



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

**EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA
ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN**

JULIO HERNAN YEPES JOYA

FUNDACION UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS

BOGOTA D.C.

2022

**EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPREDANCIA
ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN**

**EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPREDANCIA
ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN**

JULIO HERNAN YEPES JOYA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
ingeniero mecánico.

Director(s):

Ing. WILLIAMS STEVE HINCAPIÉ CAMPOS

Magister En Ingeniería De Materiales

Ing. JESUS MANUEL GUTIERREZ BERNAL

Magister En Ingeniería De Materiales

FUNDACION UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS

BOGOTA D.C.

2022

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

Dedicatoria

A Dios por brindarme salud y sabiduría en la formación de mi carrera profesional, a mi madre Yolanda Joya quien me acompañó en gran parte de este camino aportando amor consejos y motivación, a mi esposa Claudia Milena Acosta quien estuvo en los momentos más importantes de la culminación de mi carrera brindándome la experiencia de ser profesional y la ética de manejo, a mis hijos Evan Santiago Yepes y Eimy Valentina Yepes los cuales son mi inspiración motivación y orgullo a continuar con mi desarrollo profesional y poderles brindar ejemplo y conocimiento en sus vidas.

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

Agradecimientos

Encarecidamente a los directores de proyecto Williams Steve Hincapié Campos y

Jesús Manuel Gutiérrez Bernal, quienes han puesto su ayuda en la construcción de este proyecto guiándome en cada paso.

A la Fundación Universitaria Los Libertadores, por darme la oportunidad del conocimiento y crecimiento profesional y graduarme como ingeniero mecánico.

A los docentes que me estuvieron brindando su conocimiento y experiencia en cada una de las materias.

A mis compañeros de carrera los cuales fueron el sostén de cada desarrollo de conocimiento y esperanzas de un mejor futuro.

Mis familiares quienes por medio de la ayuda económica me facilitaron terminar esta carrera.

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

Resumen

Este proyecto se realizó el análisis de una celda de corrosión la cual fue diseñada y fabricada de manera que cumpliera los estándares para hacer ensayos de espectroscopía de impedancia electroquímica, para esto mediante el software solied edge se realizó un diseño amigable y de fácil uso que satisficiera la toma de muestras, fabricado con material teflón y sus conexiones en cobre, ya con este proceso culminado, se valida la fiabilidad de diseño y de fabricación de la celda de corrosión mediante un experimento donde se utilizara como base una pieza válvula ferro cementada de admisión y escape de un motor diésel, sumergida en una solución de agua sal NaCl al 33%, tomadas en un equipo Gamry realizando pruebas Tafel para hacer una correcta caracterización de materiales.

Palabras Clave: celda de corrosión, espectroscopia de impedancia electroquímica, solución de agua sal.

Abstract

This project was carried out the analysis of a corrosion cell which was designed and manufactured in a way that met the standards for electrochemical impedance spectroscopy tests, for this, through the solied edge software, a friendly and easy-to-use design was made that satisfied The sampling, made with Teflon material and its connections in copper, once this process is completed, the reliability of the design and manufacture of the corrosion cell is validated through an experiment where a ferro-cemented intake valve and Exhaust from a diesel engine, submerged in a 33% NaCl salt water solution, taken on a Gamry equipment performing Tafe tests to make a correct characterization of materials.

Key Words: corrosion cell, electrochemical impedance spectroscopy, salt water solution.

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

Contenido

Dedicatoria	III
Agradecimientos.....	IV
Resumen	V
Abstract	V
Lista de Ilustraciones.....	IX
Lista de Tablas	XII
Lista de Diagramas	XIII
Introducción	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
OBJETIVOS.....	3
GENERAL	3
ESPECIFICOS	3
1. Antecedentes	4
2. Marco Teórico.....	6
2.1. Corrosión.....	6
2.2. Algunos Tipos de Corrosión	7
- Corrosión Generalizada	8
- Corrosión Localizada	8

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- Corrosión Galvánica	9
- Corrosión por Fisuras y Limites de Grano.....	9
- Corrosión por Picadura (pitting)	10
- Corrosión por Cavitación.....	10
- Corrosión Microbiológica.....	11
- Corrosión Combinada	11
- Corrosión por Erosión.....	11
- Corrosión por Tensión	12
- Corrosión por Fatiga	12
Otros Tipos de Corrosión	13
- Desaleación	13
- Filiforme	13
- Oxidación.....	13
2.2. Ensayos de Corrosión.....	14
2.3. Celda de corrosión.....	14
- Kit de celda de corrosión K0047	15
- Kit de Celda de Corrosión CCK	15
- Kit estándar de celda de corrosión.....	16
- Celda de laminación KMZ 3/5.....	16
- Kit de celda de corrosión MultiPort.....	17

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

2.4.	Circuito Equivalente.....	17
2.5.	Curvas de Bode y Nyquist.....	18
2.6.	Pendiente De Tafel	19
2.7.	La celda de Randles.....	20
3.	Desarrollo Experimental	22
3.1.	Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).....	22
3.2.	Ensayo de corrosión	23
3.3.	Metodología	24
3.4.	Datos obtenidos del laboratorio.....	25
3.4.1.	Prueba de TAFEL.....	26
3.4.1.1.	Solución de Cloruro de Sodio al 33%.....	26
3.4.1.2.	Corrosión Electroquímica Acuosa.....	26
3.4.1.3.	Materiales:.....	27
3.4.1.4.	Procedimiento:	28
3.4.1.5.	Circuito Equivalente	35
3.5.	Diagnostico.....	45
4.	Conclusiones	45
6.	Bibliografía	46

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

Lista de Ilustraciones

<i>Ilustración 1 Corrosión Generalizada [10]</i>	8
<i>Ilustración 2 Corrosión Galvánica [11]</i>	9
<i>Ilustración 3 Corrosión por Fisuras [12]</i>	9
<i>Ilustración 4 corrosión por Picadura (pitting) [14]</i>	10
<i>Ilustración 5 Corrosión por Cavitación [15]</i>	10
<i>Ilustración 6 Corrosión por Erosión [16]</i>	11
<i>Ilustración 7 Corrosión por Tensión [17]</i>	12
<i>Ilustración 8 Corrosión por Fatiga [18]</i>	12
<i>Ilustración 9 kit de Celda de Corrosión K0047 [19]</i>	15
<i>Ilustración 10 Kit de Celda de Corrosión CCK [20]</i>	15
<i>Ilustración 11 Kit Estándar de Celda de Corrosión [21]</i>	16
<i>Ilustración 12 Celda de Laminación KMZ 3/5 [22]</i>	16
<i>Ilustración 13 Kit de Celda de Corrosión Multiport [23]</i>	17
<i>Ilustración 14 a. El circuito equivalente de un sistema electroquímico con dos constantes de tiempo; b. Diagrama de Nyquist de un modelo de dos constantes de tiempo simulado en el rango de frecuencia 100 kHz – 0.0 1Hz (R0 = 10 Ω, R1 = 20 Ω, C1 = 0.0001 F, R2 = 10 Ω, C2 = 0.1 F); c. Gráfico de Bode de un modelo de dos constantes de tiempo simulado en el rango de frecuencia 100 kHz – 0.01 Hz (R0 = 10 Ω, R1 = 20 Ω, C1 = 0.0001 F, R2 = 10 Ω, C2 = 0.1 F) (◆ $\log Z \sim \log \omega$, (▲) $\vartheta \sim \log \omega$ [3].....</i>	19
<i>Ilustración 15 Gráfico de Tafel para ramas catódicas y anódicas de la curva corriente-voltaje [3]</i>	20
<i>Ilustración 16 Presentaciones gráficas de la celda Randles: a. un circuito equivalente, b. Gráfico de Nyquist, c. Gráfico de magnitud de Bode, d. Gráfico de fase de Bode (Rel = 20 Ω, Rct = 80 Ω, Cdl = 0.001 F) [3]</i>	21
<i>Ilustración 17 Circuito equivalente utilizado literatura para acero AISI 304[25]</i>	23

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

<i>Ilustración 18. Pulidora Metalográfica Fuente (Propia)</i>	25
<i>Ilustración 19 Grafica para el proceso de análisis de corrosión electroquímica Fuente (Propia)</i>	27
<i>Ilustración 20 Plano de ensamble de la Probeta. Fuente (Propia)</i>	29
<i>Ilustración 21 Fotografía de ensamble de probeta interior de la celda Faraday Fuente (propia)</i>	29
<i>Ilustración 22 Grafico de valores en programa Gamry Fuente (Propia)</i>	30
<i>Ilustración 23 Gráficos de Bode de magnitud (azul) y de fase (verde) Fuente (Propia)</i>	30
<i>Ilustración 24 Grafico de Nyquist Fuente (Propia)</i>	31
<i>Ilustración 25 Gráficos en intervalos de Bode de magnitud (●) y de fase (■) Fuente (Propia)</i>	31
<i>Ilustración 26 Gráficos en intervalos de Nyquist Fuente (Propia)</i>	32
<i>Ilustración 27 Gráficos en intervalos de Bode de magnitud (●) y de fase (■) Fuente (Propia)</i>	32
<i>Ilustración 28 Gráficos en intervalos de Nyquist Fuente (Propia)</i>	33
<i>Ilustración 29 Gráficos en intervalos completos de Bode de magnitud (●) y de fase (■) Fuente (Propia)</i>	33
<i>Ilustración 30 Gráficos en intervalos completos de Nyquist Fuente (Propia)</i>	34
<i>Ilustración 31 Reacción anódica y catódica Fuente (Propia)</i>	35
<i>Ilustración 32 Circuito equivalente AISI 304 utilizado para prueba Fuente (Propia)</i>	35
<i>Ilustración 33 Gráfico Circuito equivalente (—), 0 horas de Bode, magnitud (●) y de fase (■), Fuente (Propia)</i>	36
<i>Ilustración 34 Grafico Circuito equivalente (—), 0 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)</i>	36
<i>Ilustración 35 Gráfico Circuito equivalente (—), 1 Hora de Bode, de magnitud (●) y de fase (■),Fuente (Propia)</i>	37
<i>Ilustración 36 Grafico Circuito equivalente (—), 1 Hora de Nyquist (●) Fuente (Propia)</i>	37
<i>Ilustración 37 Gráfico Circuito equivalente (—), 24 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■),Fuente (Propia)</i> 38	
<i>Ilustración 38 Grafico Circuito equivalente (—), 24 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)</i>	38
<i>Ilustración 39 Gráfico Circuito equivalente (—), 48 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■),Fuente (Propia)</i> 39	
<i>Ilustración 40 Grafico Circuito equivalente(—), 48 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)</i>	39
<i>Ilustración 41 Gráfico Circuito equivalente (—), 72 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■),Fuente (Propia)</i> 40	
<i>Ilustración 42 Grafico Circuito equivalente (—), 72 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)</i>	40

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

<i>Ilustración 43</i>	<i>Gráfico Circuito equivalente (-), 168 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■),Fuente (Propia)</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 44</i>	<i>Grafico Circuito equivalente (-), 168 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 45</i>	<i>Gráfico Circuito equivalente (-), 192 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■),Fuente (Propia)</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 46</i>	<i>Grafico Circuito equivalente (-), 192 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 47</i>	<i>Gráfico Circuito equivalente (-), 240 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■),Fuente (Propia)</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 48</i>	<i>Grafico Circuito equivalente (-), 240 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 49</i>	<i>Gráfico Circuito equivalente (-), 336 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■),Fuente (Propia)</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 50</i>	<i>Grafico Circuito equivalente (-), 336 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)</i>	<i>44</i>

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

Lista de Tablas

<i>Tabla 1 Parámetros a 0 horas</i>	36
<i>Tabla 2 Parámetros a 1 hora</i>	37
<i>Tabla 3 Parámetros a 24 horas</i>	38
<i>Tabla 4 Parámetros a 48 horas</i>	39
<i>Tabla 5 Parámetros a 72 horas</i>	40
<i>Tabla 6 Parámetros a 168 horas</i>	41
<i>Tabla 7 Parámetros a 192 horas</i>	42
<i>Tabla 8 Parámetros a 240 horas</i>	43
<i>Tabla 9 Parámetros a 336 horas</i>	44
<i>Tabla 10 Diagnóstico de causa de corrosión</i>	45

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

Lista de Diagramas

<i>Lista de Diagramas 1 Tipos de Corrosión [8].....</i>	<i>7</i>
<i>Lista de Diagramas 2. Flujograma de experimentación de este proyecto. Fuente (propia).....</i>	<i>24</i>

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

Introducción

Por naturaleza los materiales de uso de ingeniería sufren diversos tipos de deterioro debido a su uso o desgaste natural, entre ellos encontramos que hay uno que se llama corrosión, que se debe básicamente a la oxidación química o electroquímica del material, este deterioro de los materiales es consecuencia del ataque químico, físico y biológico en contacto con el entorno. La intensidad del deterioro depende de las características del sustrato¹, de los agentes agresivos, factores externos como temperatura, velocidad de flujo y efectos mecánicos [1]. Utilizando la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) por sus siglas en inglés (electrochemical impedance spectroscopie), la cual es una técnica en donde una señal de corriente alterna es usada como estímulo de frecuencia variable a una cierta amplitud de señal, registrando la respuesta ha dicho estímulo [2]. La espectroscopía de impedancia electroquímica es empleada tradicionalmente en el registro y estudio de los procesos de corrosión y electrodeposición², en la evaluación de recubrimientos y la caracterización de muchos tipos de sensores y semiconductores. Para comprender la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), se deben de tener conocimientos en la electrónica, como lo son los comportamientos de los elementos del circuito, en circuitos de corriente continua (CD) y corriente alterna (CA), álgebra compleja, impedancia eléctrica [3]. Su superioridad sobre otras técnicas de laboratorio radica en que utiliza una pequeña señal, generalmente en el modo de tensión, minimizando así las alteraciones de las propiedades del medio, en otras palabras, la estimulación aplicada no altera las condiciones de equilibrio del sistema. En consecuencia, la espectroscopía de impedancia

¹ El sustrato es un extracto que subyace a otro y sobre el cual está en condiciones de ejercer algún tipo de influencia.

² Es un proceso electro-químico donde se realiza un recubrimiento a una pieza con un sistema de ánodo y cátodo, sumergiendo dicha pieza en un baño químico y aplicando cargas eléctricas debidamente calculadas para cubrir o depositar una capa protectora o decorativa a la pieza.

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

electroquímica es una técnica no destructiva que proporciona mediciones robustas[4]. Con esto se quiere determinar la resistencia del material de válvula de admisión y escape de motor diésel a la corrosión evaluado en determinados tiempos.

JUSTIFICACIÓN

Se realiza esta investigación para realizar el diseño y fabricación de una celda de corrosión que sea capaz de dar respuesta mediante la técnica espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) a los ensayos de corrosión. En la actualidad la universidad cuenta con un equipo Gamry el cual tiene un precio comercial de cuarenta y cinco millones de pesos, (Precio de compra hace 6 años), el cual se utiliza para formación de materias de la temática de corrosión o de película delgadas y para proyectos de grado, pero en la actualidad no contaba con una celda que cumpliera los requerimientos para que los resultados fueran repetibles.

Ya que la universidad no cuenta con una celda que cumpla con los criterios técnicos que permitan tomar valores fiables de la toma de datos, y una celda de estas características en el mercado se comercializan entre los mil dólares (USD 1.000).

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

OBJETIVOS

GENERAL

Diseñar y fabricar una celda de corrosión para ensayos de la técnica espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

ESPECIFICOS

1. Fabricar la celda de corrosión, a través de planos.
2. validar la celda de corrosión a través de experimentos de un material de válvula de admisión y escape de motor diésel, usando NaCl al 33% de una solución de agua sal.
3. Analizar los resultados obtenidos mediante la trazabilidad utilizando la técnica espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) por sus siglas en inglés, el comportamiento de una pieza de metal válvula de admisión y escape de motor diésel

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

1. Antecedentes

Dada las circunstancias del medio en el cual se quiere trabajar donde el fluido NaCl al 33% de una solución de agua sal, el cual simula un medio marino, pudiesen hacer corroer un material, se da un informe donde se especifique con que tiempo y afectación se corroe un material de tipo válvula de motor AISI 304, con este fluido. Es necesario hacer pruebas TAFEL³ para hacer una correcta caracterización de materiales y la universidad cuenta con un potenciostato marca Gamry, pero no tiene una celda adecuada para que los resultados sean repetibles, al fabricar la celda de corrosión aumentaría su planta física y de equipos para tener un mayor campo de acción para este tipo de ensayos, además de dar un diseño de optima resistencia de una celda para corrosión para ensayo EIS, que estará fabricada con teflón.

Se han hecho junto con el ingeniero William S. Hincapie y Jesus M. Gutierrez ensayos piloto con el fluido Biodiesel para determinar si el equipo GAMRY puede pasar corriente a través de él, dadas sus características este compuesto podría tener limitaciones lo cual se corrobora en el laboratorio ya que no genero ningún tipo de señal, por ende se manejó el compuesto de NaCl al 33% de una solución agua sal, el cual se sabe que es un buen conductor, con estos compuestos se pretenden analizar para demostrar su comportamiento frente a la pieza a tratar (válvula de admisión y escape de un motor diésel), Otra de las limitaciones de la técnica EIS, es que a pesar de tener ventajas sobre otras, no se trata de un método perfecto de análisis y tiene algunas limitaciones conocidas. Una está relacionada con el tiempo necesario para llevar a cabo un

³ En 1905, Julius Tafel descubrió que el sobre potencial estaba relacionado con la densidad de corriente (i), relaciona la velocidad de una reacción electroquímica con el sobrepotencial. La pendiente de la línea se llama pendiente de Tafel. Cuanto mayor sea la pendiente de Tafel, más lenta será la cinética de reacción del electrodo.

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

ensayo completo. El ensayo consiste en un barrido de frecuencias desde frecuencias altas a frecuencias muy bajas, esperando cada vez a la estabilización del sistema antes de hacer sus medidas, por lo que se especula las medidas tomadas inicialmente sean más lentas ante las frecuencias altas, lo que podría estar afectando la duración del ensayo[5]. Esta técnica también utilizada para evaluar los parámetros usando corriente alterna, consiguiendo la excitación de la interface con una señal de voltaje AC de amplitud fija, pero variando la frecuencia en un rango que va desde los KHz hasta los mHz.[6] Consecuentemente, la espectroscopia de impedancia electroquímica es una técnica no destructiva que proporciona mediciones robustas, esta impedancia electroquímica usualmente se obtiene aplicando un potencial de corriente alterna a una celda electroquímica y midiendo la corriente a través de la celda. La respuesta a este potencial sinusoidal de excitación es una señal de corriente alterna que puede ser analizada como la suma de funciones sinusoidales.[7]

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

2. Marco Teórico

En esta parte del trabajo se hablará de la terminología y las ecuaciones utilizadas para la realización del proyecto, en la que basaremos lo que es la corrosión, los tipos de corrosión, ensayos de corrosión y las curvas de bode y Nyquist.

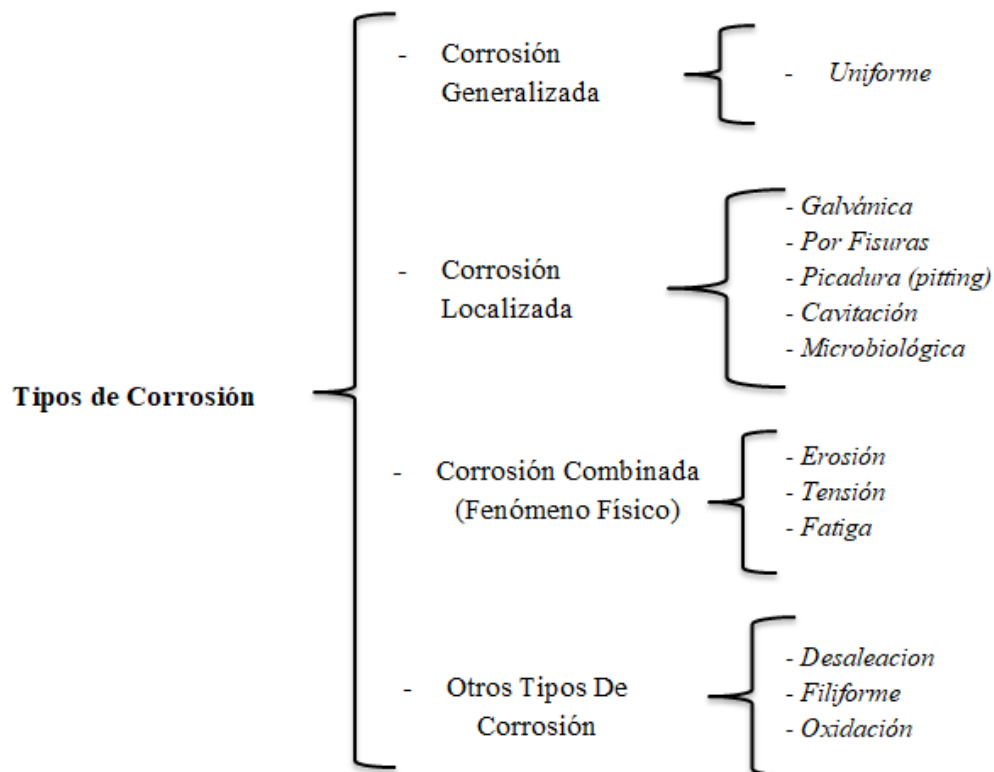
2.1. Corrosión

La corrosión se describe como el proceso de deterioro de materiales metálicos (incluyendo tanto metales puros, como aleaciones de estos), mediante reacciones químicas y electroquímicas. Para el caso del deterioro relacionado con otros tipos de materiales, como los polímeros y cerámicos, se utiliza el término degradación. Los productos formados en la reacción son los que se extrajeron del metal en el proceso metalúrgico de obtención del metal. Cada metal presenta distinta tendencia a corroerse, la mayoría se encuentra en la naturaleza en formas de óxidos, sulfuros, carbonatos y otros compuestos complejos [8]. Pero no todos los metales tienen la misma tendencia a corroerse, los elementos puros como el oro y el platino, poseen bajo potencial electroquímico, por lo tanto, son muy difíciles de corroer, mientras los metales base como el cobre o el hierro se corroen más fácilmente. Esto se debe a su configuración electrónica, ya que esta determina la energía de cada átomo que surge de energías de correlación, debidas principalmente a interacciones entre electrones, afectando su campo electrostático, y a su vez, se relaciona con la reactividad química o con la tendencia del metal para cambiar de un estado libre a un estado de ion metálico[9].

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

2.2. Algunos Tipos de Corrosión

Existen muchos tipos de procesos de corrosión diferentes que se caracterizan dependiendo tanto de la naturaleza del material y de las condiciones del medioambiente donde se desarrollen. Una forma común de clasificar los tipos de corrosión, es mediante las siguientes cuatro categorías: corrosión generalizada, corrosión localizada, corrosión combinada con un fenómeno físico, y otros tipos [8].



Lista de Diagramas 1 Tipos de Corrosión [8]

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- Corrosión Generalizada

La corrosión generalizada, también nombrada como corrosión uniforme, ocurre sobre toda la superficie del material de forma homogénea, deteriorándolo completamente. Este tipo de corrosión es el que mayor pérdida de material provoca, pero es relativamente fácil de predecir y controlar, por lo que un accidente producido por este es de rara ocurrencia. Se puede observar comúnmente en materiales, sobre todo en la industria de la construcción, a base de hierro no aleado con metales inoxidables, como el níquel y el cromo. La velocidad de corrosión para estos casos, es altamente influenciada por la existencia de impurezas y fases distintas en el material, ya que estas inducen a una variación en la energía potencial, formando electrodos a pequeña escala, propiciando el proceso de corrosión [8].



Ilustración 1 Corrosión Generalizada [10]

- Corrosión Localizada

La corrosión localizada, representa un mayor riesgo potencial, debido a su difícil detectabilidad ya que se manifiesta en zonas específicas en el material, determinadas tanto por la naturaleza del material, la geometría de este, y las condiciones del medio al que se somete. Los procesos de corrosión localizada de mayor ocurrencia son: galvánica, por fisura, por picaduras, por cavitación y microbiológica [8].

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- Corrosión Galvánica

La corrosión galvánica ocurre cuando existe una unión, física o eléctrica, entre metales con diferente potencial de oxidación, lo cuales, en la presencia de un electrolito, forman una celda electroquímica, donde el material de menor potencial electroquímico es el que se corroe [8].



Ilustración 2 Corrosión Galvánica [11]

- Corrosión por Fisuras y Limites de Grano

Este tipo de corrosión es similar a la corrosión galvánica, que se produce en zonas estrechas donde la concentración de oxígeno es mucho menor que en el resto del sistema, y cuyo efecto induce a que estas zonas de menor concentración de oxígeno actúen como un ánodo, propiciando el proceso de corrosión, en las fisuras. Esta corrosión sucede también en los límites de grano los cuales son caminos para que los electrolitos andes y suceda más rápido la corrosión [8].



Ilustración 3 Corrosión por Fisuras [12]

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- Corrosión por Picadura (pitting)

Corrosión por picaduras, se presenta en materiales pasivados⁴, como los aceros inoxidable que son influenciados significativamente por su composición química, la que a su vez determina las características micro estructurales de estas aleaciones, tales como el aluminio ya que es altamente susceptible a procesos de corrosión alcalina localizada [13], debido a las características geométricas del sistema, existe una acumulación de agentes oxidantes y un incremento del pH del medio, lo que propicia el deterioro de la capa pasivada, permitiendo que la corrosión se desarrolle en éstas zonas puntuales [8].

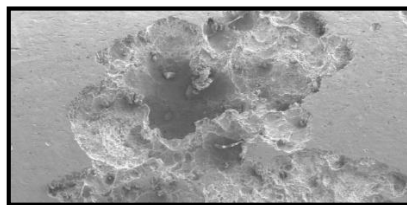


Ilustración 4 corrosión por Picadura (pitting) [14]

- Corrosión por Cavitación

Ocurre en sistemas de transporte de líquidos, hechos de materiales pasivados, donde por cambios de presión en el sistema, se producen flujos turbulentos que genera que la presión se baje a límites de evaporación del fluido transportado y estas burbujas se transportan durante el recorrido y explotan generando la corrosión por cavitación [8].



Ilustración 5 Corrosión por Cavitación [15]

⁴ La pasivación es la formación de una película relativamente inerte sobre la superficie de un material

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- Corrosión Microbiológica

En realidad, no es un tipo de corrosión en sí, sino que más bien es un fenómeno que facilita el desarrollo de otros procesos de corrosión. Las bacterias son los microorganismos más influyentes en este caso, por lo que también es conocida como corrosión bacteriana y se produce en sistemas de transporte de líquido, facilitando la corrosión por picaduras [8].

- Corrosión Combinada

Este tipo de corrosión también se puede incluir dentro de la clasificación de corrosión localizada, pero la diferencia con estos es que se encuentran condicionados por la presencia de un fenómeno físico, que funciona como iniciador del proceso de corrosión [8].

- Corrosión por Erosión

Este tipo de corrosión se observa en sistema de transportes de fluidos hechos con materiales pasivados, donde existen partículas de mayor dureza que la capa de pasivación. Estas partículas al estar en movimiento, erosionan la capa pasivada, permitiendo que el proceso de corrosión se desarrolle [8].



Ilustración 6 Corrosión por Erosión [16]

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- Corrosión por Tensión

Ocurre cuando en un material, sometido a esfuerzo de tensión, ya sea de forma interna o externa, se forman pequeñas fisuras, que dan inicio al proceso de corrosión. El material que permanece en ambos fenómenos, se deteriora con mayor rapidez, ya que la corrosión debilita el material, lo cual permite que la tensión tenga mayor impacto, fracturando en mayor medida el material [8].

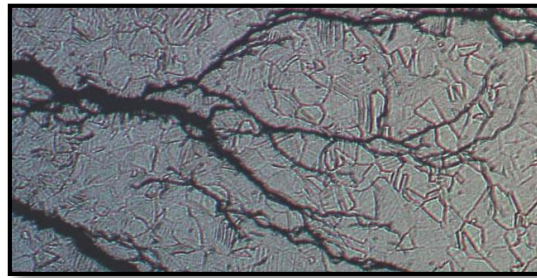


Ilustración 7 Corrosión por Tensión [17]

- Corrosión por Fatiga

Este proceso se desarrolla en materiales, sujetos a esfuerzos externos, similar al de tensión, con la diferencia de que estos esfuerzos son cíclicos o fluctuantes. De igual forma que con el proceso de tensión, el material se deteriora en mayor medida mediante la combinación de los dos fenómenos, comparado a cada uno por separado [8].



Ilustración 8 Corrosión por Fatiga [18]

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

Otros Tipos de Corrosión

También existen muchos tipos de corrosión que no caen dentro de las categorías anteriores.

Algunos de estos son, la desaleación, la corrosión filiforme y la oxidación [8].

- Desaleación

La desaleación es un proceso de corrosión que actúa sobre aleaciones metálicas, en donde uno de los elementos, de mayor afinidad con el oxígeno, se separa de la aleación y dejan una estructura porosa de pobres propiedades conformada por el resto de constituyentes. El proceso se nombra alternativamente respecto al elemento que se separa de la aleación como, por ejemplo, la descincificación para el latón, aleación que sufre comúnmente de este tipo de corrosión, en la cual se separa el zinc de la matriz cobre [8].

- Filiforme

La corrosión filiforme se presenta en ambientes de alta humedad sobre materiales con recubrimientos orgánicos (pinturas), los cuales al ser rayados, se induce el desarrollo de la corrosión, que se propaga como filamentos delgados [8].

- Oxidación

La oxidación es un tipo de corrosión que se desarrolla en procesos de alta temperatura, en la presencia de algún gas oxidante, como el oxígeno, azufre y elementos halógenos. Las reacciones relacionadas son meramente químicas al no existir un electrolito de por medio, por lo que también se conoce como corrosión seca. Las moléculas del gas oxidante reaccionan con el material involucrado, donde, por efecto de la temperatura, el compuesto formado se difunde al interior del material, permitiendo que el proceso continúe, fragilizando el material.

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

2.2. Ensayos de Corrosión

Teniendo en cuenta que los ensayos para determinar los diferentes factores de corrosión se basan en el ambiente en el que se rodean como lo son las películas de sal, el ambiente oxidante o el estado cambiante de las industrias y la necesidad de la creación de nuevos materiales, además del inminente crisis energética debido esencialmente a el agotamiento de las reservas de petróleo, se han desarrollado técnicas, a nivel industrial, de equipos que utilizan la técnica LPR (Lineal Resistance Polarization) y Tafel, para evaluar grados de deterioro in-situ de materiales, eficiencia de inhibidores, grados de des-pasivación producidos por bacterias etc [6]. Además de la técnica espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) por sus siglas en inglés, empleada tradicionalmente en el registro y estudio de los procesos de corrosión y electrodeposición, en la evaluación de recubrimientos, Su superioridad sobre otras técnicas de laboratorio radica en que utiliza una pequeña señal, generalmente en el modo de tensión, minimizando así las alteraciones de las propiedades del medio [7].

Para poder saber si un proceso de corrosión es bueno, es necesario e imperativo tener una celda de corrosión calibrada estandarizada, que permita hacer que los ensayos sean repetibles.

2.3.Celda de corrosión

Es el instrumento que se utiliza para poner los tres electros el contra electrodo el de referencia y el de trabajo, determinados en ciertas posiciones para poder adquirir los resultados.

Comercialmente se han establecido diferentes tipos de celdas, las cuales están en costos de los mil dólares, (USD 1.000) para el análisis del comportamiento físico de varios tipos de materiales sometidos a la corrosión se enfatiza en una celda de corrosión que es la que permite, mediante el equipo necesario dar a conocer dicho comportamiento, entre estas celdas encontramos:

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- **Kit de celda de corrosión K0047**

Fabricado y distribuido por *bluescientific*, este kit sirve para analizar muestras de metal en ambientes corrosivos [19].



Ilustración 9 kit de Celda de Corrosión K0047 [19]

- **Kit de Celda de Corrosión CCK**

El kit de celda de corrosión de la serie CCK se basa en un matraz de reacción de vidrio estándar de 1 litro, 500 ml o 100 ml. Todas las partes húmedas están hechas de materiales químicamente resistentes tales como Teflón [20].



Ilustración 10 Kit de Celda de Corrosión CCK [20]

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- **Kit estándar de celda de corrosión**

Los kits consisten en celdas de vidrio (también disponibles en versión de doble camisa para estabilización de temperatura), electrodos, tapas adaptadas para el montaje de electrodos y otros accesorios necesarios durante las mediciones [21].



Ilustración 11 Kit Estándar de Celda de Corrosión [21]

- **Celda de laminación KMZ 3/5**

La celda de medición KMZ 5 podría ser termostatzada mediante el uso de un recipiente de vidrio de doble pared. De este modo, está disponible una configuración de medición completa para esas mediciones incluso a temperaturas más altas [22].



Ilustración 12 Celda de Laminación KMZ 3/5 [22]

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- **Kit de celda de corrosión MultiPort**

Es una celda electroquímica de un litro que está diseñada para maximizar la flexibilidad. Su exclusivo diseño de dos piezas puede acomodar una amplia gama de geometrías de muestra y facilita la limpieza [23].



Ilustración 13 Kit de Celda de Corrosión Multiport [23]

2.4.Circuito Equivalente

El análisis de datos EIS se lleva a cabo comúnmente ajustándolo a un modelo de circuito eléctrico equivalente. Un modelo de circuito equivalente es una combinación de resistencias, capacitancias y / o inductancias, así como algunos elementos electroquímicos especializados en el modelo, cada componente del circuito proviene de un proceso físico en la celda electroquímica y tiene un comportamiento de impedancia característico. La forma del espectro de impedancia del modelo está controlada por el estilo de los elementos eléctricos en el modelo y las interconexiones entre ellos. El circuito equivalente debe ser lo más simple posible para representar el sistema electroquímico y debe proporcionar la mejor coincidencia posible entre la impedancia del modelo y la impedancia medida del sistema.

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

2.5. Curvas de Bode y Nyquist

El espectro de impedancia de un sistema electroquímico, se puede presentar en los gráficos de Nyquist y bode, que son las representaciones de la impedancia en función de la frecuencia. Dado el apoyo en graficas medido en KHz, normal mente se utilizan señales de corriente alterna aplicada a un electrodo [3]. El diagrama de bode representa el régimen permanente de un sistema lineal invariante en el tiempo, se varían en una escala sinodal cuando varía el valor de la frecuencia, hasta cubrir el rango que se quiere manejar. La representación de la respuesta en frecuencia del sistema en lazo abierto se hace mediante dos gráficas para magnitud (escala logarítmica “ $\log |Z| - \log w$ ”) y para fase (escala lineal “ $\phi - \log w$ ”). Ambas gráficas generalmente comienzan en una frecuencia alta y terminan en una frecuencia baja, lo que permite que la resistencia inicial se encuentre más rápidamente [24] El diagrama de Nyquist en el procesamiento de señales para evaluar la estabilidad de un sistema con retroalimentación, representado por un gráfico en coordenadas polares. para el conjunto de datos experimentales $Z(Z_{re j}, Z_{imj}, w_i)$, ($i=1, 2, \dots, n$) de n puntos medidos en diferentes frecuencias, donde cada punto representa lo real y lo imaginario [3]. La ilustración 14 muestra un ejemplo de espectro de impedancia de un sistema electroquímico con dos constantes de tiempo. La ilustración a, b y c son el circuito equivalente, el diagrama de Nyquist simulado y el diagrama de Bode, respectivamente.

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

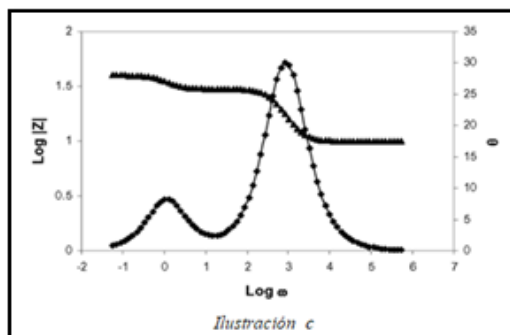
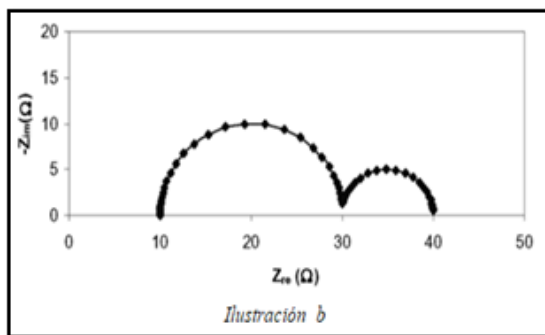
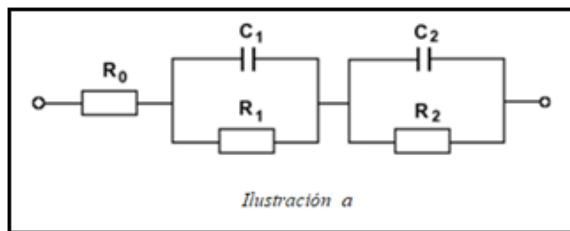


Ilustración 14 a. El circuito equivalente de un sistema electroquímico con dos constantes de tiempo; **b.** Diagrama de Nyquist de un modelo de dos constantes de tiempo simulado en el rango de frecuencia 100 kHz – 0.01 Hz ($R_0 = 10 \Omega$, $R_1 = 20 \Omega$, $C_1 = 0.0001 \text{ F}$, $R_2 = 10 \Omega$, $C_2 = 0.1 \text{ F}$); **c.** Gráfico de Bode de un modelo de dos constantes de tiempo simulado en el rango de frecuencia 100 kHz – 0.01 Hz ($R_0 = 10 \Omega$, $R_1 = 20 \Omega$, $C_1 = 0.0001 \text{ F}$, $R_2 = 10 \Omega$, $C_2 = 0.1 \text{ F}$) (\blacklozenge $\log |Z| \sim \log \omega$, (\blacktriangle) $\theta \sim \log \omega$ [3].

2.6. Pendiente De Tafel

Esta técnica se mide experimentalmente, en el intercambio de corriente que es la velocidad en donde las especies oxidadas transfieren electrones con electrodo, siendo estas la densidad de la polarización, alcanzando una respuesta en corriente en función sobre el potencial aplicado, proporcionando información acerca del material en su capacidad para pasivarse, en un determinado medio [9], este potencial está relacionado con la densidad de corriente ($n = a \log i / i_0$), (a) es la constante en un cierto rango, el sobrepotencial depende linealmente del logarítmico de la densidad de corriente, la densidad de corriente de intercambio se puede obtener de la intersección en el eje de densidad de corriente. La pendiente de la línea se llama pendiente de

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

Tafel. Cuanto mayor sea la pendiente de Tafel, más lenta será la cinética de reacción del electrodo. Se presentan las ecuaciones reordenadas para la relación directa ($n = - (2.303 RT / \alpha n_{\alpha} F) \log i / i_0$) y la relación hacia atrás ($n = (2.303 RT / (1-\alpha) n_{\alpha} F) \log i / i_0$) en la ilustración 15 se muestra la gráfica de la curva de Tafel para ramas catódicas y anódicas de la curva corriente-voltaje [3].

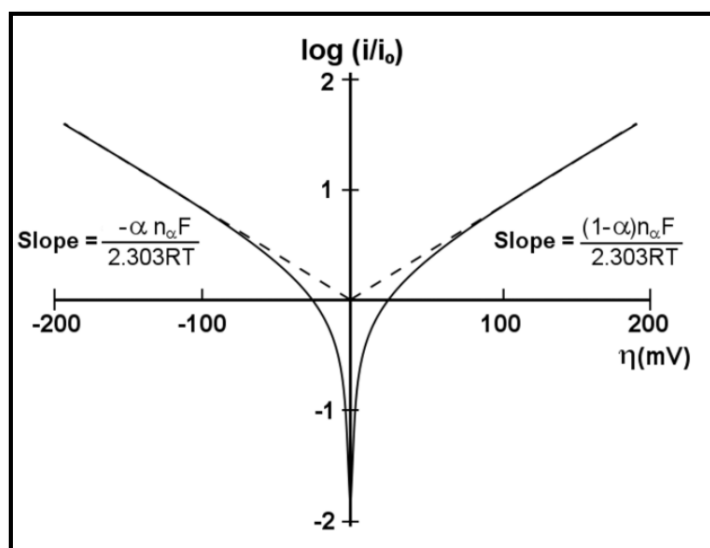


Ilustración 15 Gráfico de Tafel para ramas catódicas y anódicas de la curva corriente-voltaje [3]

2.7. La celda de Randles

El modelo más simple y más común de una interfaz electroquímica es un circuito Randles. El circuito equivalente y las gráficas de Nyquist y Bode para una celda Randles se muestran en la ilustración 16. El circuito incluye una resistencia a los electrolitos (a veces resistencia a la solución), una capacidad de doble capa y una resistencia de transferencia de carga. Como se ve en la ilustración 16 (a), R_{ct} es la resistencia de transferencia de carga del proceso del electrodo, C_{dl} es la capacitancia de la doble capa y R_{el} es la resistencia del electrolito. La capacidad de doble capa está en paralelo con la resistencia de transferencia de carga. La trama de Nyquist de

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

una celda de Randles es siempre un semicírculo. A altas frecuencias, la impedancia de C_{dl} es muy baja, por lo que la impedancia medida tiende a R_{el} . A frecuencias muy bajas, la impedancia de C_{dl} se vuelve extremadamente alta y, por lo tanto, la impedancia medida tiende a $R_{ct} + R_{el}$. En consecuencia, a frecuencias intermedias, la impedancia cae entre R_{el} y $R_{ct} + R_{el}$. Por lo tanto, la intersección de alta frecuencia está asociada con la resistencia del electrolito, mientras que la intersección de baja frecuencia corresponde a la suma de la resistencia de transferencia de carga y la resistencia del electrolito.

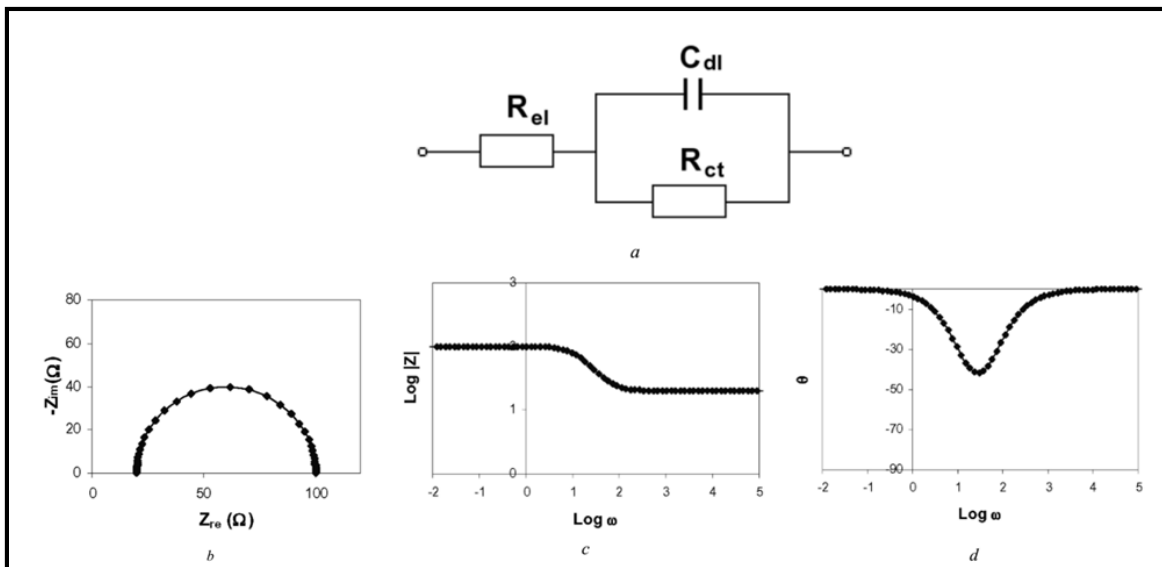


Ilustración 16 Presentaciones gráficas de la celda Randles: **a.** un circuito equivalente, **b.** Gráfico de Nyquist, **c.** Gráfico de magnitud de Bode, **d.** Gráfico de fase de Bode ($R_{el} = 20 \Omega$, $R_{ct} = 80 \Omega$, $C_{dl} = 0.001 \text{ F}$) [3]

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

3. Desarrollo Experimental

3.1. Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)

La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), es una técnica electroquímica en donde una señal de corriente alterna es usada como estímulo de frecuencia variable a una cierta amplitud de señal, registrando la respuesta ha dicho estímulo. Al emplear una señal de corriente alterna, se involucran propiedades como: magnitud de potencial, amplitud de señal y una frecuencia característica que cambia con respecto al tiempo [9]. Un modelado EIS se realiza generalmente a través de un circuito eléctrico equivalente (CE), que es un conjunto de elementos de circuito, en representación de las características físicas y eléctricas de la interfaz electroquímica.

Para el análisis de los componentes del CE se usó la metodología aplicada por Jhon Olaya. y Wilson Hernández [25]. Quienes describen que el circuito equivalente que mejor modela el sistema es el que se muestra en la ilustración 17, el cual consta de los siguientes elementos. La capacitancia del recubrimiento (Q_c), la resistencia a la solución del electrolito de ensayo (R_s), la cual se origina a partir de la conductividad eléctrica finita del electrolito entre los electrodos de trabajo y de referencia. Para los estudios de recubrimientos orgánicos, el electrolito es muy conductor, por lo que R_s suele ser muy baja (1-50 ohmios) y puede ser ignorada [26]. La capacitancia de doble capa (Q_{dl}), la cual se debe al fenómeno presentado cuando un material conductor se coloca en un electrolito.

Esta capacitancia de interfaz se ha denominado (Q_{dl}) La correspondiente resistencia de transferencia de carga (R_{ct}), la cual se debe a que algunas cargas logran filtrarse a través de la doble capa debido a las reacciones, electroquímicas que tienen lugar en la interfaz. La resistencia

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

del poro (R_{pore}) en el recubrimiento, refleja el grado en que la película forma una barrera que impide la conducción electrolítica. La penetración de electrolitos puede ocurrir a través de poros microscópicos reales y/o “poros virtuales”, que pueden ser regiones de baja reticulación y, por lo tanto, un alto transporte.

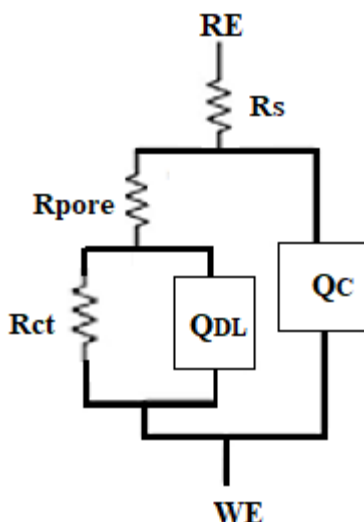


Ilustración 17 Circuito equivalente utilizado literatura para acero AISI 304[25]

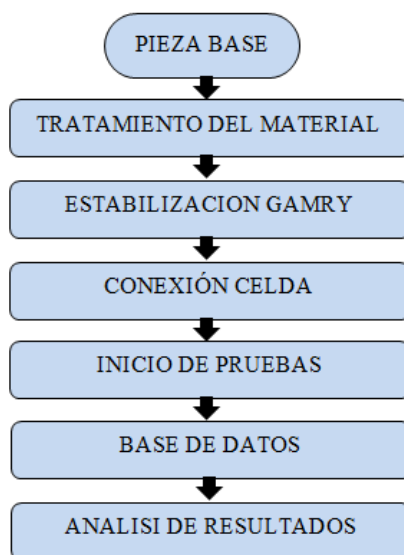
3.2. Ensayo de corrosión

Para el análisis de la celda de corrosión se parte con que la universidad cuenta con un equipo GAMRY instrumento de referencia interface 1000TM, el cual sirve para hacer diferentes ensayos, en la actualidad la universidad solo cuenta con una celda de corrosión, la cual es útil para hacer el ensayo TAFEL (polarización potencio dinámica), por lo cual se ve la necesidad de diseñar una celda de corrosión que satisfaga ese requerimiento, evidenciando la falencia para hacer ensayos de espectroscopia de impedancia electrodinámica la cual complementa la primera técnica. La celda de corrosión con la que se cuenta la universidad solo sirve para hacer ensayos potencio dinámicos, faltando una celda para hacer ensayos EIS por sus siglas en inglés

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

(electrochemical impedance spectroscopy). se ve la necesidad de hacer una celda de corrosión con los recursos disponibles que cuenta la universidad.

Para desarrollar la parte experimental de este proyecto, se planteó el procedimiento expuesto en el siguiente diagrama.



Lista de Diagramas 2. Flujograma de experimentación de este proyecto. Fuente (propia)

3.3. Metodología

Antes de realizar el análisis de corrosión, la pieza de válvula de admisión y escape que esta adecuada para la experimentación, pasa por un proceso de lijado, y pulido iniciando la preparación de la pieza para los análisis correspondientes a pruebas de corrosión, en el laboratorio se realizó el siguiente procedimiento para toma de datos:

1. Inicial mente se realiza un proceso de lavado con el fin de remover impurezas grasas y aceites usando como solvente orgánico ácido clorhídrico (6N HCl).
2. Posterior mente se realiza el pulido de la pieza con lijas de agua con tamaño de grano 100, 150, 220, 400, 1000 y 1200 en dirección perpendicular a las líneas del anterior lijado, con

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

el fin de reducir irregularidades en la parte que será expuesta a la experimentación, hasta obtener una superficie óptima.

3. En la máquina de pulido, se utilizó un paño con alúmina hasta obtener brillo espejo de la piezas, teniendo cuidado que la presión ejercida en la pieza no sea excesiva para evitar rayones no deseados. Esta operación se realizó a 182 revoluciones por minuto con constante suministro de una suspensión de alúmina con agua.



Ilustración 18. Pulidora Metalográfica Fuente (Propia)

4. Se inicia el proceso de calibración del equipo gamry (30 minutos)
5. Se inicia posicionamiento de pieza en celda de corrosión para calibración de equipo, mediante la colocación en vaso de ensayo alojado en una celda de Faraday para estabilizar y proteger campos eléctricos estáticos.

3.4.Datos obtenidos del laboratorio

En este proyecto de grado, la pieza de estudio fue llevada al laboratorio de la fundación Universitaria Los Libertadores y con la calibración del equipo se da inicio a las pruebas de corrosión en la pieza de metal válvula de motor diésel, comenzando pruebas con intervalos de 0,

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

1, 24, 48, 72, 168, 192, 240 y 336 horas respectivamente, obteniendo datos en el equipo Gamry en lo cual serán de estudio del comportamiento de la pieza, sumergida en el fluido NaCl al 33% de una mezcla de agua sal simulando un medio marino.

3.4.1. Prueba de TAFEL

3.4.1.1. Solución de Cloruro de Sodio al 33%

Por medio de la prueba tafel se puede determinar la velocidad de corrosión de un material de forma instantánea. En esta investigación se empleó una pieza de metal AISI 304, cuya área analizada se sometió en solución acuosa de cloruro de sodio al 33%, mediante la extrapolación de la pendiente de TAFEL.

3.4.1.2. Corrosión Electroquímica Acuosa.

Para que se genere una acción de corrosión electroquímica, se hace necesario emplear cuatro componentes que interactúen entre sí.

- Un electrolito.
- Un ánodo.
- Un cátodo.
- Un conductor eléctrico (metal).

Cuando interactúan, se forma un flujo de corriente por medio del electrolito a los conductores eléctricos que se entrelazan con el ánodo y el cátodo, dado el caso se interrumpe o se pierde la señal de corriente el proceso de corrosión se detendrá.

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

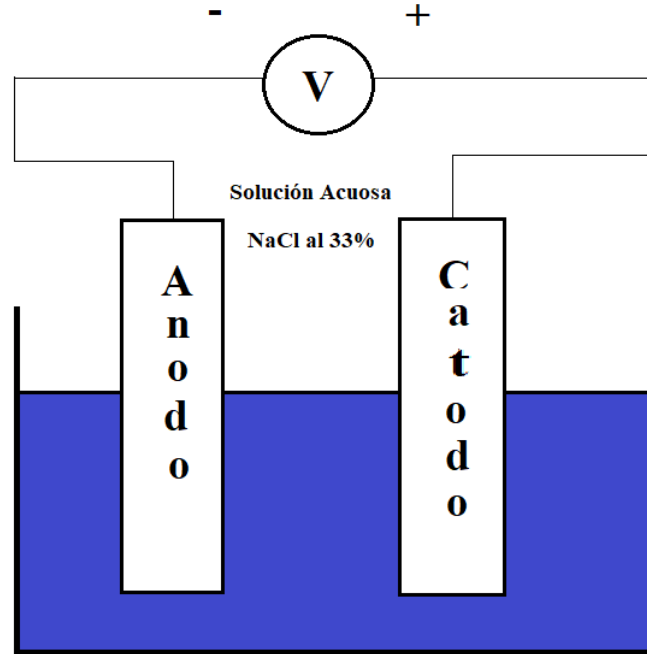


Ilustración 19 Grafica para el proceso de análisis de corrosión electroquímica Fuente (Propia)

3.4.1.3. Materiales:

- Electrodo de trabajo: lamina de acero Inoxidable 304.
- Electrodo de referencia.
- Contra electrodo o electrodo auxiliar en grafito.
- Conexiones tipo caimán.
- Celda de Faraday (para estabilizar y proteger campos eléctricos estáticos).
- Algodón
- Guantes
- Solución salina NaCl al 33%

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- Potenciostato.
- Celda en Teflon.
- Jeringas de 1 CM, para inyectar la solución salina o el ACPM a través del O-RING a la probeta.

3.4.1.4.Procedimiento:

1. Usando guantes de Nitrilo durante toda la práctica, se inicia el proceso de limpieza de los electrodos, con jabón neutro y algodón, teniendo en cuenta que las piezas no deben tener contacto directo con la mano u otro agente externo que pueda contaminar los electrodos.
2. Se verifica que la probeta (pieza de válvula) que no contenga ningún tipo de contaminación y o líneas de rayado o desgaste ajenos al brillo espejo.
3. Se calibra y se inicia la estabilización del potenciostato marca GAMRY, 30 minutos antes de realizar el análisis, usando la celda de Faraday.
4. Se ensamblan los electrodos de acuerdo al siguiente plano como referencia.

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

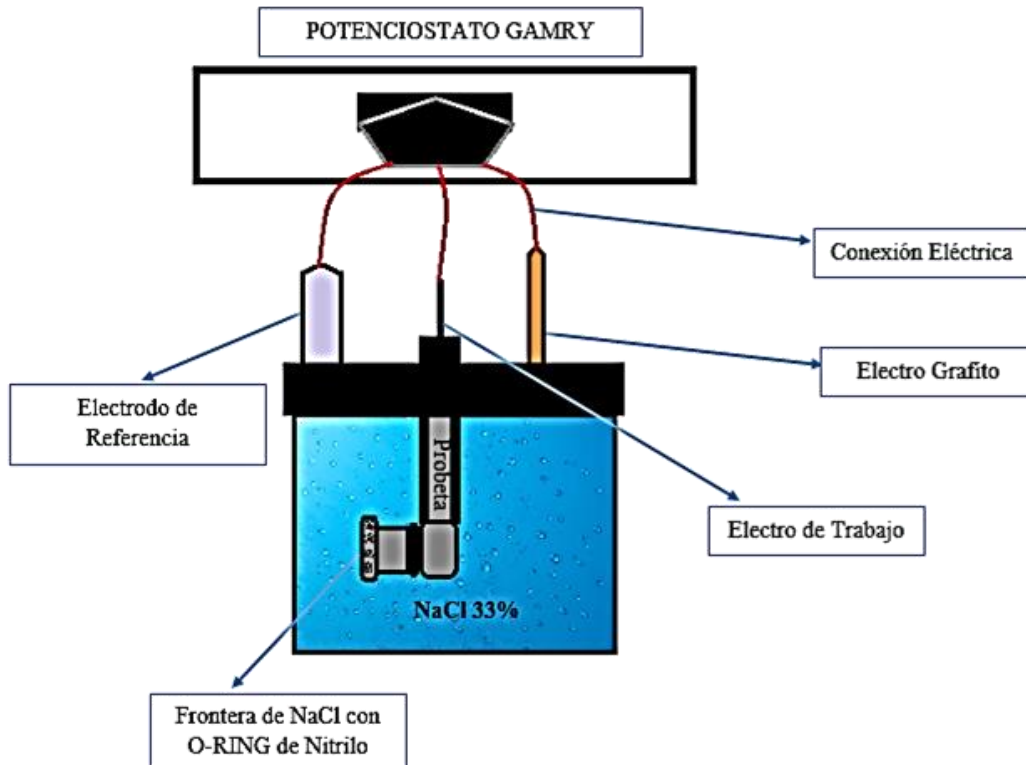


Ilustración 20 Plano de ensamble de la Probeta. Fuente (Propia)

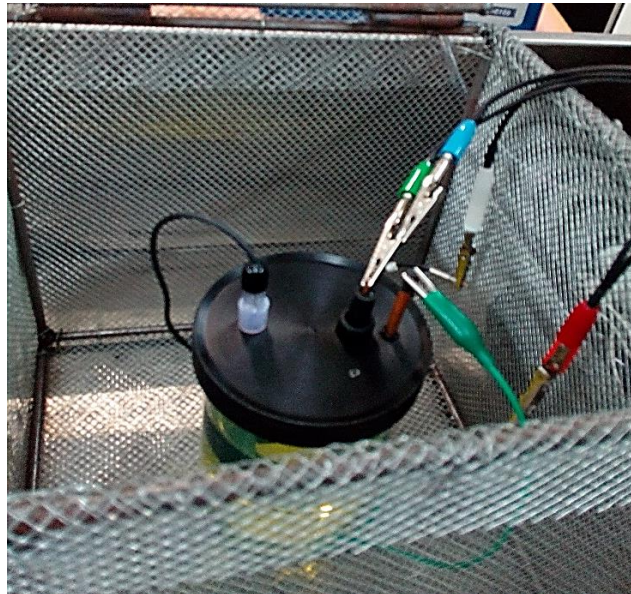
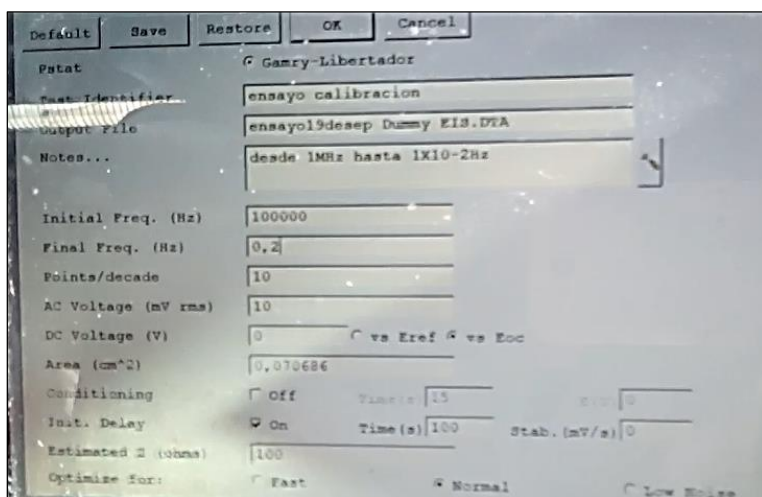


Ilustración 21 Fotografía de ensamble de probeta interior de la celda Faraday Fuente (propia)

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

5. Se verifica que las conexiones de los electrodos (referencia, de trabajo y auxiliar), se encuentren correctamente empalmados con el potenciostato.
6. Se enciende el potenciostato y se establecen las condiciones de prueba por medio del software de análisis de acuerdo a los siguientes valores:



- El rango de corriente va de 1,000 nA hasta 1,000 mA.
- Velocidad de barrido: 1 mV/s.
- Las curvas analizadas fueron la rama catódica, donde se presenta la reducción, y la rama anódica, donde se presenta la oxidación.

Ilustración 22 Grafico de valores en programa Gamry Fuente (Propia)

7. Se inicia el programa de análisis, para obtener las gráficas de Nyquist y Bode, de acuerdo a las siguientes imágenes:

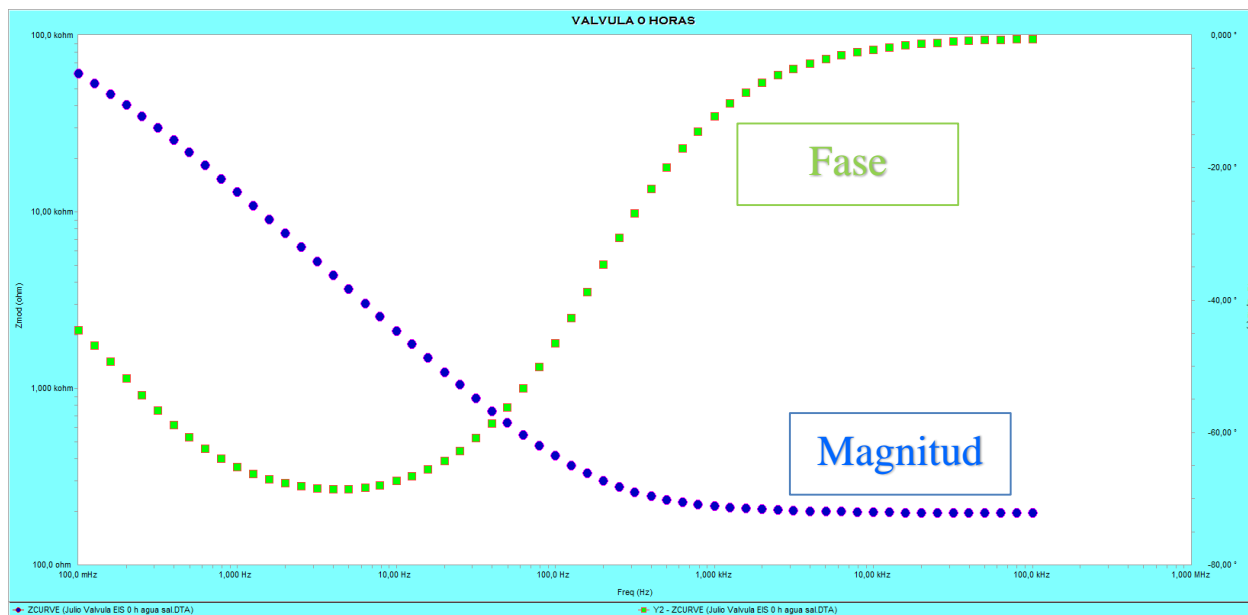


Ilustración 23 Gráficos de Bode de magnitud (azul) y de fase (verde) Fuente (Propia)

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

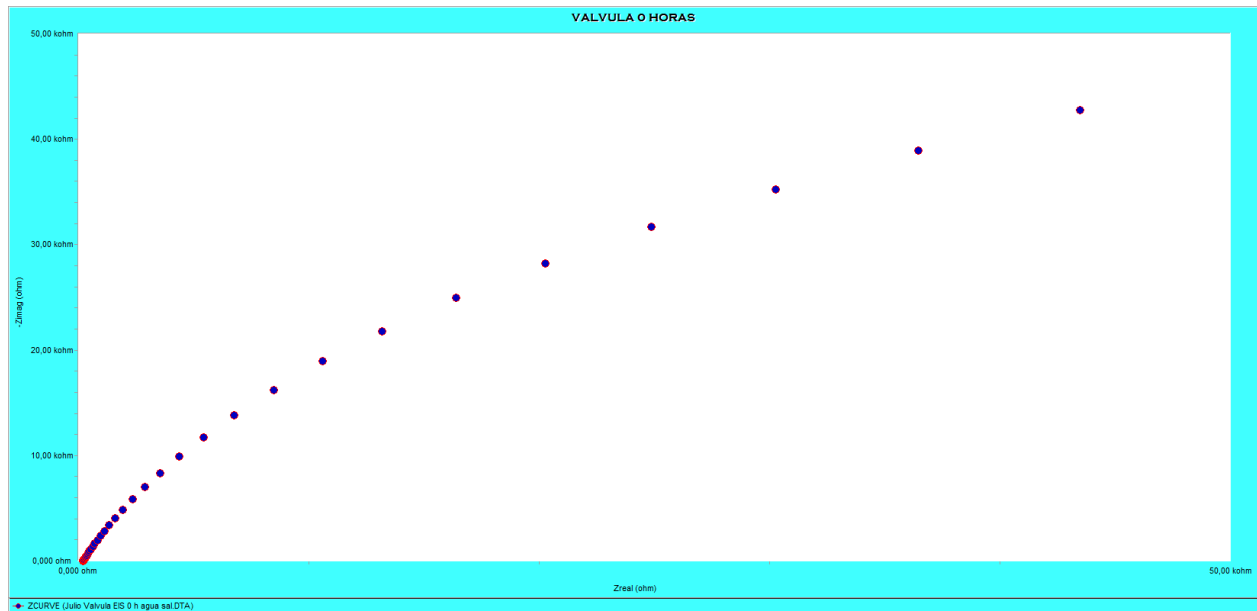


Ilustración 24 Grafico de Nyquist Fuente (Propia)

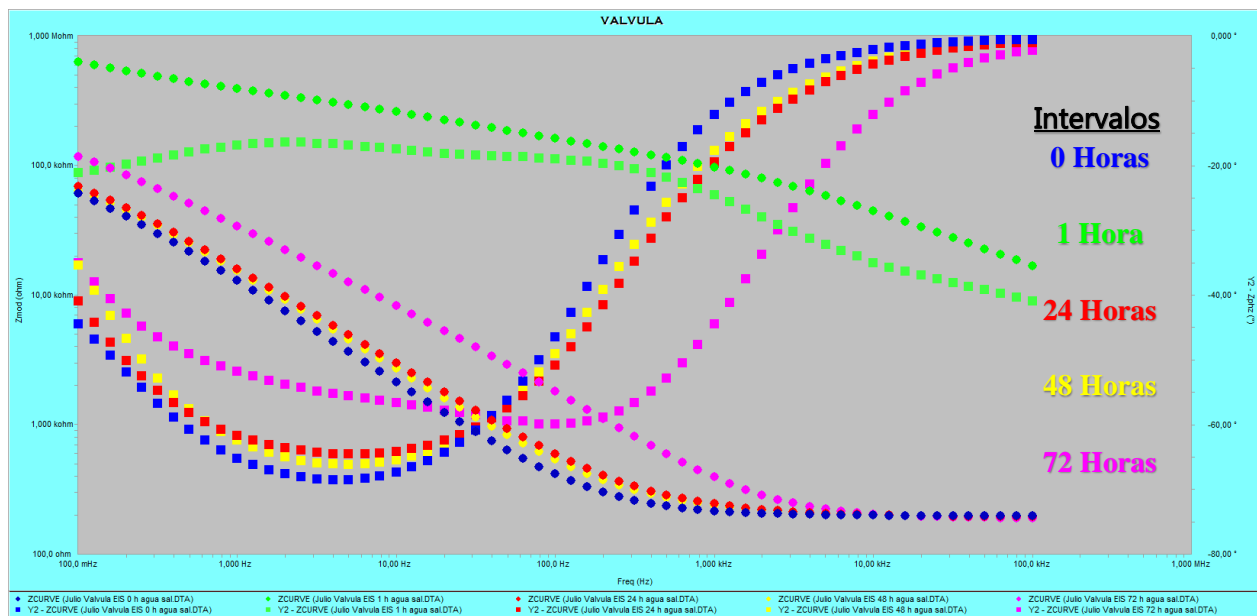


Ilustración 25 Gráficos en intervalos de Bode de magnitud (●) y de fase (■) Fuente (Propia)

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

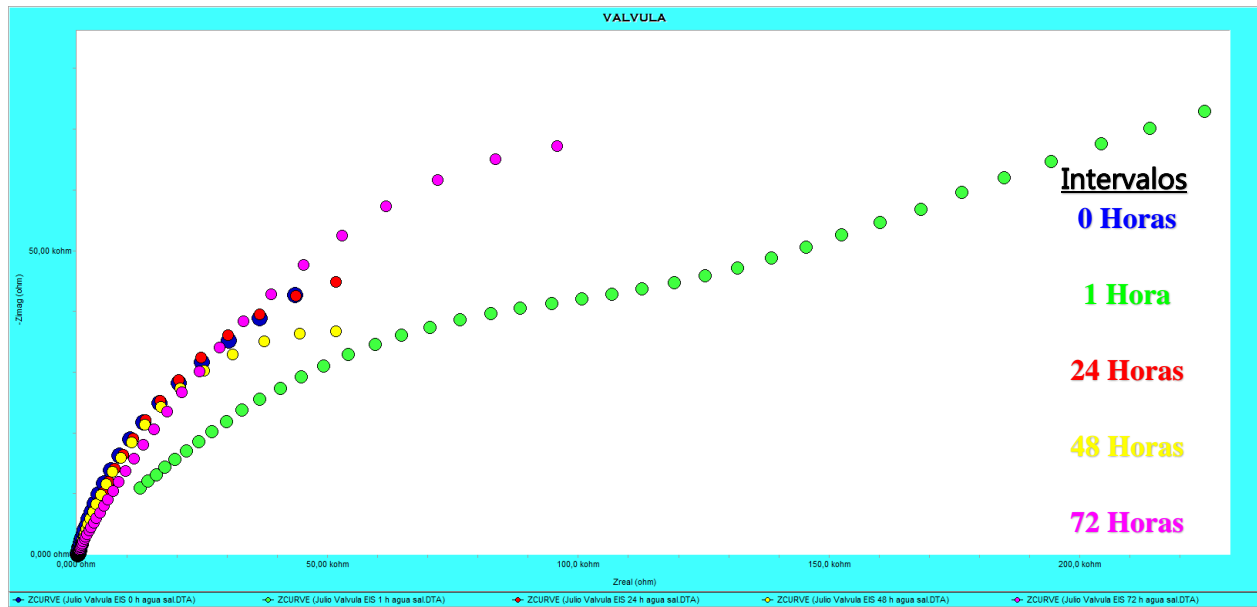


Ilustración 26 Gráficos en intervalos de Nyquist Fuente (Propia)

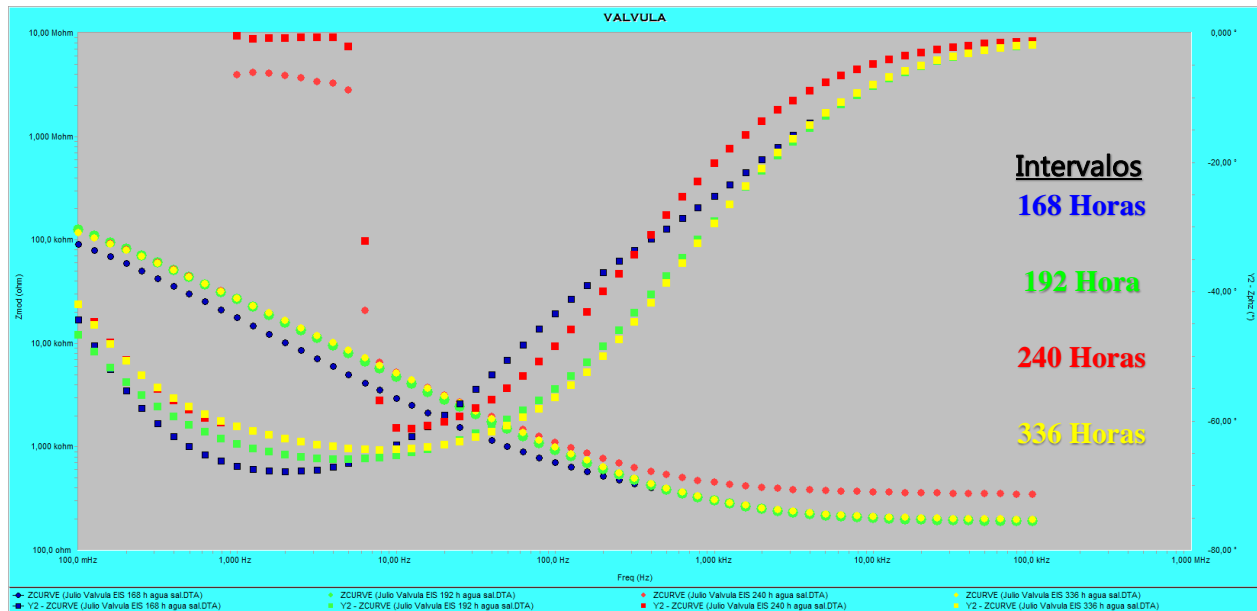


Ilustración 27 Gráficos en intervalos de Bode de magnitud (●) y de fase (■) Fuente (Propia)

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

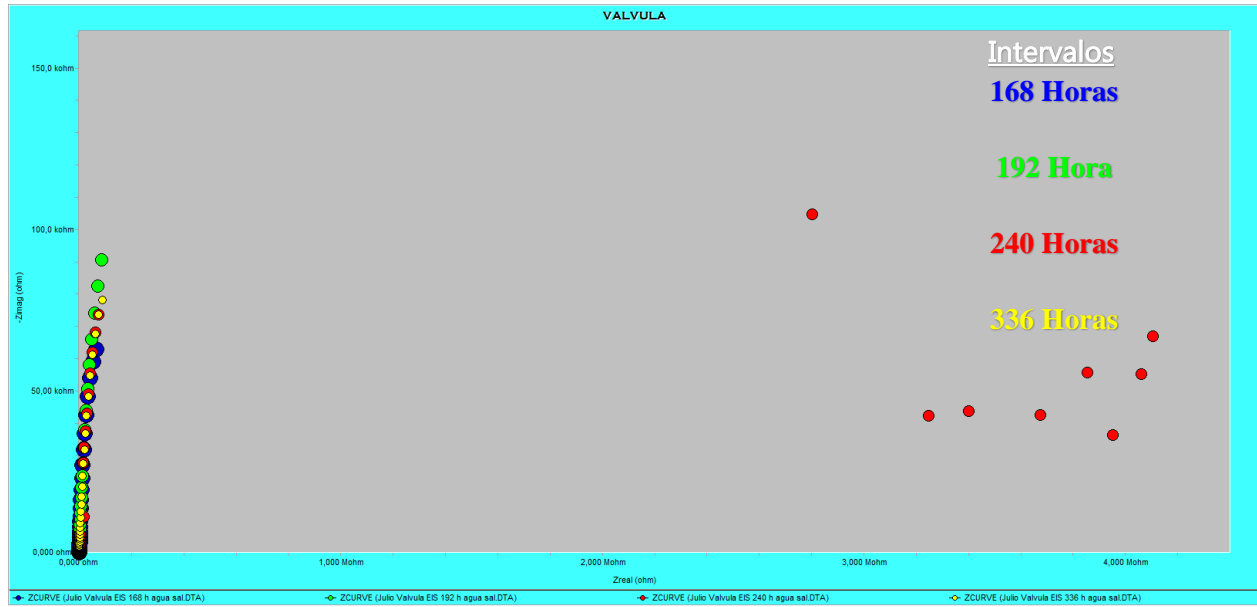


Ilustración 28 Gráficos en intervalos de Nyquist Fuente (Propia)

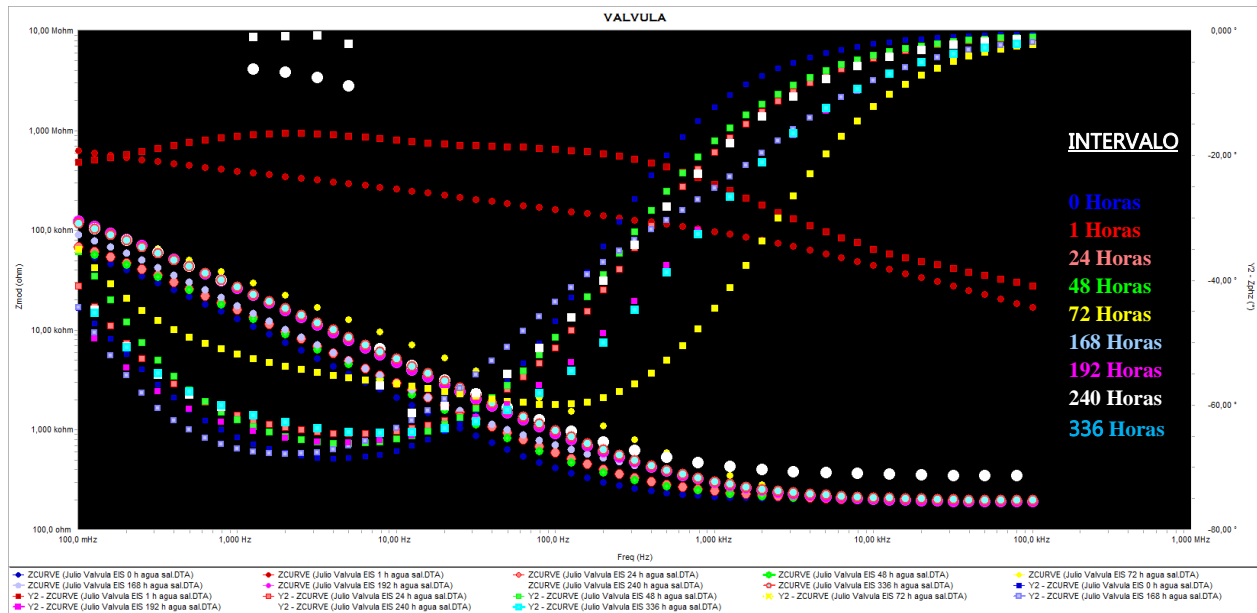


Ilustración 29 Gráficos en intervalos completos de Bode de magnitud (●) y de fase (■) Fuente (Propia)

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

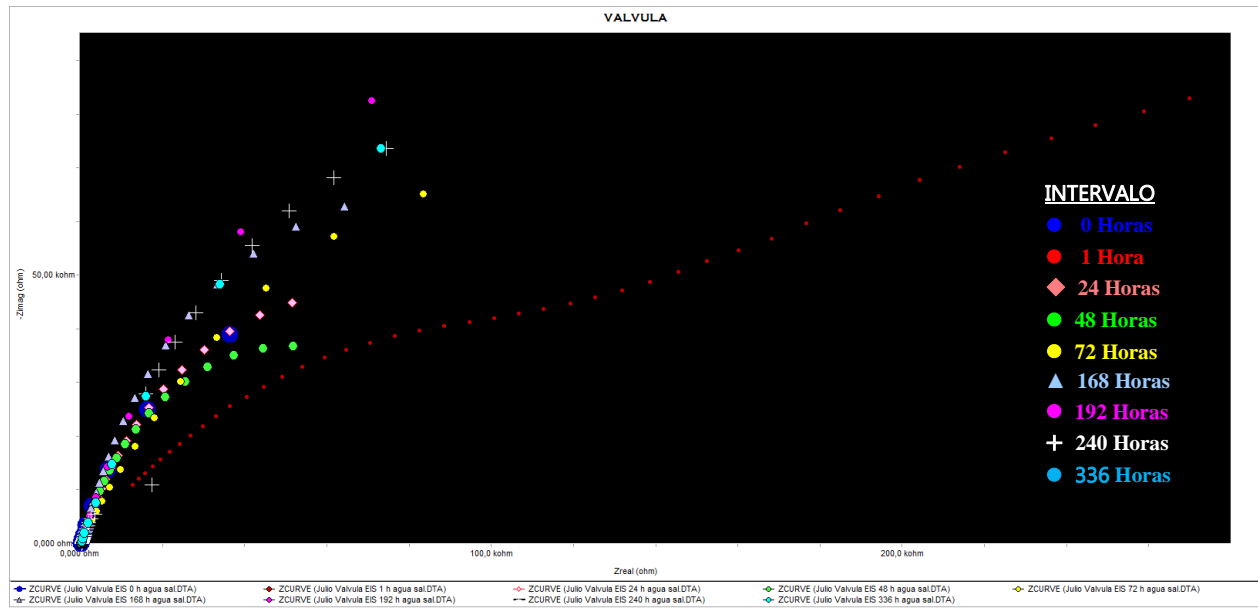


Ilustración 30 Gráficos en intervalos completos de Nyquist Fuente (Propia)

En las gráficas anteriores se pudo determinar que el intervalo utilizado de 1 hora y 240 horas muestra variación o picos de corriente y puntos de pasividad, diferentes a los demás, dado esto a una posible mala aplicación de la toma de la muestra, dado que la solución acuosa de NaCl al 33% debería tener un seguimiento de continuidad como con los demás intervalos.

¿Qué ocurrió en el proceso de Oxidación?

Un elemento metálico se degrada cuando en su estructura atómica, pierde electrones; dichos electrones desertan del átomo, dejando como consecuencia la formación de iones positivos también conocidos como cationes, de acuerdo al siguiente gráfico:

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

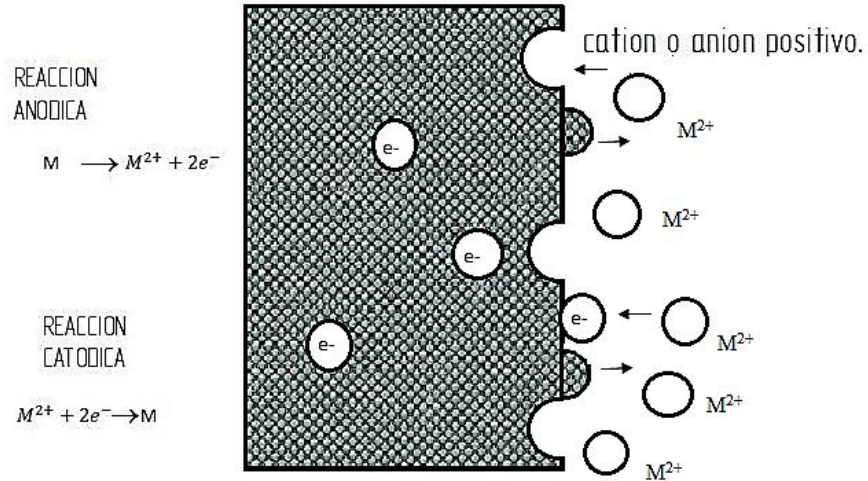


Ilustración 31 Reacción anódica y catódica Fuente (Propia)

3.4.1.5. Circuito Equivalente

Ahora nos vamos a centrar, en desarrollar los circuitos equivalentes para cada uno de los intervalos, con esto determinaremos el comportamiento corrosivo del material durante todo el proceso, cabe resaltar que, en las gráficas de Bode y Nyquist, los intervalos de 1 hora y 240 horas son no continuos a el proceso por mala toma de datos en el potenciostato dado su comportamiento.

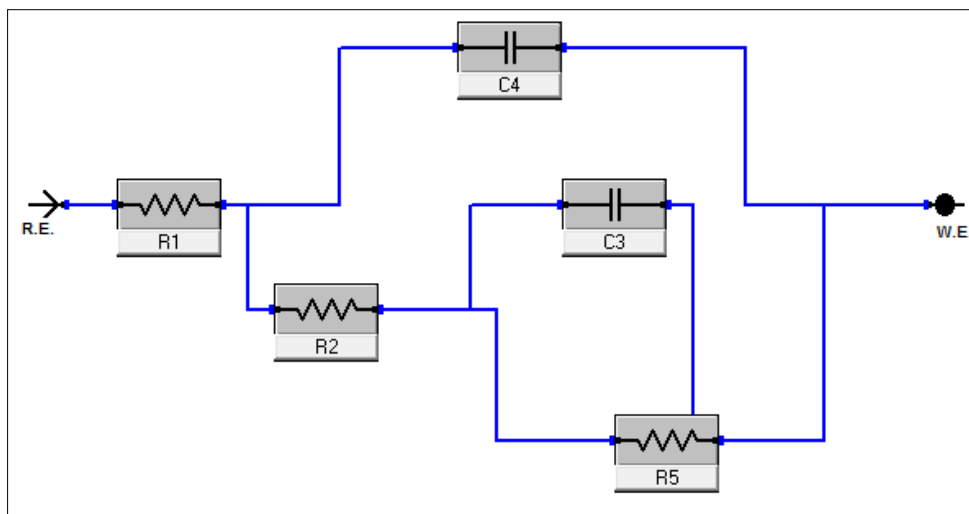


Ilustración 32 Circuito equivalente AISI 304 utilizado para prueba Fuente (Propia)

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

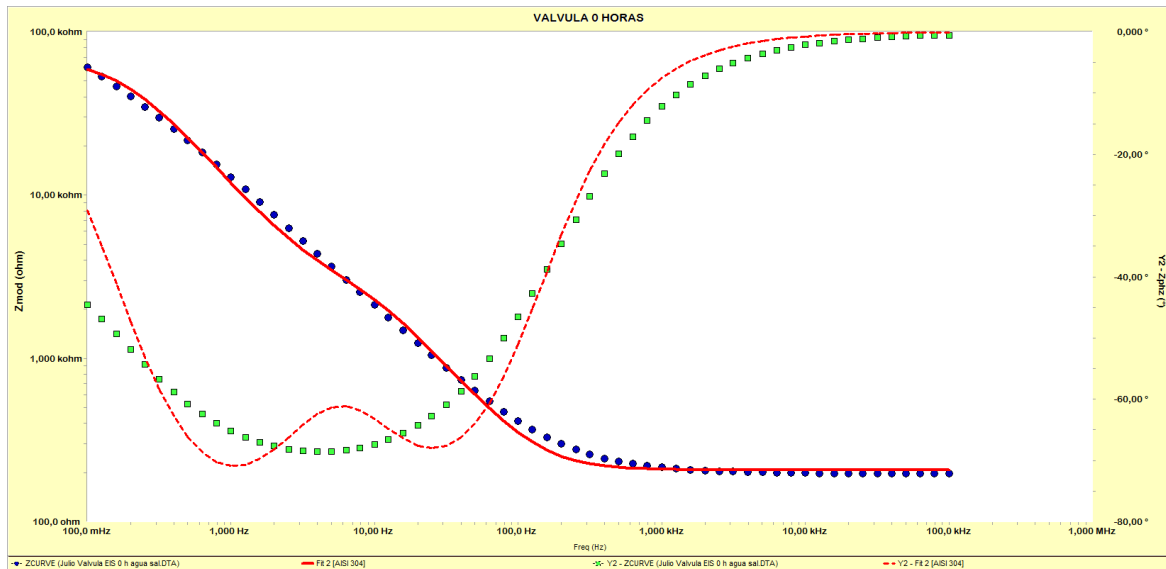


Ilustración 33 Gráfico Circuito equivalente (—), 0 horas de Bode, magnitud (●) y de fase (■), Fuente (Propia)

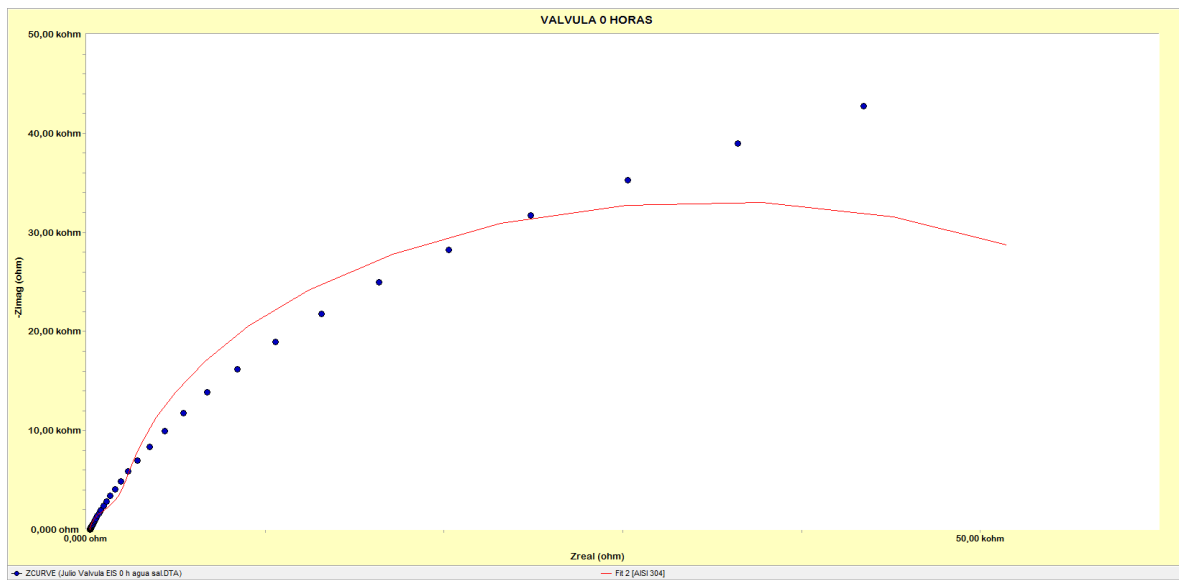


Ilustración 34 Grafico Circuito equivalente (—), 0 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)

Parameter	Value	± Error	Units
R1	207,6	1,175	ohm
R2	5,194e3	151,4	ohm
C3	8,752e-6	149,0e-9	F
C4	5,770e-6	56,79e-9	F
R5	62,75e3	1,087e3	ohm
Goodness of Fit	13,61e-3		
Julio Valvula EIS 0 h agua sal.DTA			

Tabla 1 Parámetros a 0 horas

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

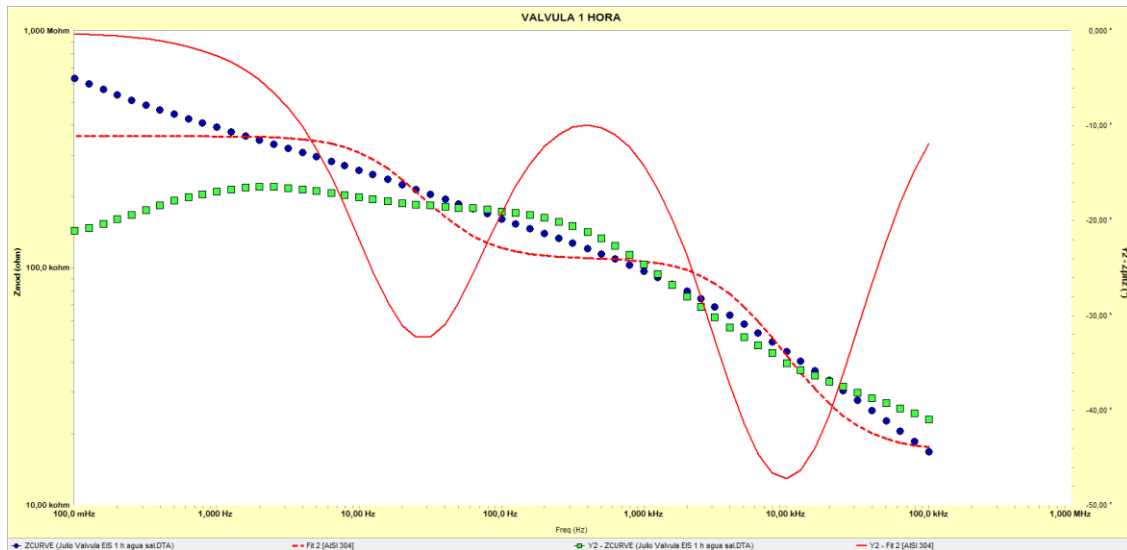


Ilustración 35 Gráfico Circuito equivalente (—), 1 Hora de Bode, de magnitud (●) y de fase (■), Fuente (Propia)

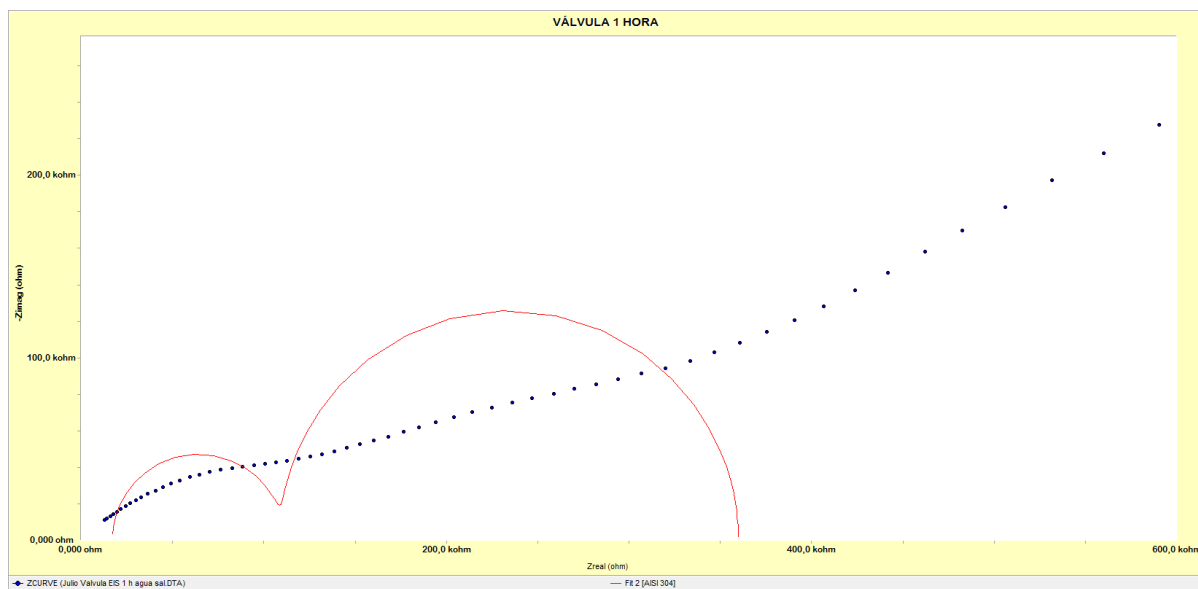


Ilustración 36 Grafico Circuito equivalente (—), 1 Hora de Nyquist (●) Fuente (Propia)

Parameter	Value	± Error	Units
R1	17,08e3	231,2	ohm
R2	94,21e3	824,6	ohm
C3	41,34e-9	840,6e-12	F
C4	439,9e-12	5,892e-12	F
R5	248,7e3	2,577e3	ohm
Goodness of Fit	76,78e-3		
Julio Valvula EIS 1 h agua sal.DTA			

Tabla 2 Parámetros a 1 hora

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

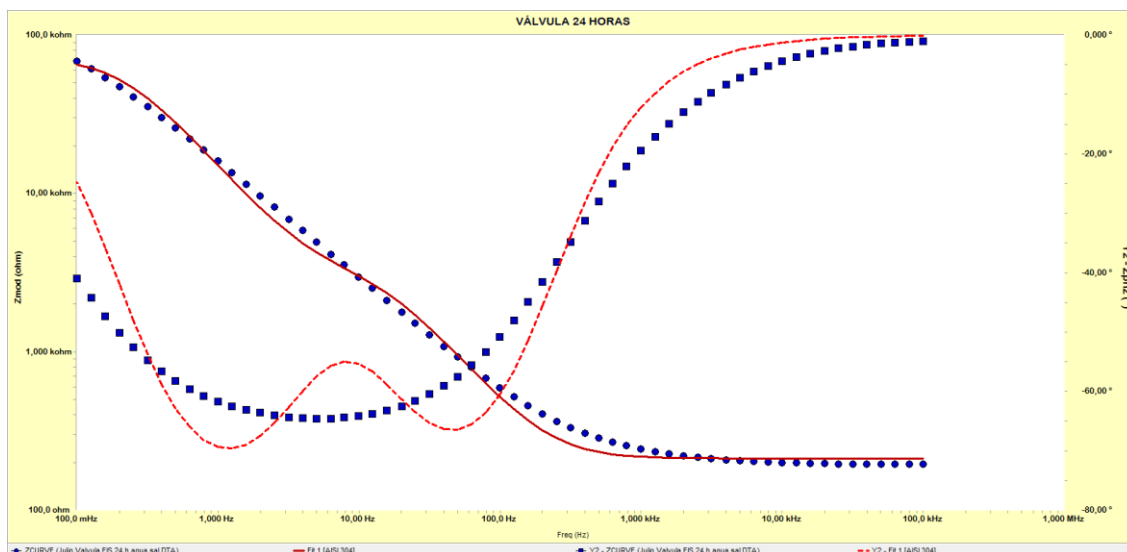


Ilustración 37 Gráfico Circuito equivalente (—), 24 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■), Fuente (Propia)

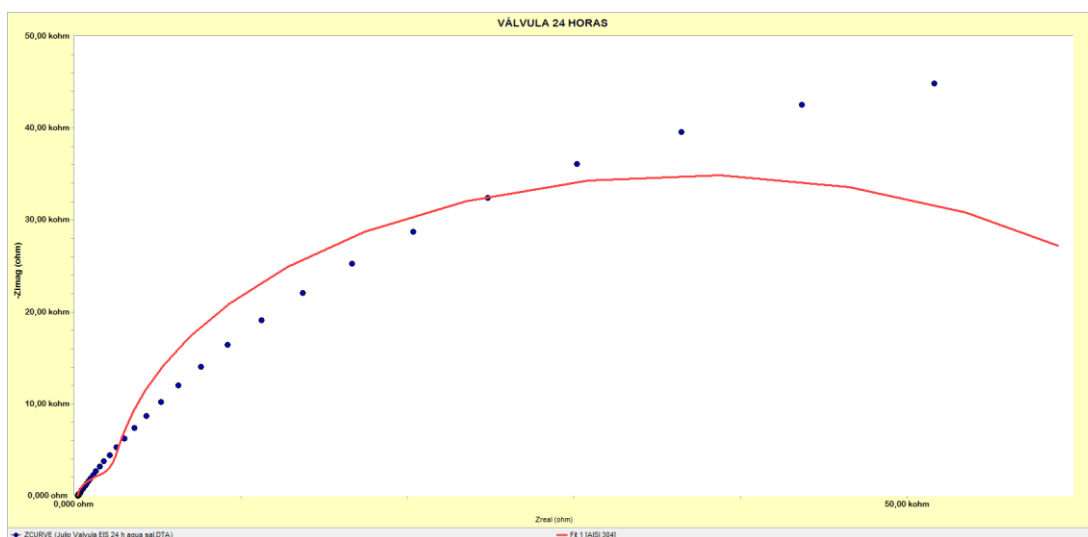


Ilustración 38 Grafico Circuito equivalente (—), 24 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)

Parameter	Value	± Error	Units
R1	212,4	1,253	ohm
R2	4,649e3	104,1	ohm
C3	7,797e-6	110,2e-9	F
C4	3,460e-6	34,06e-9	F
R5	67,25e3	1,043e3	ohm
Goodness of Fit	24,29e-3		
Julio Valvula EIS 24 h agua sal.DTA			

Tabla 3 Parámetros a 24 horas

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

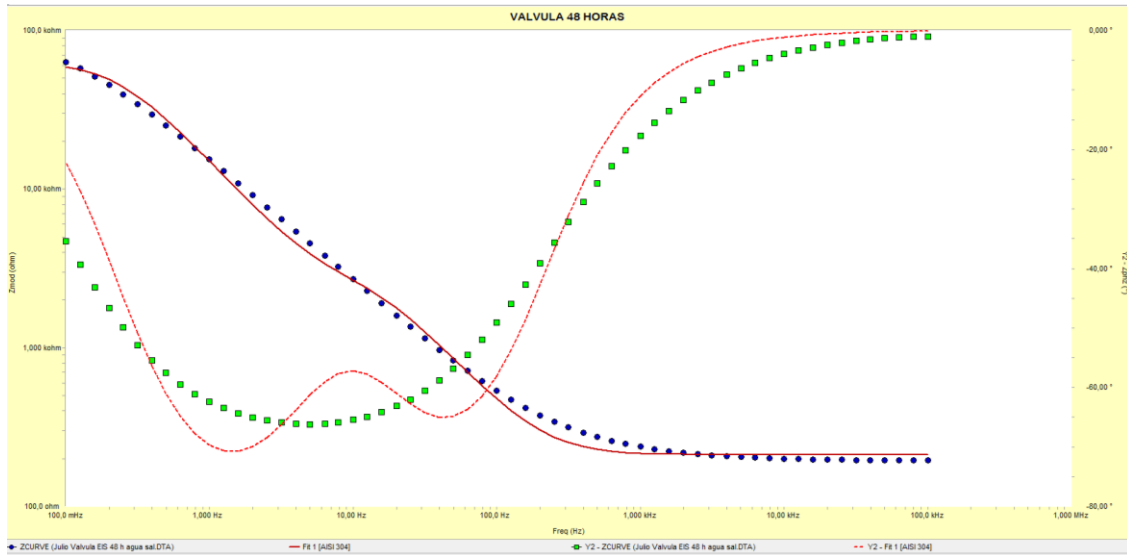


Ilustración 39 Gráfico Circuito equivalente (—), 48 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■), Fuente (Propia)

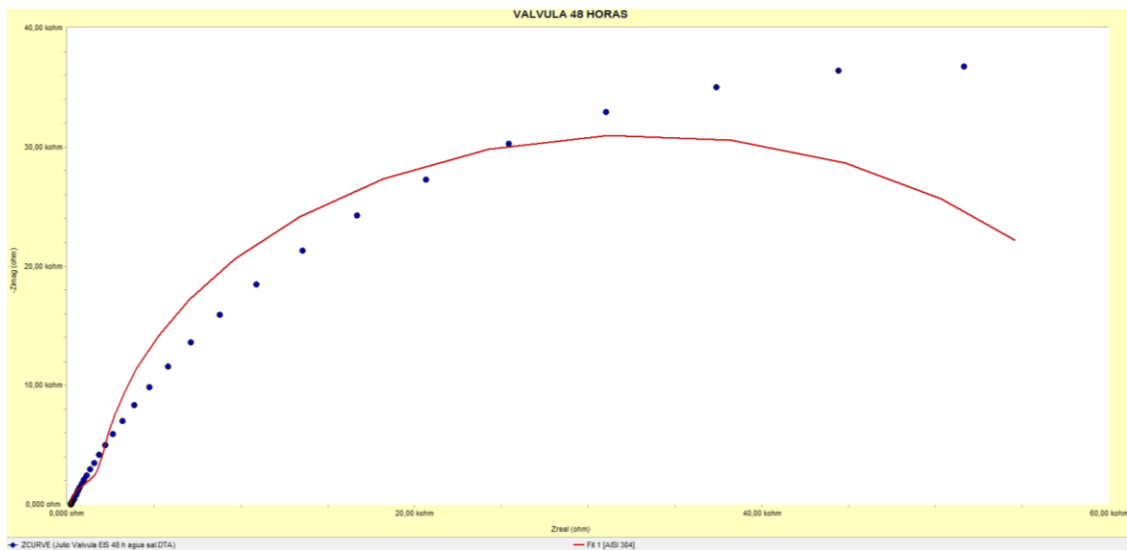


Ilustración 40 Grafico Circuito equivalente (—), 48 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)

Parameter	Value	± Error	Units
R1	211,7	1,238	ohm
R2	4,059e3	103,4	ohm
C3	7,250e-6	108,1e-9	F
C4	3,867e-6	39,86e-9	F
R5	59,64e3	884,2	ohm
Goodness of Fit	20,01e-3		
Julio Valvula EIS 48 h agua sal.DTA			

Tabla 4 Parámetros a 48 horas

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

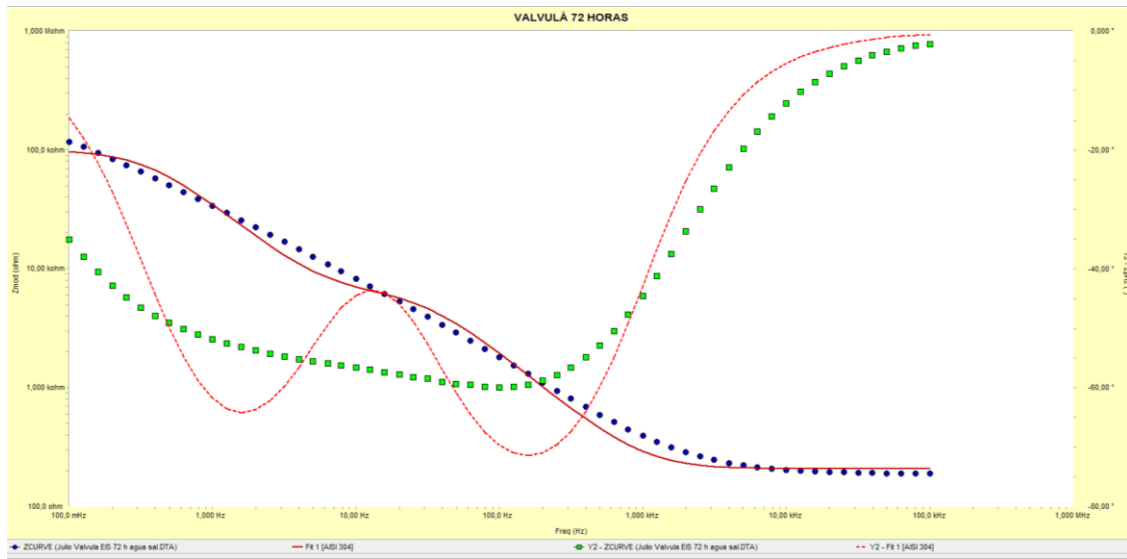


Ilustración 41 Gráfico Circuito equivalente (—), 72 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■), Fuente (Propia)

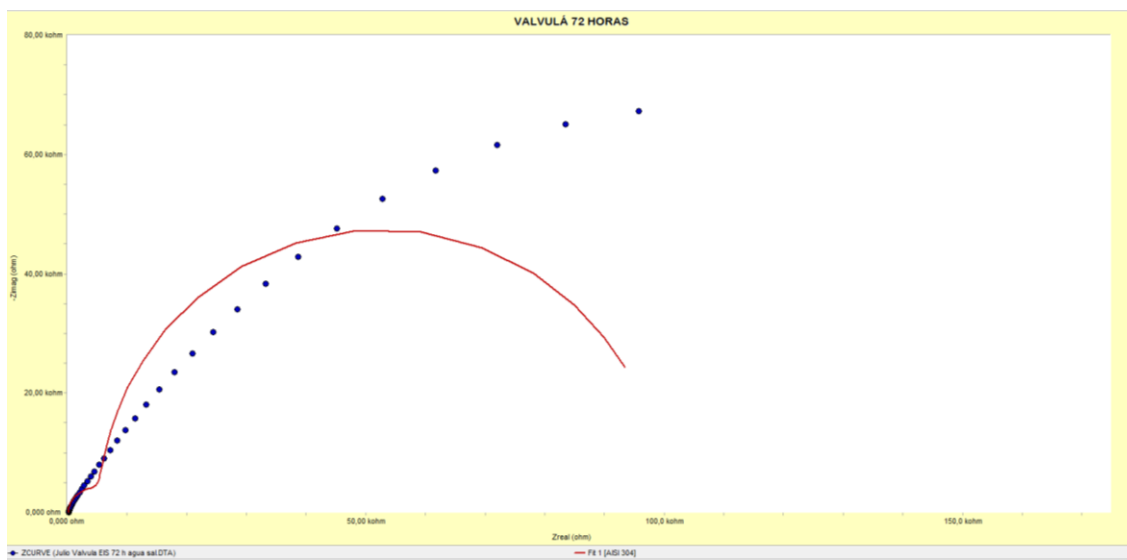


Ilustración 42 Grafico Circuito equivalente (—), 72 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)

Parameter	Value	± Error	Units
R1	207,9	1,415	ohm
R2	7,574e3	110,8	ohm
C3	3,922e-6	48,55e-9	F
C4	804,7e-9	6,847e-9	F
R5	92,37e3	1,201e3	ohm
Goodness of Fit	44,43e-3		
Julio Valvula EIS 72 h agua sal.DTA			

Tabla 5 Parámetros a 72 horas

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

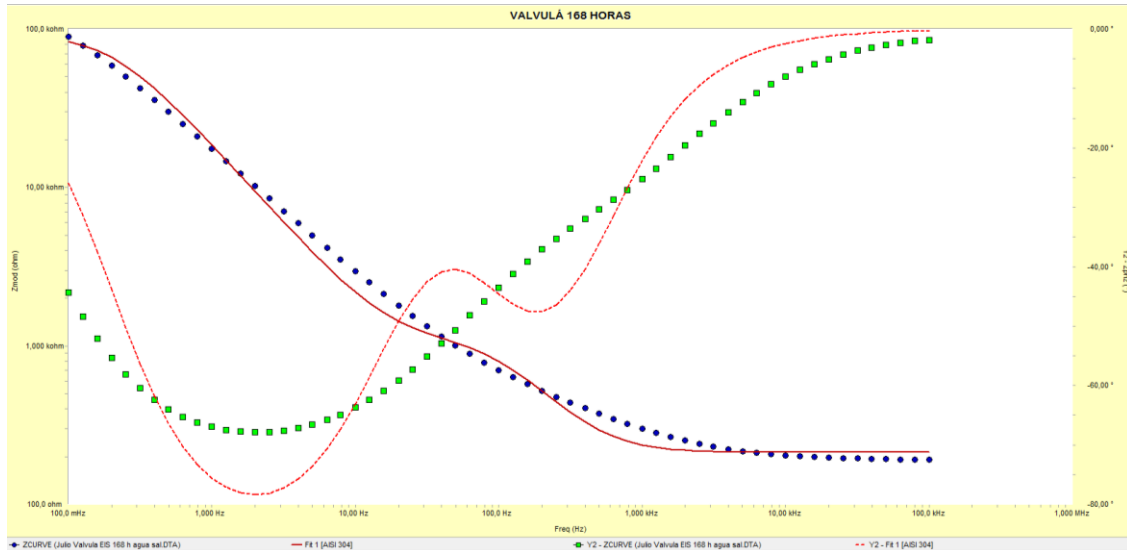


Ilustración 43 Gráfico Circuito equivalente (—), 168 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■), Fuente (Propia)

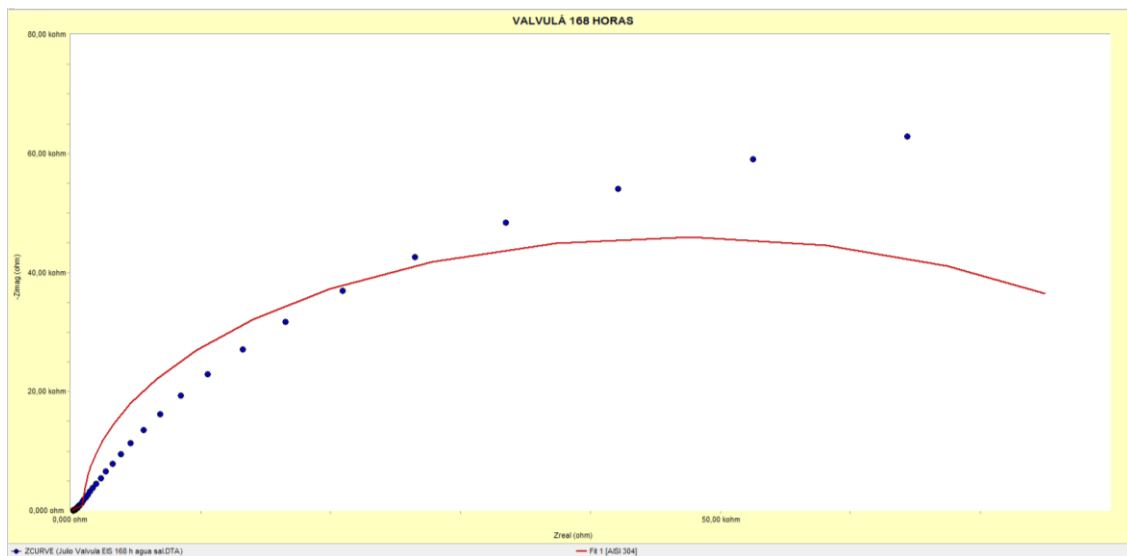


Ilustración 44 Grafico Circuito equivalente (—), 168 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)

Parameter	Value	± Error	Units
R1	212,9	1,359	ohm
R2	1,193e3	22,68	ohm
C3	6,769e-6	65,83e-9	F
C4	1,771e-6	25,40e-9	F
R5	91,50e3	1,331e3	ohm
Goodness of Fit	37,33e-3		
Julio Valvula EIS 168 h agua sal.DTA			

Tabla 6 Parámetros a 168 horas

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

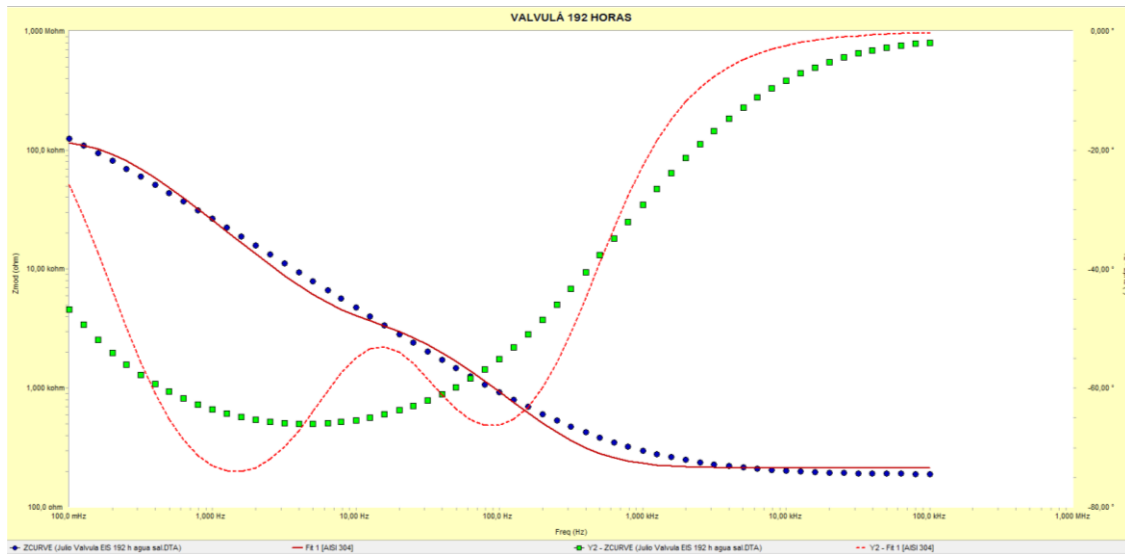


Ilustración 45 Gráfico Circuito equivalente (—), 192 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■), Fuente (Propia)

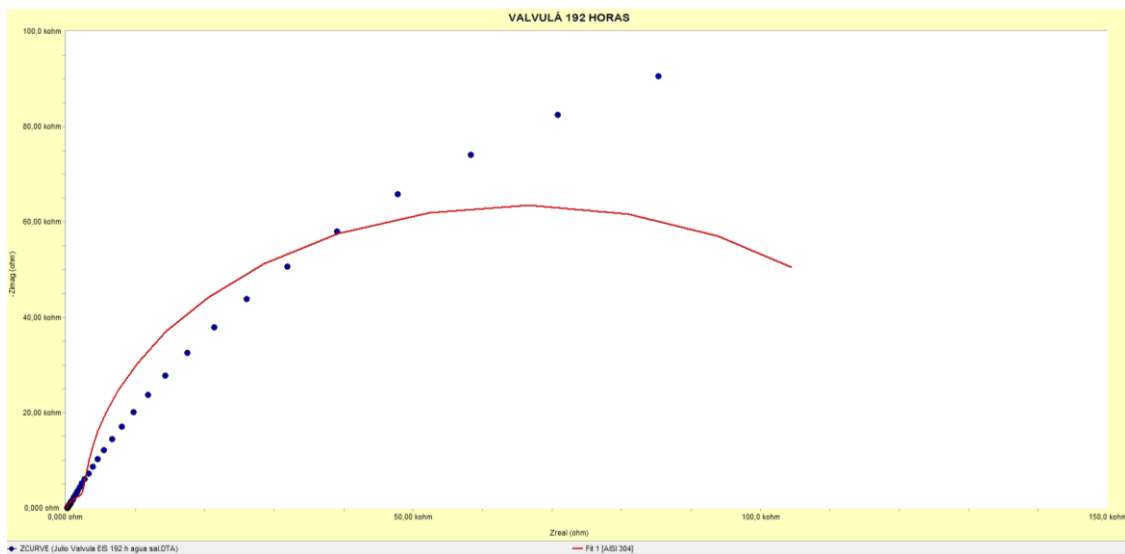


Ilustración 46 Grafico Circuito equivalente (—), 192 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)

Parameter	Value	± Error	Units
R1	213,6	1,340	ohm
R2	4,630e3	95,29	ohm
C3	4,527e-6	54,66e-9	F
C4	1,777e-6	17,46e-9	F
R5	124,7e3	1,876e3	ohm
Goodness of Fit	38,60e-3		
Julio Valvula EIS 192 h agua sal.DTA			

Tabla 7 Parámetros a 192 horas

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

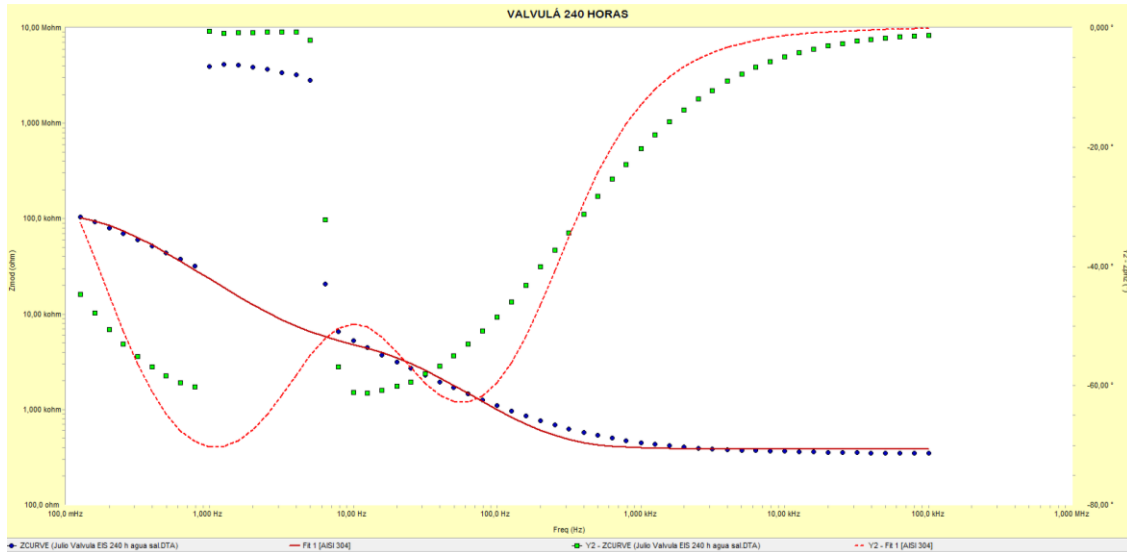


Ilustración 47 Gráfico Circuito equivalente (—), 240 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■), Fuente (Propia)

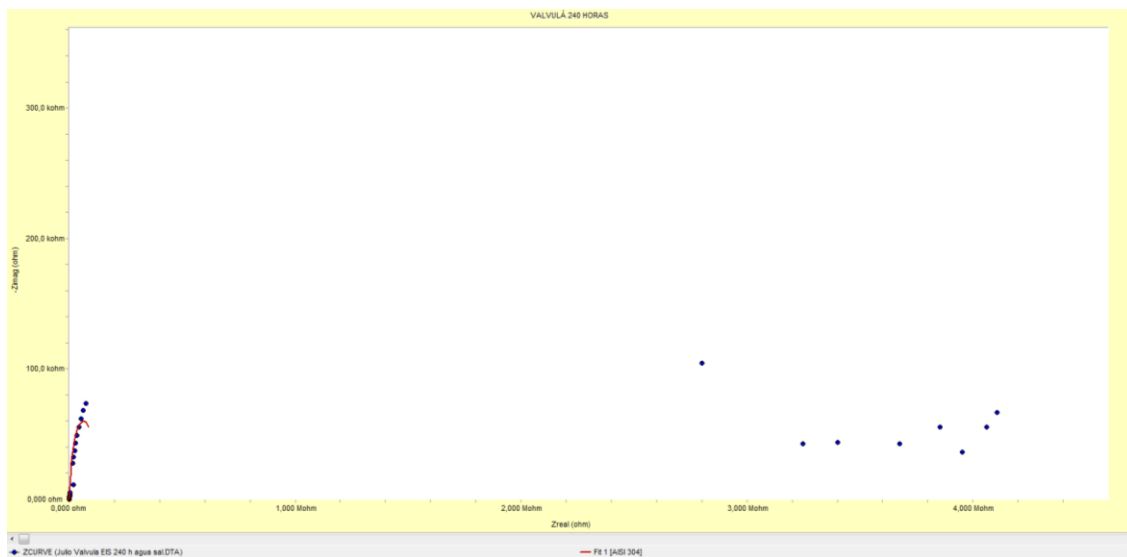


Ilustración 48 Grafico Circuito equivalente (—), 240 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)

Parameter	Value	± Error	Units
R1	384,9	2,287	ohm
R2	6,151e3	139,6	ohm
C3	5,370e-6	90,23e-9	F
C4	1,805e-6	18,85e-9	F
R5	117,4e3	2,193e3	ohm
Goodness of Fit	162,2e-3		
Julio Valvula EIS 240 h agua sal.DTA			

Tabla 8 Parámetros a 240 horas

EMPLEO DE LA TECNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

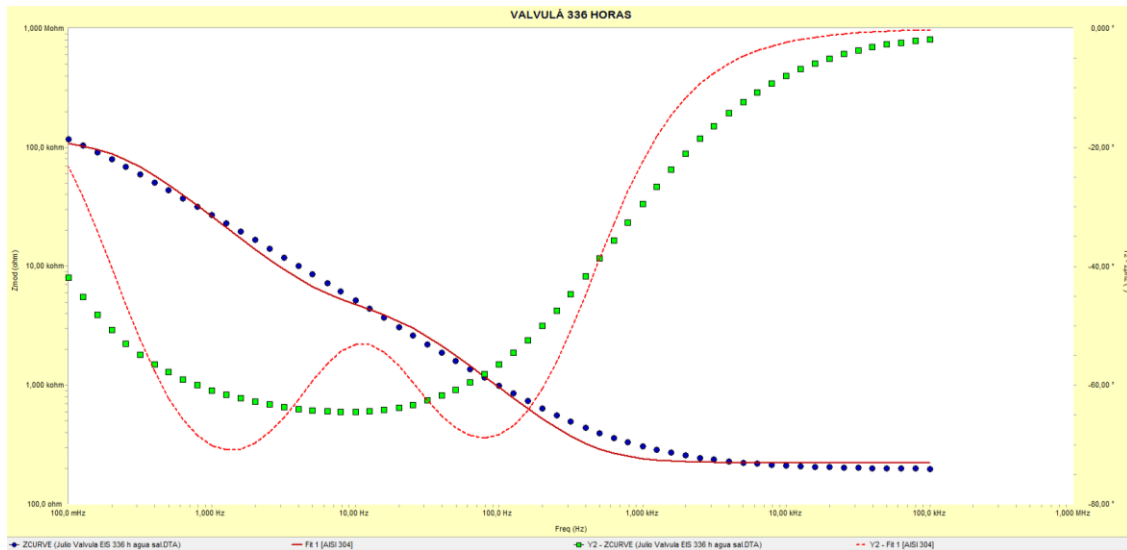


Ilustración 49 Gráfico Circuito equivalente (—), 336 Horas de Bode, de magnitud (●) y de fase (■), Fuente (Propia)

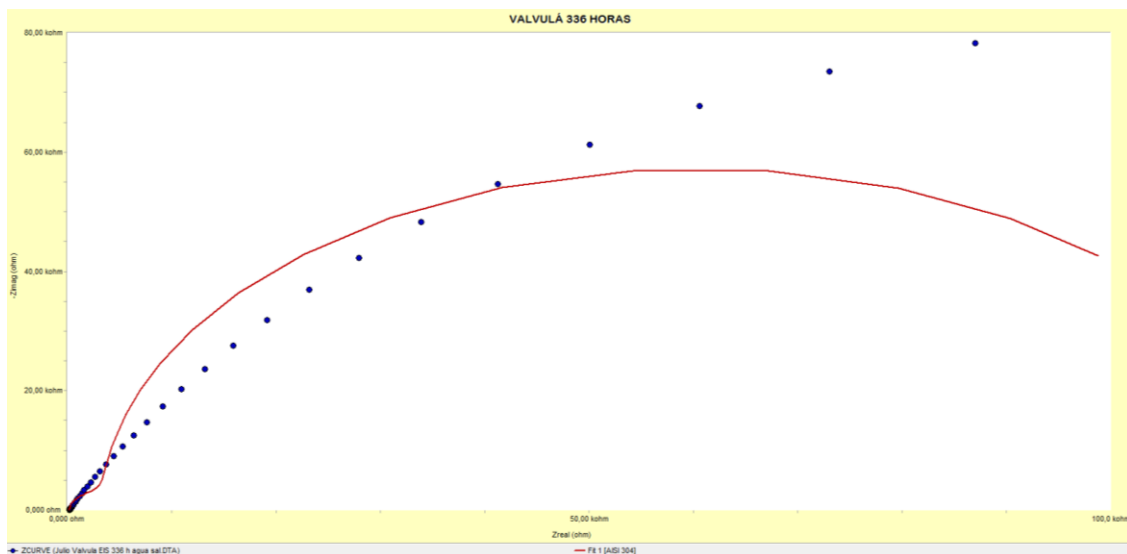


Ilustración 50 Grafico Circuito equivalente (—), 336 Horas de Nyquist (●) Fuente (Propia)

Parameter	Value	± Error	Units
R1	222,1	1,390	ohm
R2	6,129e3	122,2	ohm
C3	4,599e-6	58,85e-9	F
C4	1,735e-6	16,14e-9	F
R5	111,5e3	1,647e3	ohm
Goodness of Fit	36,86e-3		
Julio Valvula EIS 336 h agua sal.DTA			

Tabla 9 Parámetros a 336 horas

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

3.5. Diagnostico

De acuerdo a los datos obtenidos y análisis realizados, se puede generar la siguiente tabla de diagnóstico de las fallas.

ELEMENTO	DIAGNÓSTICO
Válvula de admisión y escape	No se muestra visualmente impactos corrosivos en la probeta de la válvula de admisión y escape, tanto en las pruebas de inmersión ni potencio-dinámicas realizadas, en la pieza después de cada prueba, se observan huellas de corrosión en el material, además de pérdida de masa a través del tiempo.

Tabla 10 Diagnóstico de causa de corrosión

4. Conclusiones

La técnica espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), presenta importantes ventajas sobre el estudio del proceso de corrosión, la información aportada es útil para estimar el estado de corrosión de un acero sumergido en agua sal, Se encontró que el uso de Agua sal ocasiona corrosión dentro de la pieza haciendo la celda de corrosión estable y funcional para la técnica EIS. Con la interpretación de la impedancia de los diagramas de Nyquist y de bode, es posible aproximar reacciones que se llevan a cabo en la interface del acero de la válvula con un porcentaje de perdida menor. Los ensayos de Polarización potencio dinámica arrojaron que la velocidad de corrosión aumenta considerablemente con ese tiempo de inmersión.

Entonces se concluyó que la celda construida sirve para validar los resultados de los ensayos de manera que la celda sirve para futuras investigaciones y/o proyectos de grado aumentando la planta física de la universidad.

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

6. Bibliografía

- [1] D. Silvia y G. Fundora, *Fundamentos de la Corrosión y Protección de Metales* ., 1 edición. cienfuegos cuba: 2014, 2014.
- [2] J. M. Flores, R. D. Romero, y J. G. Llongueras, «Espectroscopía De Impedancia Electroquímica En Corrosión», *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 41, n.º 7, pp. 3-5, 2014.
- [3] jiu jun zhang xiao- zi yuan, chaojie song, haijiang wang, «electrochemical impedance spectroscopy in pem fuel cells», en *electrochemical impedance spectroscopy in pem fuel cells 1*, n.º c, 2009, pp. 1-413.
- [4] C. D. La Habana, «Espectroscopia de impedancia electroquímica : una herramienta eficaz para un diagnóstico microbiológico rápido».
- [5] U. P. D. E. Valencia, P. O. D. E. Posgrado, B. A. A. Una, y A. B. D. E. Co-cr-mo, «Universidad politécnica de valencia», UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, 2007.
- [6] E. Vera, «Uso de métodos electroquímicos como herramientas para evaluar parámetros de interfase en sistemas heterogéneos metal/medio acuoso», *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias*, vol. 34, n.º 131, pp. 241-251, 2010.
- [7] N. Ramírez, A. Regueiro, O. Arias, y R. Contreras, «Espectroscopía de impedancia electroquímica, herramienta eficaz para el diagnóstico rápido microbiológico», 2009.
- [8] J. A. Salazar-Jiménez, «Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)», *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 28, n.º 3, p. 127, 2015.

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- [9] M. I. . W. S. H. Campos, «Películas De Dlc Producidas Por Pecvd Utilizando Intercapas De Tix-Siy, Alxtiy Y Wx-Tiy, Sobre Sustratos De Aceros Aisi 316-L, Aisi H13 Y Aleaciones De Ti6al4v, Depositadas Por Sputtering Con Magnetron», 2019.
- [10] Swagelok (Ilustración), «general-uniform-corrosion.ashx (640×320)», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.swagelok.com/-/media/toolbox/material-selection-guide/general-uniform-corrosion.ashx>. [Accedido: 23-jul-2020].
- [11] Swagelok (Ilustración), «galvanic-corrosion.ashx (236×161)». [En línea]. Disponible en: <https://www.swagelok.com/-/media/toolbox/material-selection-guide/galvanic-corrosion.ashx>. [Accedido: 23-jul-2020].
- [12] Garcia Cristian (Ilustracion), «Corrosión por grietas(309×163)», *Ingeniería Mecánica Blog*, 20-jun-2016. [En línea]. Disponible en: https://4.bp.blogspot.com/-uE89RQzP_hk/V2gfAJFvIMI/AAAAAAAAABaI/bd6ng3oea-wdvXqSbM5OGMFemnsRxnBqQCLcB/s400/descarga.jpg. [Accedido: 23-jul-2020].
- [13] E. D. Padilla, «Aplicaciones De Los Aceros Inoxidables», *Rev. del Inst. Investig. la Fac. Ing. Geológica, Minera, Metal. y Geográfica*, vol. 2, n.º 3, pp. 11-22, 1999.
- [14] Swagelok (Ilustración), «localized-pitting-corrosion.ashx (640×320)». [En línea]. Disponible en: <https://www.swagelok.com/-/media/toolbox/material-selection-guide/localized-pitting-corrosion.ashx>. [Accedido: 23-jul-2020].
- [15] Garcia cristian (Ilustración), «Corrosión por Cavitación (256×197)», *Ingeniería Mecánica Blog*, 11-jun-2016. [En línea]. Disponible en: <https://3.bp.blogspot.com/-Zz9T6qP1jtA/V4QbWFpMXZI/AAAAAAAAABgw/Lv814i9zmw4XmhMA85NCZv9jvRT>

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- n3XzRACLcB/s320/descarga%2B%25281%2529.jpg. [Accedido: 23-jul-2020].
- [16] Garcia Cristian (Ilustración), «Corrosión por Erosión (278×181)», 11-jun-2016. [En línea]. Disponible en: https://2.bp.blogspot.com/-Ye8pH7AgrEY/V4QUk79HulI/AAAAAAAAABgQ/uavopbeFp-Ieyb9dCwZtTL0I0_zkMTTagCLcB/s400/descarga.jpg. [Accedido: 23-jul-2020].
- [17] Swagelok (Ilustración), «stress-corrosion-cracking.ashx (640×320)». [En línea]. Disponible en: <https://www.swagelok.com/-/media/toolbox/material-selection-guide/stress-corrosion-cracking.ashx>. [Accedido: 23-jul-2020].
- [18] Garcia Cristian (Ilustración), «Corrosión por Fatiga (400×241)», *Ingeniería Mecánica Blog*, 11-jun-2016. [En línea]. Disponible en: https://4.bp.blogspot.com/-TJm6I3y4Qx8/V4RHicT7bUI/AAAAAAAAABiA/NBHpkADRJVikqkTh2mnN71Qorm2MAcrwgCLcB/s400/Screenshot_5.png. [Accedido: 23-jul-2020].
- [19] AMETEK (Ilustración), «K0047 Kit de celda de corrosión | Investigación aplicada de Princeton | Analítica Solartron», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.ameteki.com/products/electrochemical-accessories/electrochemical-accessories/k0047-corrosion-cell-kit>. [Accedido: 26-may-2020].
- [20] MARANATA (Ilustración), «CCK Kit de Celda de Corrosión - Maranata-Madrid SL - NIF B-85746204», *Madrid sl*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.alphaomega-electronics.com/es/accesorios-celdas-electrodos-kits-etc/3802-cck-kit-de-celda-de-corrosion.html>. [Accedido: 26-may-2020].
- [21] SISTEMA LAMBDA (Ilustración), «Kit estándar de celda de corrosión: Kits de celda de

EMPLEO DE LA TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS) PARA EVALUAR UNA CELDA DE CORROSIÓN

- corrosión: ACCESORIOS DE ELECTROQUÍMICA: Electroquímica: Oferta: SISTEMA LAMBDA», *Varsovia*, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.lambdasystem.pl/en/corrosion_cell_kits/standard_corrosion_cell_kit-60.html. [Accedido: 26-may-2020].
- [22] MEHRGAN PARTOSHAR (Ilustracion), «Células de corrosión KMZ35», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://partoshar.com/product/Corrosion-Cells-KMZ3-5/lang/2>. [Accedido: 30-may-2020].
- [23] GAMRY INSTRUMENTS (Ilustracion), «Kit de celdas de corrosión MultiPort™: celdas electroquímicas Gamry», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.gamry.com/cells-and-accessories/electrochemical-cells/multiport-corrosion-cell-kit/>. [Accedido: 02-jun-2020].
- [24] J. R. Llata Garcia, D. Gonzales Sarabia, Esther Fernandez Perez, C. Torre Ferrero, y M. S. Robla Gomez, «U T O Má C a», p. 13, 2010.
- [25] O. J.J. y H. W., «Production and corrosion resistance of niobium nitride-niobium multilayers films using EIS », *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 35, n.º 2, pp. 213-221, 2015.
- [26] D. Loveday, P. Peterspm, y B. Rodgers, «Evaluation of organic coatings with electrochemical impedance spectroscopy part 2: Application of EIS to coatings», *CoatingsTech*, vol. 1, n.º 10, pp. 88-93, 2004.