simples (Mn, Si, S, P), los aceros aleados (Cu, Ni, Cr o Al) y los aceros para herramientas o maquinaria (W, Mo, Co, B y V). La adición de estos elementos de aleación proporciona resistencia mecánica, ductilidad, maquinabilidad y una resistencia sustancial a la corrosión. Sin embargo, estos aceros no poseen la misma capacidad de protección frente a la corrosión que el acero inoxidable; la película de óxido formada en su superficie tiene solo unos pocos micrómetros de espesor y presenta microporos o defectos de crecimiento, por lo que se puede inferir que esta capa de óxido no protege adecuadamente al metal frente al ataque corrosivo, considerándose una pasividad temporal limitada. En soluciones acuosas agresivas, la capa de óxido poroso puede disolverse o romperse en algunas áreas, lo que conduce a un ataque localizado adicional sobre la base de hierro. En aplicaciones industriales, las propiedades superficiales del acero tienen un impacto significativo en su vida útil y desempeño. Entre los diversos tratamientos superficiales destinados a proporcionar protección mediante capas duras y gruesas, se utilizan

técnicas de difusión como atmósfera gaseosa, plasma, haz de iones y baños de sales, cuya eficacia depende del tiempo de difusión y de la concentración de la atmósfera, resultando en tratamientos altamente efectivos y de menor costo. Adicionalmente, tratamientos termoquímicos superficiales como cementación, nitruración o boruración son también ampliamente reconocidos [11–15].

Por otro lado, las soluciones ácidas se utilizan con frecuencia en numerosas aplicaciones industriales y se consideran los medios más corrosivos para los aceros. Ácidos como HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>CrO<sub>3</sub>, así como algunas bases como NH<sub>3</sub>, se emplean habitualmente para limpieza de superficies, eliminación de depósitos de óxido, procesos de decapado, ataque químico, tratamientos superficiales de metales y sistemas de aguas residuales. Otros usos relevantes incluyen equipos de procesamiento de metales, procesamiento químico, tuberías, industria alimentaria y plantas químicas y petroquímicas. Diversos trabajos reportan el uso de compuestos de moléculas orgánicas (imidazol, 2-mercapto-benzimidazol, piridina, tiazol, pirrolidina, triazol, entre otros) que han demostrado propiedades significativas de inhibición de la corrosión en aceros expuestos a medios ácidos [16–24]. Estas moléculas deben contener en su estructura grupos electronegativos funcionales, electrones  $\pi$ , heteroátomos de nitrógeno, azufre u oxígeno, con anillos aromáticos o heterocíclicos. En general, los estudios indican que las moléculas se disuelven en una solución etanol-agua y se agregan en bajas concentraciones (ppm) al medio ácido. En todos los casos, se forma sobre la superficie metálica una capa barrera de moléculas orgánicas mediante un mecanismo de adsorción, proporcionando así protección frente a la corrosión en aceros bajo condiciones agresivas [16, 18, 20, 24].

Según Florian B. Mansfeld (1988), en su investigación “*Do not be afraid of electrochemical techniques — But use them with care*” [25], la corrosión es, afortunadamente, un problema que puede ser monitoreado mediante dispositivos electrónicos (por ejemplo, potenciostatos) que aplican una señal eléctrica (V o I) para medir y controlar la transferencia de carga eléctrica, con el fin de evaluar la cinética y el mecanismo de las reacciones de corrosión que ocurren en la interfase metal-solution. Paralelamente, la constante mejora de los instrumentos de medición y la disponibilidad de software comercial permiten realizar pruebas electroquímicas de manera sencilla

para evaluar experimentalmente el progreso de la corrosión y su control. Estos avances han captado la atención de las industrias química, petroquímica, de procesamiento de alimentos y manufactura de acero, así como de laboratorios de investigación y facultades de educación superior, que han respaldado el uso exitoso de técnicas electroquímicas para el monitoreo de la corrosión en aceros. Técnicas electroquímicas como la polarización lineal (RL), resistencia a la polarización (RP) y polarización potenciodinámica se han utilizado durante varias décadas para evaluar fenómenos básicos como la pasividad de óxidos, los efectos de los elementos de aleación, la cinética de reacción y el uso de inhibidores para controlar el comportamiento frente a la corrosión.

No obstante, es importante considerar las limitaciones de las técnicas de polarización que utilizan corriente continua (DC) para perturbar el equilibrio de la interfase metal-electrolito, en particular la caída óhmica (ohmic drop), que a menudo se ignora. Esta ocurre cuando la corriente fluye a través de la resistencia de la solución de prueba y la resistencia de los cables de conexión a los electrodos de la celda electroquímica (resistencia no compensada, IR) [25]. Los efectos de IR pueden causar distorsiones significativas en las curvas de polarización, llevando a estimaciones erróneas de la velocidad de corrosión e información incorrecta del modelo cinético representado por las curvas potenciodinámicas. Ante esta limitación, en la última década ha surgido una técnica más adecuada para estudios de corrosión, ésta es la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), que utiliza una pequeña amplitud de corriente alterna (AC) en un dominio de frecuencias determinado aplicado al sistema de corrosión en estudio. Los datos de EIS suelen recopilarse mediante un potenciostato/galvanostato y posteriormente ajustarse a un modelo de circuito eléctrico equivalente (CEE) para su interpretación y análisis, buscando fundamentalmente una interpretación física significativa. Según diversos estudios [26–33], la EIS se considera una técnica electroquímica moderna y exitosa, con gran evolución en los últimos años, convirtiéndose en una herramienta analítica esencial en investigación en ciencia de materiales. Su versatilidad y sensibilidad permiten su amplio uso en estudios de corrosión y control de la misma, monitoreo de propiedades de polímeros o cerámicas conductoras electrónicamente e iónicamente, coloides y recubrimientos, mediciones en semiconductores y electrolitos sólidos, estudios de cinética

electroquímica en interfaces electrodo-medio, así como la determinación de mecanismos de conducción o difusión, reacciones y procesos [34]. La evaluación práctica de la técnica de EIS puede resultar difícil de comprender para personas no especialistas debido a la falta de conocimiento sobre los aspectos teóricos básicos y experiencia con las mediciones experimentales. Sin embargo, es posible lograr una interpretación y análisis lógicos de los datos de impedancia obtenidos para un sistema práctico determinado, como los estudiados en esta investigación. En este sentido, para evitar incertidumbres y malas interpretaciones de los datos de impedancia, debe establecerse una correlación analítica de los parámetros físicos, químicos y de fabricación mediante un modelo de circuito eléctrico equivalente (CEE), confiriendo así un sentido común a la respuesta de impedancia.

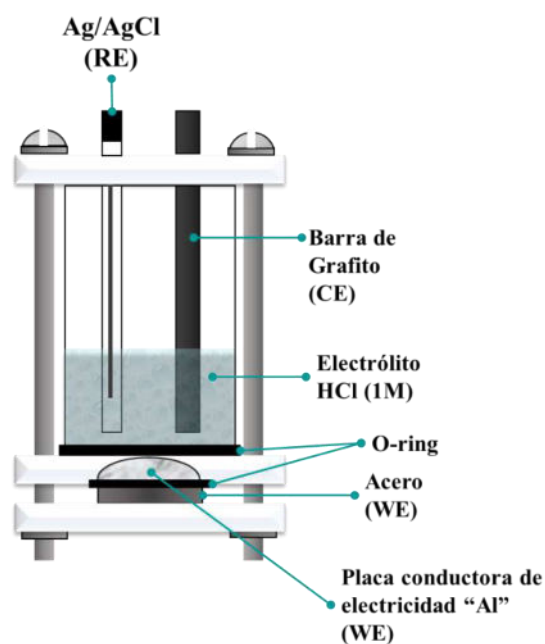
La EIS se puede aplicar para el análisis electroquímico y la evaluación de la integridad de los aceros en diversos escenarios prácticos, incluyendo: mediciones en su condición recibida, estudio de la cinética de reacciones de oxidación en diferentes soluciones acuosas, evaluación de aceros corroídos bajo condiciones no estacionarias, monitoreo de la corrosión en materiales de concreto reforzado, control de la corrosión mediante moléculas orgánicas o líquidos naturales extractos de plantas, protección mediante recubrimientos duros y control de la corrosión en aceros utilizados como envases de alimentos o bebidas. Esta técnica permite correlacionar los datos experimentales con los mecanismos de corrosión y proporciona información crítica para el diseño de estrategias de protección y prolongación de la vida útil de los materiales.

## **2. CONDICIONES EXPERIMENTALES**

### **2.1. Materiales y equipos**

Para este estudio, se seleccionan muestras representativas de acero, las cuales son seccionadas en forma circular para garantizar uniformidad en su geometría. Posteriormente, las superficies expuestas se lijaron con papel abrasivo desde un grado de 100 hasta 600# SiC. Las pruebas de corrosión se realizan en una celda electroquímica, basada en un diseño especializado de acuerdo con la propuesta de H. Herrera H. [20], como la que se muestra en la Figura 2. Este diseño

contempla la inserción por la parte superior de un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata saturado (RE-Ag/AgCl), seleccionado por su alta estabilidad y precisión en la medición de potenciales. Como electrodo auxiliar (CE) se empleó una barra de grafito, cuya función es cerrar el circuito electroquímico y conducir la corriente aplicada. Finalmente, el electrodo de trabajo está representado por WE y son las muestras de acero, que se exponen directamente al electrolito por la parte inferior de la celda para evaluar el comportamiento electroquímico en condiciones controladas.



**Figura 2.** Representación esquemática del diseño de la celda electroquímica utilizada en las pruebas de corrosión (CE= contra electrodo; RE=electrodo de referencia y WE= electrodo de trabajo).

## 2.2. Caracterización Electroquímica

La experimentación electroquímica se realizó en un equipo potenciostato/galvanostato PARSTAT 4000, de la marca Princeton Applied Research para aplicar una perturbación en corriente  $I$  o en potencial  $E$ . Como medio corrosivo se emplearon soluciones ácidas de HCl 1M o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M, con el propósito de evaluar la respuesta de los aceros en condiciones agresivas. Inicialmente, se registró el potencial de circuito abierto ( $E_{\text{corr}}$ , Potencial de Corrosión) durante 15

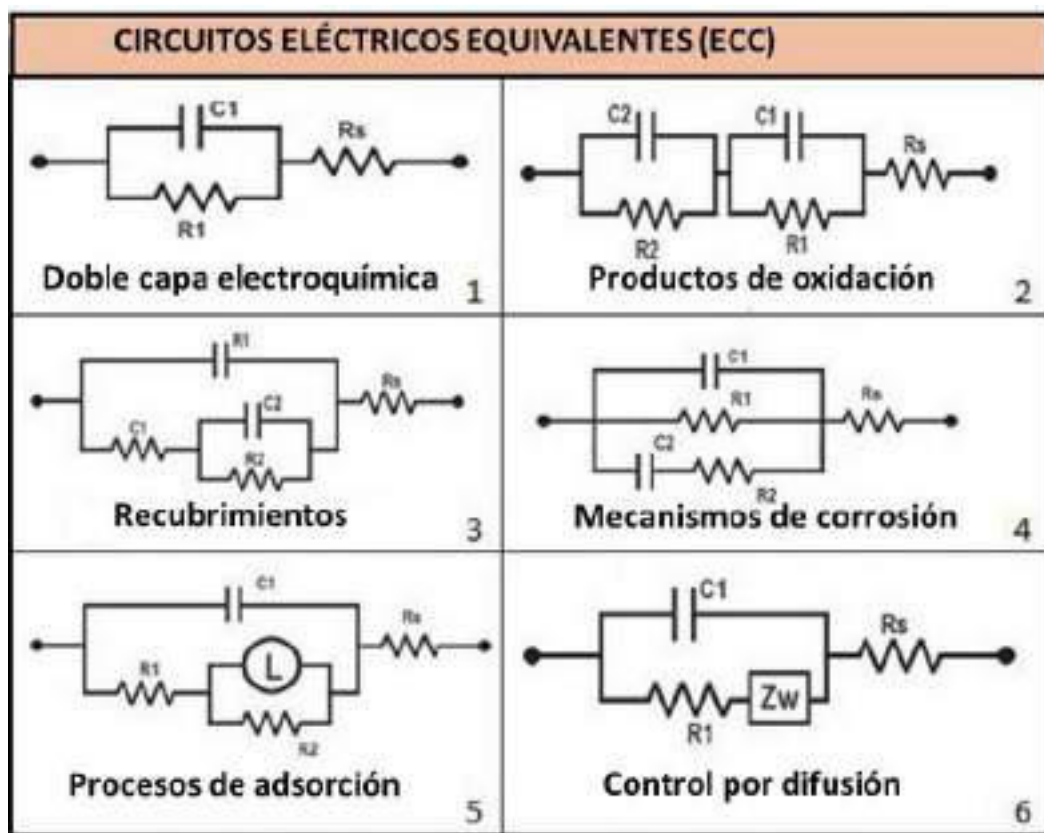
minutos de prueba, adquiriendo un dato por segundo, permitiendo la estabilización del sistema de estudio. Posteriormente, se aplicó la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), mediante un barrido de frecuencia en el rango de 100 kHz a 1 mHz, con una amplitud de perturbación de 10 mV y adquisición de datos de 10 puntos por década. Esta secuencia permitió evaluar la respuesta electroquímica del sistema en un barrido de frecuencias, así obtener la resistencia a la transferencia de carga ( $R_{ct}$ ), parámetro directamente relacionado con la susceptibilidad a la corrosión en medio ácido para diferentes aceros de uso industrial. El área expuesta del electrodo de trabajo, se mantuvo constante de aproximadamente  $1.0 \text{ cm}^2$ , con el fin de estandarizar las condiciones experimentales en adquisición de los datos de la interfase metal/solución.

### 2.3. Análisis e interpretación de los espectros de impedancia (EIS)

Los datos de EIS son representados en su forma compleja en función de la frecuencia, relacionando la impedancia real ( $Z_{real}$ ) con su componente imaginaria ( $Z_{im}$ ). La interpretación de estos resultados se realiza mediante la correlación matemática con modelo físico-eléctrico, comúnmente denominado Circuito Eléctrico Equivalente (CEE). Dicho modelo está integrado por componentes eléctricos ideales, como resistencias ( $R$ ), capacitores ( $C$ ) e inductores ( $L$ ), conectados en serie o en paralelo, con el propósito de reproducir los espectros experimentales obtenidos. En la Figura 3 se muestran algunos modelos de CEE diseñados para describir los diferentes procesos electroquímicos analizados en este estudio, para comprender los espectros de EIS registrados experimentalmente.

La figura presenta seis configuraciones de circuitos eléctricos equivalentes (CEE) empleados para modelar distintos fenómenos electroquímicos en la interfaz electrodo/electrolito: (1) Doble capa electroquímica, modelo básico (Randles). Incluye una resistencia del electrolito ( $R_s$ ), una resistencia de transferencia de carga ( $R_I$ ) y un capacitor de la doble capa ( $C_I$ ). Representa procesos de intercambio de carga en la interfase metal/electrolito. (2) Productos de oxidación, incluye un segundo par de  $R_2$ – $C_2$  en paralelo al circuito de doble capa. Modela la formación de capas pasivas

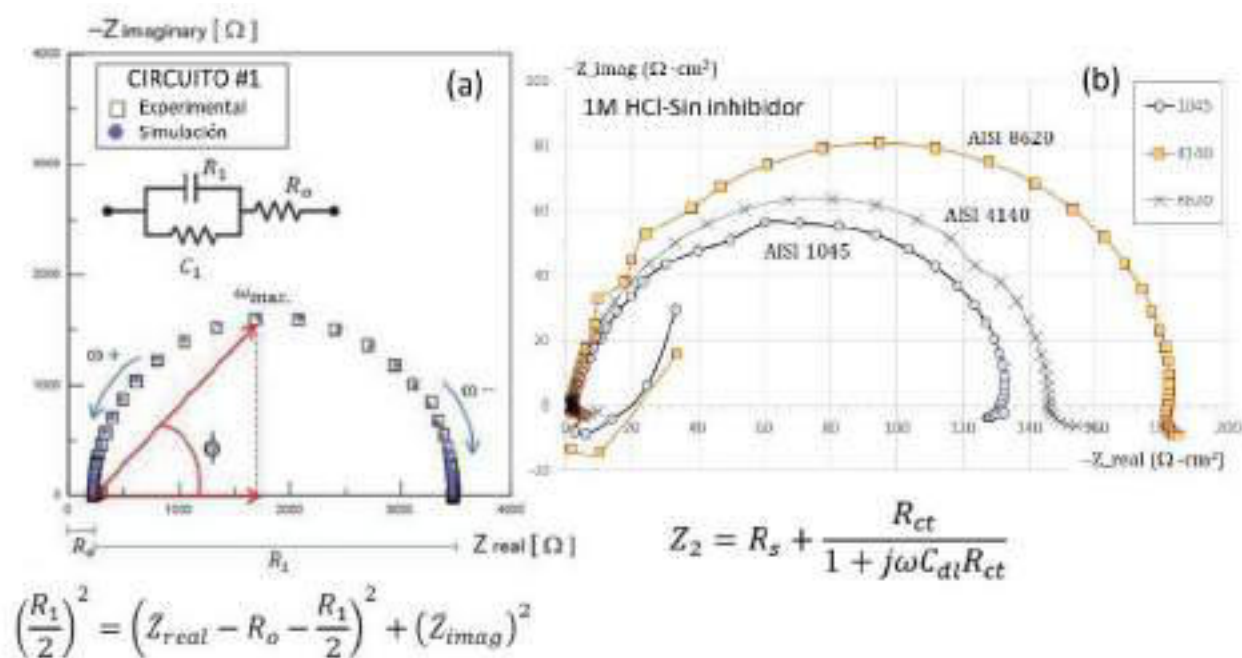
u óxidos superficiales. (3) Recubrimientos, este ECC incluye múltiples elementos R–C en paralelo, representando la presencia de películas protectoras. Permite evaluar la integridad y porosidad de recubrimientos orgánicos o inorgánicos. (4) Mecanismos de corrosión, describe procesos competitivos de transferencia de carga y acumulación de productos en la interfase. (5) Procesos de adsorción, integra un elemento inductivo ( $L$ ), que representa fenómenos asociados a la adsorción o relajación de especies químicas en la superficie metálica. (6) Control por difusión, sustituye una rama capacitiva por el elemento de Warburg ( $Z_w$ ), que representa la resistencia al transporte de masa y difusión iónica en el electrolito.



**Figura 3.** Circuitos eléctricos equivalentes (CEE) comúnmente utilizados para interpretar los espectros de impedancia electroquímica (EIS) [35].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4, se muestra el diagrama de Nyquist, que representa la simulación experimental de la respuesta de impedancia para los componentes RC conectados en serie, los cuales se comportan de manera capacitiva al aplicar un voltaje alterno de forma sinusoidal  $[E(t)=E_0 \cdot \sin(\omega t)]$  de aproximadamente 10 mV a 1 Hz como energía de perturbación. El modelo #1 representa un arreglo simple de resistencias y capacitores en serie y en paralelo, en el cual una resistencia de  $3.3\text{k}\Omega$  está conectada en paralelo con un capacitor de  $1\ \mu\text{F}$ , y posteriormente en serie con otra resistencia de  $276\ \Omega$ . Este modelo describe en forma análoga el fenómeno físico de un metal bajo ataque corrosivo por transferencia de carga electrónica en la interfaz metal/electrolito, tal es el caso de los aceros 1045, 4140 y 8620 en 1M HCl.



**Figura 4.** Datos de impedancia de un modelo EEC simple; a) circuito #1, elementos RC en paralelo seguido de una resistencia en serie y b) corrosión debida a la transferencia de carga.  $R_o=276\ \Omega$ ,  $R_1=3.3\ \text{k}\Omega$ ,  $C_1=1\ \mu\text{F}$  [35].

La información contenida en los espectros de impedancia es claramente visible en la Figura 4(a), ya que es posible determinar los valores de las frecuencias correspondientes a la resistencia de la solución ( $R_s$ ), la resistencia a la transferencia de carga ( $R_{ct}$ ) y la capacitancia de la doble capa ( $C_{dl}$ ). A partir del diagrama de Nyquist mostrado en la Figura 4(b) para los aceros evaluados en 1M HCl, la  $C_{dl}$  se observa claramente como un semicírculo bien definido (una sola constante de tiempo) en todo el dominio de frecuencias, resultado del comportamiento del circuito eléctrico equivalente #1. El diámetro de este semicírculo corresponde al valor de  $R_{ct}$ , mientras que  $R_s$  se determina leyendo el valor del eje real ( $Z_{real}$ ) en la intersección a alta frecuencia. Sin embargo, si se considera la frecuencia angular máxima ( $\omega_{max}$ ), definida como la frecuencia en la que la componente imaginaria de la impedancia ( $Z_{im}$ ) alcanza su valor máximo, y conociendo  $R_{ct}$ , el valor de  $C_{dl}$  puede obtenerse mediante la siguiente expresión (Ec. 5):

$$C_{dl} = \frac{1}{\omega_{max}R_{ct}} \quad (5)$$

$$Z_T(t) = \frac{R_1}{1 + (j\omega C_1 R_1)} + (R_0) \quad (6)$$

Por otro lado, en la Figura 5(a) puede esperarse la aparición de dos constantes de tiempo (circuito #2, que corresponde a la combinación de elementos RC en paralelo conectados en serie), descrito en la ecuación (7);

$$Z_T(t) = \frac{R_2}{1 + j\omega C_2 R_2} + \frac{R_1}{1 + j\omega C_1 R_1} + (R_0) \quad (7)$$

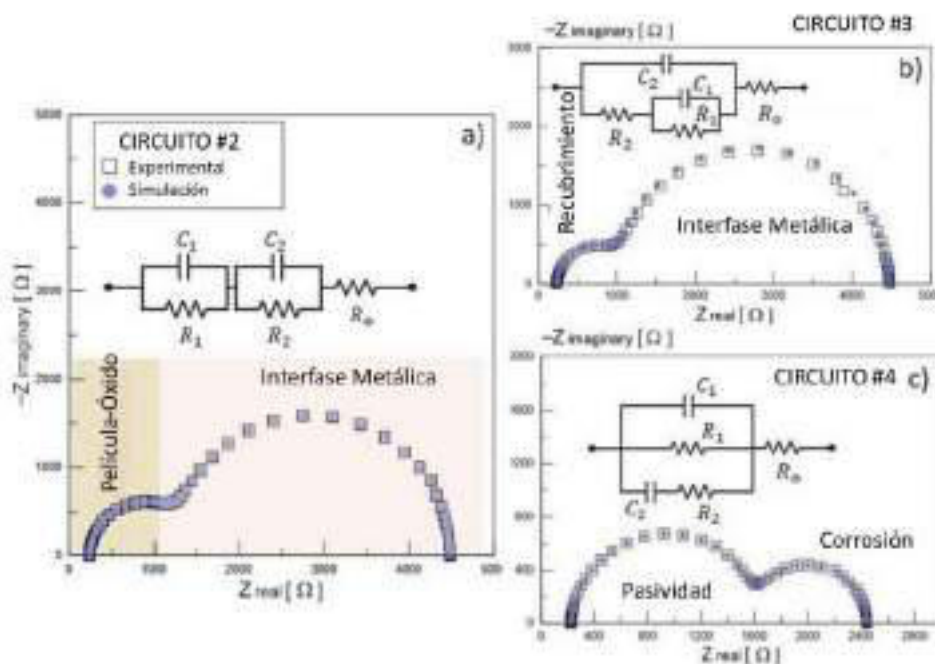
o en la Figura 5(b) (circuito #3, que representa una disposición en paralelo con conexión paralela), expresado en la ecuación (6);

$$Z_T(t) = \frac{R_2}{1 + j\omega C_2} + R_1 + R_0 \quad (8)$$

o bien en la Figura 5(c) (circuito #4), definido como se expresa a continuación:

$$Z_T(t) = R_2 + \left( \frac{R_2}{j\omega C_2} \parallel R_1 \parallel \frac{1}{j\omega C_1} \right) + R_0 \quad (9)$$

De estas ecuaciones,  $Z_T(t)$ , es la respuesta de la impedancia total del sistema o circuito eléctrico (CEE) como función del tiempo y de la frecuencia angular aplicada, durante la perturbación sinusoidal. El término  $R/(1+j\omega CR)$ , es la impedancia asociada a un circuito RC en paralelo,  $R$  es la resistencia asociada a procesos de transferencia de carga, o la resistencia asociada a los poros de la superficie, dependiendo del modelo físico.  $C$  es la capacitancia relacionada a la doble capa eléctrica o la capacitancia del recubrimiento de óxido. En tanto, que término  $j\omega CR$ , representa la dependencia de la impedancia con la frecuencia angular  $\omega=2\pi f$ .  $R_o$  o  $R_s$  es la resistencia de la solución, que representa la resistencia del electrolito entre el electrodo de trabajo (WE) y el electrodo de referencia (RE).



**Figura 5.** Simulación de datos de impedancia; a) circuito #2, RC en paralelo conectados en serie (productos de óxidos), b) circuito #3, RC en paralelo seguidos de una resistencia en serie (recubrimiento de pintura), y c) circuito #4 elementos RC en paralelo conectados en serie (mecanismo de corrosión).  $R_o=276 \Omega$ ,  $R_1=3.3 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1=1 \mu\text{F}$ ,  $R_2=1 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1=10 \mu\text{F}$  [35].

Estos modelos de circuitos eléctricos equivalentes (CEE) se utilizan para describir los espectros de impedancia asociados con la formación de productos de óxido derivados de las reacciones de corrosión en la superficie metálica, con recubrimientos anódicos, o en metales pintados después de haber sido expuestos a electrolitos corrosivos. En este caso,  $C_1$  representa la capacitancia de la película de óxido, conectada en paralelo con  $R_1$ , que corresponde a la resistencia del óxido; ambos están conectados en serie a un circuito RC paralelo que contribuye a la respuesta eléctrica de la capa barrera interna o de la interfase doble capa (óxido/matriz metálica). El valor de la capacitancia del recubrimiento se mide en faradios ( $F$ ) y depende de su constante dieléctrica ( $\epsilon$ ) y de su espesor ( $d$ ) está dada por la expresión (Ec.10);

$$C_c = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{d} \quad (10)$$

donde  $\epsilon_0$  es la constante de permitividad eléctrica del vacío ( $8.85 \times 10^{-12}$  F/m y  $A$  corresponde al área expuesta del electrodo. De este modo, se espera que la capacitancia del recubrimiento aumente con el tiempo de exposición, debido a la absorción de agua por parte del recubrimiento a través de caminos conductores iónicos denominados poros. Los cambios en la resistencia y la capacitancia de los poros pueden emplearse para estimar el grado de corrosión del metal.

Otros tipos de espectros de impedancia comúnmente reportados en la literatura son similares a los obtenidos mediante la simulación con los circuitos #5 y #6. El circuito #5 corresponde a una disposición semejante al circuito #3, en el cual el capacitor ideal  $C$  es reemplazado por una bobina magnética (inductora)  $L$ . En este caso, la impedancia se expresa como:

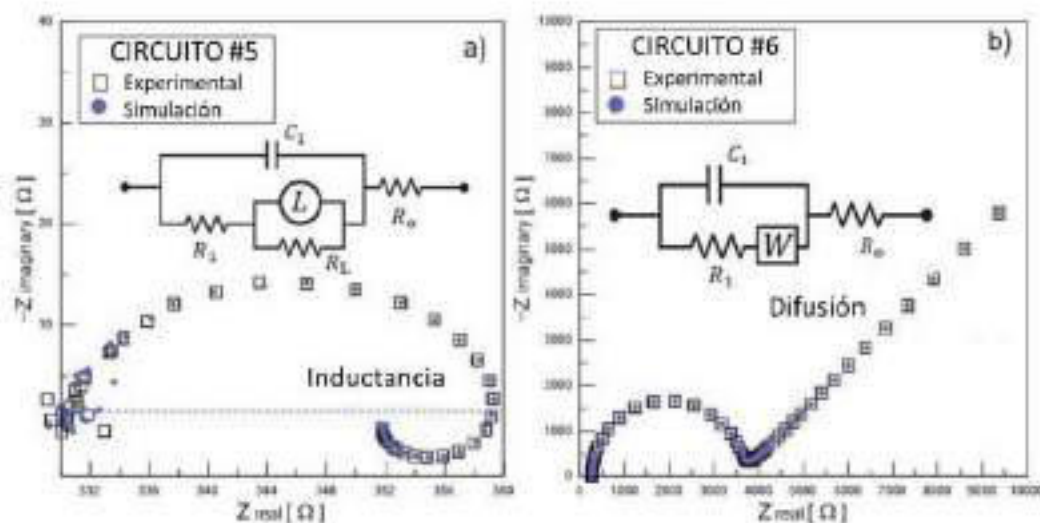
$$Z_T(t) = \frac{j\omega R_2 L}{R_2 + j\omega L} + \frac{R_1}{1 + j\omega C_1 R_1} + R_0 \quad (11)$$

De este modo, el diagrama de impedancia en la Figura 6(a) muestra un semicírculo muy definido a lo largo de todo el rango de frecuencias (proceso de transferencia de carga), acompañado

de una segunda respuesta inductiva ubicada por debajo del semicírculo en la zona de bajas frecuencias. Esto indica la presencia de un mecanismo de adsorción iónica. Esta respuesta de impedancia es comúnmente observada en sistemas electroquímicos donde especies químicas, iones o moléculas son físicamente adsorbidos en la interfase de la doble capa electroquímica, con un movimiento eléctrico asociado a su carga. Por su parte, el circuito #6 se deriva del circuito más simple (#1), en el cual la resistencia es reemplazada por otro elemento eléctrico, la impedancia de Warburg  $Z_w$ :

$$Z_T(t) = \frac{R_1 + W}{1 + j\omega C_1(R_1 + W)^\alpha} + R_0 \quad (12)$$

La impedancia de Warburg está relacionada con el control por difusión de especies, el cual ocurre cuando la concentración superficial de una especie electroquímicamente activa varía durante el ciclo de corriente alterna. Por lo tanto, debe considerarse la impedancia asociada a reacciones catódicas, como la reducción de oxígeno, un proceso común en los sistemas de corrosión. La forma general de una impedancia de Warburg se ilustra en la Figura 6(b).



**Figura 6.** Simulación circuitos equivalentes (EEC); a) circuito #5, RC en paralelo dispuestos en paralelo con una inductancia  $L$  (mecanismo de adsorción), y b) circuito #6, RC en paralelo en serie con la impedancia de Warburg  $W$  (control por difusión) [35].  $R_o = 276 \Omega$ ,  $R_1 = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 1 \mu\text{F}$ ,  $W_o = 0.001 \text{ S}^{-\text{sec}^{0.5}}$

Se distingue claramente dos regiones: un semicírculo atribuido a la reacción de transferencia de carga y una línea recta con un ángulo de 45° respecto al eje de abscisas, correspondiente a la difusión de los reactivos [6, 36–38]. Este comportamiento es característico de la electroquímica analítica bajo control difusivo ( $W$ ) en las mediciones de corrosión, y se describe mediante la Ec. (13), donde  $\sigma$  es el coeficiente de Warburg, el cual puede calcularse a partir de la pendiente de la línea recta en el plano complejo de la Figura 6(b).

$$W = \sigma \omega^{-\frac{1}{2}(1-I)} \quad (13)$$

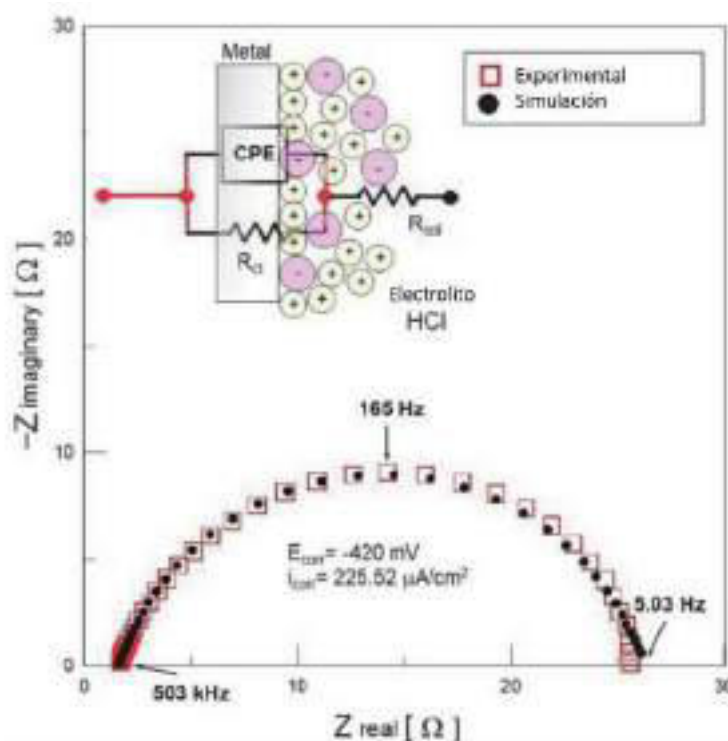
En casos reales, la forma del diagrama de Nyquist no siempre muestra un semicírculo perfecto, como ocurre en el caso de un capacitor ideal. Por ello, es necesario reemplazar el capacitor ( $C$ ) por un Elemento de Fase Constante ( $CPE$ , por sus siglas en inglés), con el fin de compensar la depresión del semicírculo causada por la dispersión de frecuencias resultante de un sistema experimental, debida a factores como la inhomogeneidad de la superficie, la rugosidad, la porosidad del electrodo, el desorden superficial, irregularidades geométricas, entre otros [38]. El  $CPE$  es una expresión matemática útil para representar diversos elementos eléctricos y se define como:

$$\left( Z_{CPE} = \frac{1}{Q_0(j\omega)^\alpha} \right) \quad (14)$$

Para obtener el valor de la capacitancia de la doble capa ( $C_{dl}$ ) a partir del  $CPE$ , es necesario determinar la frecuencia máxima del semicírculo de Nyquist ( $\omega_{\theta_{max}}$ ), así como el exponente  $n$ . Este exponente puede tener valores entre 0.7 y 0.9, aunque permite describir adecuadamente los datos experimentales, su interpretación física aún no está completamente clara.  $Q_0$  es una constante con dimensiones de S-sec<sup>n</sup>. La ecuación (15) muestra el cálculo de  $C_{dl}$ .

$$C_{dl} = Q_0 * \omega_{\theta_{max}}^{(n-1)} \quad (15)$$

En la Figura 7 se muestra la configuración de un EEC correspondiente a un diagrama de Nyquist obtenido experimentalmente a partir de un sistema de corrosión. El uso del *CPE* resultó útil para ajustar los datos experimentales a un modelo matemático con el fin de obtener el comportamiento de corrosión del metal, ejemplo el acero al carbono APIX-52-5L en medio ácido (HCl 1M) [20, 39]. La validación de los parámetros obtenidos a través de un modelo EEC análogo puede evaluarse mediante las Transformaciones de Kramers-Kronig (*KKT*), lo cual se realiza con el propósito de evaluar y comprender los mecanismos que ocurren en la interfaz del sistema. Las *KKT* son relaciones matemáticas entre la parte real y la parte imaginaria de la impedancia que deben cumplirse en datos de impedancia válidos. Esto significa que, cuando la impedancia imaginaria  $Z_{im}$  es conocida para todas las frecuencias, es posible calcular la impedancia real  $Z_{real}$  en todo el rango de frecuencias [40, 41].



**Figura 7.** Circuito eléctrico equivalente (EEC) #1 con un CPE para ajustar los datos de impedancia correspondientes a la corrosión de acero expuesto en HCl 1 M.  $R_s=1.58 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,  $C_{dl}=53.04 \mu\text{F/cm}^2$ ,  $R_{ct}=24.71 \Omega \cdot \text{cm}^2$  [35].

#### 4. CONCLUSIONES

Este estudio aborda los aspectos fundamentales de la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) como una herramienta para comprender los mecanismos de corrosión en aceros industriales expuestos a diferentes condiciones corrosivas. Su relevancia radica en ofrecer una guía práctica sobre el uso de esta técnica en el campo de la tecnología de corrosión de metales. Esta investigación incluye casos prácticos de impedancia electroquímica, sustentados en los principios teóricos y aspectos cualitativos de la EIS, así como en su interpretación experimental. El propósito es proporcionar criterios que faciliten la toma de decisiones fundamentadas en la experiencia adquirida durante la aplicación de esta metodología. Los casos presentados forman parte de la trayectoria de investigación del Dr. Héctor Herrera Hernández (DR.3H) y de su grupo de estudiantes. Es importante destacar que la EIS se ha extendido a múltiples disciplinas de la ciencia y la tecnología, demostrando una alta eficiencia en la evaluación del desempeño e integridad de materiales metálicos. Como es el caso de la publicación “Electrospinning Technology to Influence Hep-G2 Cell Growth on PVDF Fiber Mats as Medical Scaffolds: A New Perspective of Advanced Biomaterial” *Journal of Composites Science*, 9(8), 401, en el que se aplica la EIS para análisis biológicos. Además, su aplicación no se limita a condiciones estacionarias, ya que también permite el monitoreo de variables más complejas, como los parámetros de flujo, los cuales representan de manera más realista las condiciones de servicio y constituyen un desafío relevante para el análisis e interpretación de los datos de EIS.

El ajuste de los datos experimentales mediante modelos matemáticos, en particular los circuitos eléctricos equivalentes (EECs), resulta esencial en el análisis y validación de la información obtenida, ya que permite la determinación de los parámetros eléctricos del sistema que están directamente relacionados con la velocidad de corrosión del material bajo estudio, y además de aportar información sobre su capacidad de transferencia de carga electrónica.

En conclusión, la EIS se presenta como una técnica versátil y eficaz para obtener información detallada sobre un sistema y su evolución en el tiempo, a través de la aplicación de un

voltaje sinusoidal en función de un rango de frecuencias. Esto permite evaluar las propiedades y la viabilidad de los materiales sometidos a condiciones de servicio severas, como los aceros industriales que fueron considerados en este trabajo de investigación.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT)** por el reconocimiento otorgado mediante la distinción SNI como miembros de investigación, así como por la beca mensual recibida. Este trabajo se realizó en el **Laboratorio de Electroquímica Avanzada y Corrosión de Materiales Industriales de la UAEMex**. DR.3H dedica, este trabajo a la memoria del **Profesor Florian B. Mansfeld**, por su enseñanza en la técnica EIS.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Marcus P, Oudar J. *Corrosion Mechanism in Theory and Practice*. 1st ed. New York: Marcel Dekker, Inc.; 1995. 641p. DOI: 10.1201/9780203909188.
- [2] American Society for Metals. *ASM Handbook, Vol. 13A Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection*. 10th ed. Ohio: ASM International; 2003. 2597p. DOI: 10.31399/asm.hb.v13b.9781627081832.
- [3] Morcillo M, De la Fuente D, Díaz I, Cano H. Atmospheric corrosion of mild steel. *Revista de Metalurgia*. 2011;47(5): 1-19. DOI: 10.3989/revmetalm.1125.
- [4] Corrosion LD. *Surface Chemistry of Metals*. 1st ed. Vol. 614p. Florida: Taylor and Francis Group; 2007. DOI: 10.1201/9781439807880.
- [5] Ahmad Z. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. 1st ed. Vol. 656p. Oxford: Butterworth Heinemann; 2006. DOI: 10.1016/B978-0-7506-5924-6.X5000-4.
- [6] Herrera Hernández H, González Díaz F, Fajardo San Miguel G, Velázquez Altamirano JC, González Morán CO, Morales Hernández J. Electrochemical impedance spectroscopy as a practical tool for monitoring the carbonation process on reinforced concrete structures. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019;44:10087-10103. DOI: 10.1007/s13369-019-04041-z.
- [7] Khatak HS, Raj B. *Corrosion of Austenitic Stainless Steels*. 1st ed. Alpha Science International: Pangbourne; 2002. 400p. DOI: 10.1002/maco.200490073.
- [8] Kelly RG, Scully JR, Shoesmith DW, Buchheit RG. *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering*. 1st ed. New York: Marcel Dekker Incorporation; 2002. 440p. DOI: 10.1201/9780203909133.
- [9] Garfias-García E, Colin-Paniagua FA, Herrera-Hernández H, Juárez-García JM, Palomar-Pardavé ME, Romero Romo MA. Electrochemical and microscopy study of localized Corrosion on a sensitized stainless steel AISI 304. *ECS Transactions*. 2010;29(1):93-102.

- [10] Outokumpu. Handbook of stainless steel. 1st ed. Avesta: Outokumpu Oyj; 2013. 92p.
- [11] Liang W. Surface modification of AISI 304 austenitic stainless steel by plasma nitriding. *Applied Surface Science*. 2003;211:308-314. DOI: 10.1016/S0169-4332(03)00260-5
- [12] Liu RL, Yan MF. Improvement of wear and corrosion resistances of 17-4PH stainless steel by plasma nitrocarburizing. *Materials and Design*. 2010;31:2355-2359. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.11.069.
- [13] Cardoso RP, Mafra M, Brunatto SF. Low-temperature thermochemical treatments of stainless steels. In: Mieno T, editor. *Plasma Science and Technology: Progress in Physical States and Chemical Reactions*. 1st ed. London: IntechOpen; 2016. pp. 107-130. DOI: 10.5772/61989.
- [14] Mejia-Caballero I, Martínez Trinidad J, Palomar-Pardavé M, Romero-Romo M, Herrera Hernández H, Herrera-Soria O, et al. Electrochemical evaluation of corrosion on borided and non-borided steels immersed in 1M HCl solution. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014;23:2809-2818. DOI: 10.1007/s11665-014-1039-z.
- [15] Martini C, Palombarini G, Carbuicchio M. Mechanism of thermochemical growth of iron borides on iron. *Journal of Materials Science*. 2004;39:933-937. DOI: 10.1023/B:JMSS.0000012924.74578.87.
- [16] Natalya V. Likhanova NV, Domínguez-Aguilar MA, Olivares Xometl O, Nava-Entzana N, Arce E, Dorantes H. The effect of ionic liquids with imidazolium and pyridinium cations on the corrosion inhibition of mild steel in acidic environment. *Corrosion Science*. 2010;52:2088–2097. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.02.030.
- [17] Goyal M, Kumar S, Bahadur I, Verma C, Ebenso EE. Organic corrosion inhibitors for industrial cleaning of ferrous and non-ferrous metals in acidic solutions: A review. *Journal of Molecular Liquids*. 2018;256:565-573. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.02.045.
- [18] Abreu-Quijano M, Palomar Pardavé M, Cuán A, Romero-Romo M, Negrón-Silva G, Álvarez-Bustamante R, et al. Quantum chemical study of 2 Mercaptoimidazole, 2 Mercaptobenzimidazole, 2-Mercapto-5 Methylbenzimidazole and 2-Mercapto 5-Nitrobenzimidazole as Corrosion inhibitors for steel. *International Journal of Electrochemical Science*. 2011;6: 3729-3742.
- [19] Krim O, Elidrissi A, Hammouti B, Ouslim A, Benkaddour M. Synthesis, characterization, and comparative study of pyridine relatives as corrosion inhibitors of mild steel in HCl medium. *Chemical Engineering Communications*. 2009;196(12):1536-1546. DOI: 10.1080/00986440903155451.
- [20] Palomar-Pardavé M, Romero-Romo M, Herrera-Hernández H, Abreu Quijano MA, Likhanova NV, Uruchurtu J, et al. Influence of the alkyl chain length of 2-amino 5-alkyl 1,3,4-thiadiazole compounds on the corrosion inhibition of steel immersed in sulfuric acid solutions. *Corrosion Science*. 2012; 54:231-243. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.09.020.
- [21] Singh AK, Quraishi MA. The effect of some bis-thiadiazole derivatives on the corrosion of mild steel in hydrochloric acid. *Corrosion Science*. 2010;52(4):1373-1385. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.01.007.

- [22] Bouklah M, Ouassini A, Hammouti B, Idrissi AE. Corrosion inhibition of steel in sulphuric acid by pyrrolidine derivatives. *Applied Surface Science*. 2006;252:2178-2185.
- [23] Ansari K, Yadav DK, Ebenso EE, Quraishi M. Novel and effective pyridyl substituted 1, 2, 4-triazole as corrosion inhibitor for mild steel in acid solution. *International Journal of Electrochemical Science*. 2012;7:4780-4799. DOI: : 10.1016/j.corsci.2011.09.020.
- [24] Espinoza-Vázquez A, Negrón-Silva GE, González-Olvera R, Angeles Beltrán D, Herrera-Hernández H, Romero-Romo M, et al. Mild steel corrosion inhibition in HCl by di-alkyl and di-1, 2, 3-triazole derivatives of uracil and thymine. *Materials Chemistry and Physics*. 2014;145: 407-417. DOI: 10.1016/j.matchemphys. 2014.02.029
- [25] Mansfeld F. Don't Be afraid of electrochemical techniques — But use them with care. *Corrosion Science*. 1988;44(12):856-868. DOI: 10.5006/ 1.3584957.
- [26] Bard JA, Methods FRLE. Fundamentals and applications. John Wiley & Sons, Inc. 2nd. In: USA. 2001.
- [27] Mansfeld F, Lee CC, Zhang G. Comparison of electrochemical impedance and noise data in the frequency domain. *Electrochimica Acta*. 1998;43(3-4):435-438. DOI: 10.1016/ s0013-4686(97)00060-1.
- [28] Mansfeld F, Lee CC, Zhang G. Comparison of electrochemical Impedance and noise data for polymer coated steel in the frequency domain. *Materials Science Forum*. 1998;289-292: 93-106. DOI: 10.4028/www.scientific. net/msf.289-292.93.
- [29] Mansfeld F. Use of electrochemical impedance spectroscopy for the study of corrosion protection by polymer coatings. *Journal of Applied Electrochemistry*. 1995;25(3):187-202. DOI: 10.1007/bf00262955.
- [30] Mansfeld F. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) as a new tool for investigating methods of corrosion protection. *Electrochimica Acta*. 1990;35(10):1533-1544. DOI: 10.1016/0013-4686(90)80007-b.
- [31] Mansfeld F, Xiao H, Wang Y. Evaluation of localized corrosion phenomena with electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and electrochemical noise analysis (ANA). *Materials and Corrosion*. 1995; 46(1):3-12. DOI: 10.1002/ maco.19950460103.
- [32] Bolind AM, Lillard RS, Subbins JF. The electrical AC impedance response of oxide scales on 9Cr-1Mo steel immersed in molten lead-bismuth eutectic alloy at 200°C. *Corrosion Science*. 2015;92:48-57. DOI: :10.1016/j. corsci.2015.11.012.
- [33] Shih H, Mansfeld F. A fitting procedure for impedance data of systems with very low corrosion rates. *Corrosion Science*. 1989;29(10): 1235-1240. DOI: 10.1016/0010-938X (89)90070-X.
- [34] Macdonald DD. Why electrochemical impedance spectroscopy is the ultimate tool in mechanistic analysis. *ECS Transactions*. 2009;19(20):55-79.
- [35] Herrera Hernández H, M. Ruiz Reynoso A, C. Trinidad González J, O. González Morán C, G. Miranda Hernández J, Mandujano Ruiz A, et al. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): A Review Study of Basic Aspects of the Corrosion Mechanism Applied to Steels.

Electrochemical Impedance Spectroscopy. IntechOpen; 2020.

<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94470>.

Copy to clipboard

[36] Perez N. *Electrochemistry and Corrosion Science*. 1st ed. Vol. 362p. New York: Kluwer Academic Publishers; 2004.

[37] Mendoza-Flores J, Durán-Romero R, Genescá-Llongueras J. Espectroscopía de Impedancia Electroquímica en Corrosión. In: Llongueras JG, editor. *Notas Técnicas Electroquímicas para el control y estudios de la corrosión*. México: UNAM. 2002. pp. 55-91.

[38] Mansfeld F, Shih h, Greene H, Tsai CH. Analysis of EIS data for common corrosion processes. In: Scully JR, Silverman DC, Kendig MW, editors. *Electrochemical Impedance: Analysis and Interpretation*. 1st ed. Fredericksburg: ASTM publication; 1993. pp. 37-53.

[39] Hsu CH, Mansfeld F. Technical note: Concerning the conversion of the constant phase element parameter  $Y_0$  into a capacitance. *Corrosion*. 2001; 57(9):747-748. DOI: 10.5006/1.3280607.

[40] Urquidi-Macdonald M, Real S, Macdonald DD. Applications of Kramers—Kronig transforms in the analysis of electrochemical impedance data—III. Stability and linearity. *Electrochimica Acta*. 1990;35(10): 1559-1566. DOI: 10.1016/0013-4686(90) 80010-1 .

[41] Matthew J, Orazem ME. On the application of the Kramers-Kronig relations to evaluate the consistency of electrochemical Impedance data. *Journal Electrochemical Society*. 1991; 138:67-75.