

**DISEÑO Y MODIFICACIÓN DE LAS GUÍAS Y ACTIVIDADES PRÁCTICAS DEL  
LABORATORIO DE LA ASIGNATURA DE CORROSIÓN CORRESPONDIENTE  
AL PROGRAMA DE INGENIERÍA METALÚRGICA DE LA UNIVERSIDAD  
INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**JOHAN STEVE ESTÉVEZ TORRES  
DIEGO ALBERTO MEDINA GRATERON**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

**DISEÑO Y MODIFICACIÓN DE LAS GUÍAS Y ACTIVIDADES PRÁCTICAS DEL  
LABORATORIO DE LA ASIGNATURA DE CORROSIÓN CORRESPONDIENTE  
AL PROGRAMA DE INGENIERÍA METALÚRGICA DE LA UNIVERSIDAD  
INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**JOHAN STEVE ESTÉVEZ TORRES  
DIEGO ALBERTO MEDINA GRATERON**

**Trabajo de Grado (Modalidad: Práctica en Docencia) para optar al título de  
Ingeniero Metalúrgico**

**Director**

**Ph.D. SERGIO ISMAEL BLANCO VÁSQUEZ  
Doctor en Ingeniería**

**Co-Director**

**Ph.D. MAURICIO RINCÓN ORTÍZ  
Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

## DEDICATORIA

*A Dios, quien me dio la fortaleza para no decaer.*

*A mi madre, la que, a pesar de todos los obstáculos, me ha demostrado que sin sangre ni sudor ni lágrimas no se puede alcanzar la gloria.*

*A mi padre, donde quiera que este me observa y vigila constantemente para no rendirme y ser quien soy.*

*A mi hermano mayor, cuñada y sobrino; con sus personalidades y actitudes particulares, sé que me desean lo mejor y apoyan incondicionalmente.*

*A mi padrastro, y familiares, quienes me han dado una mano amiga en los momentos cuando más la necesite y han vivido de cerca todo mi progreso académico.*

*A una persona anónima en especial, la que, con su presencia y carisma, ha llenado el vacío que alguna vez tuve y me ha dado razones para enfrentar y cambiar mi fría personalidad y corazón.*

*A mi maestro y amigo de artes marciales, quien me ha enseñado día a día el control y a ser mejor persona mental y espiritualmente en la vida.*

*Dedico esta tesis a todos los familiares, amigos, compañeros y cercanos que me apoyaron moral, emocional, sentimental y económicamente.*

**Johan Steve Estévez Torres**

*A esa persona que desde el cielo comparte mis alegrías y tristezas. A ella, la que me dio la vida y me enseñó a luchar por las cosas que quiero para mi vida.*

**Diego Alberto Medina Grateron**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradecemos cordialmente al Dr. Mauricio Rincón Ortiz, Codirector de este trabajo de grado, por la ayuda y la colaboración en la realización del presente trabajo. Igualmente agradecemos muy especialmente al Dr. Sergio Ismael Blanco Vásquez, Director del trabajo de grado, por su compromiso y entrega en el desarrollo del proyecto.*

*Agradecemos de manera muy especial al señor Ambrosio Carrillo Carrillo, Técnico del laboratorio de Corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de materiales, por su colaboración incondicional en todas las pruebas realizadas del presente trabajo de grado.*

*Agradecemos al Grupo de Investigaciones en Corrosión (GIC), por el préstamo de equipos y materiales para el desarrollo de las diversas pruebas en el proyecto de grado.*

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	13
1. ANTECEDENTES.....	17
2. OBJETIVOS.....	20
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3. METODOLOGÍA .....	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	23
4.1 PRÁCTICA 1. CORROSIÓN DEL ALUMINIO POR REACCIONES DE DESPLAZAMIENTO .....	24
4.2 PRÁCTICA 2. ESTABILIDAD DE DISTINTOS MATERIALES EN DIVERSOS MEDIOS MEDIANTE PRUEBAS DE INMERSIÓN .....	26
4.3 PRÁCTICA 3. CURVAS DE POLARIZACIÓN EN ACEROS AL CARBONO..	28
4.4 PRÁCTICA 4. CURVAS DE POLARIZACIÓN EN ACEROS INOXIDABLES..	31
4.5 PRÁCTICA 5. ELECTRODEPOSICIÓN POR MEDIO DE CELDA HULL .....	34
4.6 PRÁCTICA 6. ESPECTROSCOPÍA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA EN DIVERSOS METALES CON Y SIN RECUBRIMIENTO .....	37
4.7 PRÁCTICA 7. RESISTIVIDAD DE SUELOS.....	42
5. CONCLUSIONES .....	44
REFERENCIAS .....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	53

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Lista de materiales propuestos para la Práctica 2. ....	27

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Fases presentes en la metodología de trabajo. ....	21
Figura 2. Secuencia de una reacción de desplazamiento en una lámina de aluminio sumergida en una solución con iones de cobre, (a) preparación de la lámina, (b) preparación de la solución, (c) medición de la temperatura de la solución (40 °C), (d) inmersión de la lámina, (e) apariencia de la lámina después de 5 minutos, (f) 10 minutos, y (g) 20 minutos de reacción; y (h), (i) detalle de los productos formados durante la reacción. ....	25
Figura 3. Morfología de los productos de corrosión obtenidos en la prueba de inmersión durante 8 días, para diferentes medios: (a) Acero al carbono, (b) material de aporte para soldadura y (c) acero inoxidable AISI 316, en suelo artificial con alta concentración de sales; (d) Acero al carbono, (e) material de aporte para soldadura y (f) acero inoxidable, en suelo artificial con baja concentración de sales; y latón en ácido acético 5% a diferentes alturas: (g) sin sumergir, (h) la mitad sumergida y (i) completamente sumergida. ....	27
Figura 4. Potencial a circuito abierto para aceros AISI SAE 1020 y 1040 en NaCl 5%. ....	29
Figura 5. Resistencia a la polarización para aceros AISI SAE 1020 y 1040 en NaCl 5% ( $\Delta E = 40 \text{ mV}$ ; $v = 0,17 \text{ mV/s}$ ). ....	30
Figura 6. Curva de polarización de aceros AISI SAE 1020 y 1040 en NaCl 5% ( $v = 0,17 \text{ mV/s}$ ). ....	31
Figura 7. Potencial a circuito abierto para un acero inoxidable AISI 304 en $\text{H}_2\text{SO}_4$ 1 N, obtenidos en dos mediciones independientes. ....	32
Figura 8. Curva de polarización de acero inoxidable AISI 304 en $\text{H}_2\text{SO}_4$ 1 N. Las dos curvas fueron obtenidas bajo las mismas condiciones demostrando la reproducibilidad del experimento ( $v = 0,17 \text{ mV/s}$ ). ....	34

Figura 9. Apariencia de una lámina de acero al carbono recubierta por una bicapa de Cobre-Níquel, donde se observa la apariencia de una mala (A) y una buena (B) preparación superficial previa al proceso de electrodeposición .....	35
Figura 10. Esquema de las densidades de corriente en una pieza Hull para una intensidad aplicada de 1 [A]. .....	36
Figura 11. Apariencia de láminas de Acero al Carbono recubiertas con Cobre (Izquierda) y láminas de Cobre recubiertas con Níquel (Derecha), para diferentes amperajes aplicados utilizando la Celda Hull. ....	37
Figura 12. Curva de impedancia Nyquist para un acero galvanizado en NaCl al 3%, variando la frecuencia desde 100 [KHz] hasta 0,01 [Hz] (Amplitud 10 mV)....	38
Figura 13. Curva de impedancia Nyquist para un acero galvanizado recubierto con Primer en NaCl al 3%, variando la frecuencia desde 100 [KHz] hasta 0,01 [Hz] (Amplitud 10 mV).....	39
Figura 14. Curva de impedancia Nyquist para un acero galvanizado recubierto con una capa de Primer, luego una capa de pintura poliéster en NaCl al 3%, variando la frecuencia desde 100 [KHz] hasta 0,01 [Hz] (Amplitud 10 mV).....	40
Figura 15. Curva de impedancia Nyquist para un acero galvanizado en KOH a 0,1 M, variando la frecuencia desde 100 [KHz] hasta 0,01 [Hz] (Amplitud 10 mV). .....	41
Figura 16. Curva de impedancia Nyquist para un acero galvanizado recubierto con Primer en KOH a 0,1 M, variando la frecuencia desde 100 [KHz] hasta 0,01 [Hz] (Amplitud 10 mV).....	42

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo A. Libro de guías para el laboratorio de corrosión  
(Ver en la carpeta adjunta al CD)

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO Y MODIFICACIÓN DE LAS GUÍAS Y ACTIVIDADES PRÁCTICAS DEL LABORATORIO DE LA ASIGNATURA DE CORROSIÓN CORRESPONDIENTE AL PROGRAMA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES \*

**AUTORES:** Estévez Torres, Johan Steve y Medina Grateron, Diego Alberto \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Procesos de corrosión, técnicas electroquímicas, guías prácticas.

**DESCRIPCIÓN:** Con el paso del tiempo, los procesos de corrosión se han convertido en un punto vital para la integridad y desarrollo óptimo de todas las industrias. La corrosión o degradación de materiales ha sido objeto de estudio, con el fin de prever los daños que pueden ocurrir en diversos materiales, su morfología, las causas, el medio que lo produce y cómo se puede reducir el impacto corrosivo sobre este. Por tal motivo, en el presente proyecto se rediseñaron y modificaron las guías existentes en el actual Laboratorio de Corrosión del Programa de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander, con el fin de involucrar a los estudiantes en el estudio de diversos materiales y técnicas para la resolución de futuros problemas, en el ejercicio de su profesión como ingenieros metalúrgicos. Durante el presente trabajo se realizaron experimentos con el fin de mostrar a los estudiantes diferentes técnicas electroquímicas y normas internacionales de referencia en procesos relacionados con la Corrosión y de las industrias donde se podrían desempeñar, siendo pioneros en la implementación de estas en un laboratorio de docencia en pregrado a nivel nacional, las cuales son indispensables para la evaluación del comportamiento de diversos materiales, en especial en temas de degradación

---

\* Proyecto de Grado (Modalidad: Práctica en Docencia)

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Dr. Sergio Ismael Blanco Vásquez. Codirector: Dr. Mauricio Rincón Ortiz

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND MODIFICATION OF GUIDELINES AND ACTIVITIES FOR THE CORROSION SUBJECT LAB CORRESPONDING TO THE METALLURGICAL ENGINEERING AND MATERIALS SCIENCE PROGRAM \*

**AUTHORS:** Estévez Torres, Johan Steve and Medina Grateron, Diego Alberto \*\*

**KEYWORDS:** Corrosion processes, electrochemical techniques, practical guides.

**DESCRIPTION:** Over time, corrosion processes have become a vital point for the integrity and optimum development of all industries. Corrosion or degradation of materials has been studied in order to predict the damages that can occur in different materials, their morphology, the causes, the medium that produces it and how the corrosive impact on it can be reduced. Therefore, in the present project, the existing guides in the current Corrosion Laboratory of the Metallurgical Engineering Program of the Industrial University of Santander were redesigned and modified in order to involve students in the study of different materials and techniques for the resolution of future problems, in the exercise of their profession as metallurgical engineers. During the present work experiments were carried out in order to show students different electrochemical techniques and international reference standards in processes related to Corrosion and of the industries where they could be performed, being pioneers in the implementation of these in a teaching laboratory in undergraduate at national level, which are indispensable for the evaluation of the behavior of diverse materials, especially in degradation topics.

---

\* Degree Project (Modality: Teaching Practice)

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Dr. Sergio Ismael Blanco Vásquez. Codirector: Dr. Mauricio Rincón Ortiz.

## INTRODUCCIÓN

El Ingeniero Metalúrgico, es una persona capaz de transformar la materia prima en materiales de interés para el uso en diversas industrias. Está calificado para seleccionar apropiadamente los materiales con el fin de desarrollar excelentes aplicaciones en el medio que lo rodea. A su vez, cuenta con las herramientas necesarias para realizar el control y monitoreo de los materiales que se encuentran en servicio con el fin de evitar su degradación temprana.

Actualmente, dentro de su plan de estudios, el Programa de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la Universidad Industrial de Santander, cuenta con la asignatura Corrosión, de tipo teórico-práctica. Desde hace varios años, se ha podido apreciar que las prácticas existentes han perdido vigencia y no se han ido adaptando a los problemas de corrosión que actualmente se presentan en la industria, debido a que se enfocan en el estudio de pares galvánicos.

Basándose en la idea de que las experiencias de los laboratorios cada día demuestran por medio del método científico los fenómenos físicos, químicos, termodinámicos, cinéticos y biológicos, además de los elementos y sistemas involucrados en los procesos estudiados en el aula de clase, se ha llegado a la conclusión que las actividades que se realizan actualmente en el Laboratorio de Corrosión carecen de una guía práctica que permita al estudiante comprender y estudiar eficazmente los conceptos vistos en clase, lo cual es de suma importancia a la hora de enfrentarse a la realidad: La vida laboral.

Por lo tanto, se considera que se debe mejorar el actual esquema de actividades prácticas que se realizan en el laboratorio ya que no satisfacen plenamente el perfil científico y tecnológico que requiere el Ingeniero Metalúrgico, con la finalidad

de mejorar su formación en el área de corrosión considerando los requerimientos y tendencias actuales.

Para empezar con este avance, es de vital importancia diseñar nuevas prácticas para el Laboratorio de Corrosión, donde se pueda estudiar el uso de sistemas mixtos, sistemas con múltiples materiales y situaciones que puedan representar o simular mecanismos de corrosión con el propósito de instruir a los estudiantes que cursen esta materia. En este espacio práctico se propondrán actividades que ayuden a desarrollar análisis posteriores basándose en los resultados de las experiencias obtenidas en el Laboratorio de Corrosión.

## 1. ANTECEDENTES

El aprendizaje de la corrosión es un factor esencial para el desarrollo de todo ingeniero metalúrgico; por tal razón, la forma como esta se transmite es preponderante a la hora de querer plasmar ideas y conceptos en los estudiantes, de forma que permita apropiarse de su profesión y resolver acertadamente los retos que exige la vida laboral. Al día de hoy, en la Universidad Industrial de Santander se siguen realizando prácticas de laboratorio que se diseñaron con equipos de vieja data y por consecuencia, estas prácticas se diseñaron bajo las necesidades y tendencias de aquella época. En Colombia, dentro del marco de referencia que se tiene con programas académicos similares al de Ingeniería Metalúrgica o de Materiales como lo son la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia [1] y la Universidad de Antioquia [2], cabe resaltar que en estas instituciones las asignaturas son totalmente teóricas y no poseen laboratorio para la enseñanza experimental en Corrosión.

Debido a esto, se hizo un análisis de los procesos de enseñanza en diferentes laboratorios dedicados a la docencia en prestigiosas universidades del mundo, donde se obtuvo un planteamiento más amplio para el diseño de las prácticas. Por ejemplo, en la Universidad Nacional Autónoma de México, se observó la influencia que tienen los procesos bajo las normas ASTM. Dentro de estas normas, se busca que los estudiantes realicen procesos de evaluación de la velocidad de corrosión mediante las técnicas de: pérdida de peso, resistencia a la polarización y curvas de polarización. También busca la comprensión de factores como corrosión por picado e inhibidores de corrosión localizada en aceros al carbono, aceros inoxidables y aleaciones base aluminio, así como técnicas de impedancia electroquímica y la demanda de corriente para la determinar los criterios de protección por corriente impresa. [3]

En la Universidad de Manchester en Reino Unido, el enfoque que se le ha dado a la enseñanza de los diversos procesos que comprende esta rama de interés en los materiales, ha sido en enseñanza de la corrosión en procesos óptimos donde se requiera el análisis bajo esfuerzos y tensiones, el análisis en materiales de uso en la industria, el control de la corrosión, ya sea a través de la protección catódica, la inhibición de la corrosión y los revestimientos protectores. [4]

En la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima - Perú, en el Programa de Ingeniería Metalúrgica de la Escuela de Geología e Ingenierías de Minería y Metalurgia se enseña la asignatura teórico-práctica de Corrosión y Degradación de Materiales, la cual se encuentra en el nivel 9 de su plan de estudios donde prepara a los estudiantes en la comprensión de los fenómenos de corrosión, analizando sus características, sus causas, midiendo y controlando su velocidad de propagación en diferentes tipos de materiales. Para el análisis de corrosión, los estudiantes utilizan equipos como hornos tubulares, potenciostatos, técnicas de electrodeposición, así como software especializado en técnicas de medición electroquímica y espectroscopia de impedancia electroquímica. Al final del curso, los estudiantes presentan y defienden un proyecto sobre un problema particular de corrosión. [5]

Otros factores de interés en la enseñanza de la corrosión están relacionados con la aparición de nuevas técnicas y estudios por parte de diferentes autores. Diversos investigadores de las Universidades de la República Democrática de China, han desarrollado un experimento con materiales cobre-aluminio visible en una solución gel de agar, donde se observan patrones de crecimiento de cristal de cobre, con el fin de atraer el interés de los estudiantes y la investigación de los procesos de corrosión que allí ocurren. [6] La asociación de educadores de química en California, Estados Unidos, ha tratado de llevar el estudio de este campo con situaciones experimentales que conlleven casos de la vida real, en materiales nuevos o usados y que se puedan someter a las condiciones en las

que se pondrán en funcionamiento (presión, temperatura y esfuerzos) para determinar los efectos de la corrosión en estos elementos. [7]

Onuchukwu, en Kano, Nigeria, ha desarrollado interesantes experimentos con sus estudiantes con el fin de enseñarles los factores más influyentes en el estudio de la corrosión. En estos experimentos, los más destacados fueron aquellos donde se trataron la susceptibilidad a la corrosión y la inhibición de la corrosión de un metal; Estos experimentos fueron realizados con una aleación de aluminio AA1060. [8]. Finalmente, Bodo Müller, ha desarrollado estudios donde involucra la inhibición de la corrosión para el aluminio. [9]

De acuerdo al estado actual del laboratorio, la revisión bibliográfica, y el estudio de las universidades nacionales e internacionales donde, cómo y qué se está enseñando en el área de corrosión, se plantearon los siguientes objetivos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar, modificar, documentar e implementar un sistema de prácticas de laboratorio con sus respectivas guías para la parte práctica de la asignatura de corrosión correspondiente al Programa de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander.

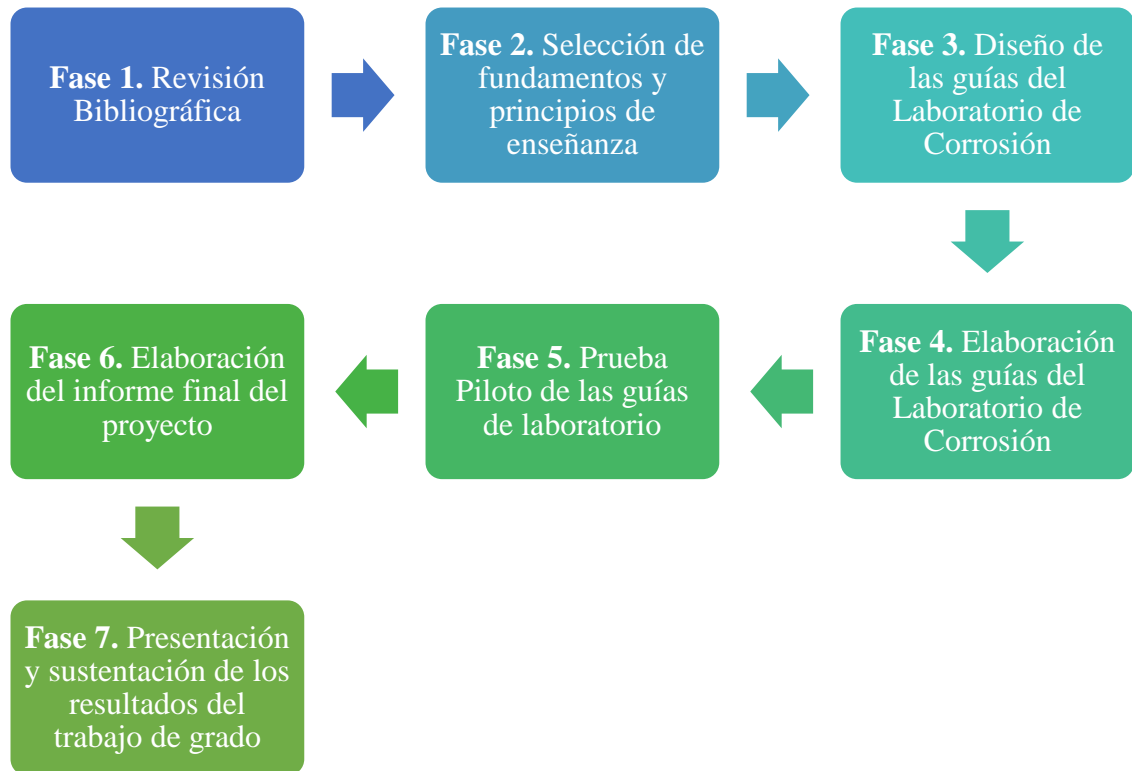
### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar los conceptos y aplicaciones más importantes de la corrosión en la metalurgia, y las técnicas utilizadas para su estudio de manera que sirvan de base conceptual para elaborar las guías.
- Diseñar el nuevo modelo de guías para la práctica de laboratorio.
- Realizar las prácticas sugeridas en la guía para validar su aplicación con pruebas piloto acorde a las que se consideren relevantes para el nuevo plan de aprendizaje.

### 3. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología que se utilizó como base para el desarrollo del trabajo propuesto, la cual se distribuyó en 7 fases, como se observa en la Figura 1.

**Figura 1. Fases presentes en la metodología de trabajo.**



Inicialmente para la Fase 1 se realizó la búsqueda y recopilación de información respecto a las nuevas estrategias de enseñanza de la Corrosión. En la Fase 2, se realizó una selección apropiada de los fundamentos y principios que se desea que los estudiantes aprendan en el laboratorio, y se definió cuáles prácticas son

acordes teniendo en cuenta lo que se espera que los estudiantes aprendan de la asignatura Corrosión.

Posteriormente, con base en los anteriores ideales de trabajo, en la Fase 3 se diseñaron las guías de enseñanza práctica del Laboratorio de Corrosión. A continuación, se desarrollaron los experimentos correspondientes para cada guía planteada, se verificó que la actividad se pudiera realizar de forma repetitiva evaluando los diferentes parámetros que pueden existir al desarrollar cada práctica, tal y como correspondía a la Fase 4. Seguidamente, se hizo un diagnóstico del estado de los equipos y materiales existentes en el Laboratorio de Corrosión de la Universidad Industrial de Santander.

Al finalizar este trabajo diagnóstico, se realizó la Fase 5, que estaba relacionada con las pruebas piloto de las prácticas diseñadas más relevantes, con estudiantes pertenecientes al Semillero de “Recubrimientos de Corrosión”, dirigido por el Dr. Sergio Ismael Blanco Vásquez, con la finalidad de comprobar y verificar las estructuras que se pretenden enseñar en cada práctica de laboratorio.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis de los requerimientos laborales, el contenido de los cursos dictados en otras instituciones y las características propias del Laboratorio de Corrosión y el Programa de Ingeniería Metalúrgica se seleccionaron siete temas para el desarrollo de las nuevas prácticas del laboratorio, estas son:

- Corrosión del aluminio por reacciones de desplazamiento
- Estabilidad de distintos materiales en diversos medios mediante pruebas de inmersión
- Evaluación de aceros al carbono por medio de curvas de polarización
- Evaluación del estado activo/pasivo de aceros inoxidable por medio de curvas de polarización
- Electrodeposición por celda Hull
- Análisis de materiales con recubrimiento por medio de espectroscopia de impedancia electroquímica
- Resistividad de suelos

En base a cada uno de estos temas se diseñaron las nuevas prácticas del laboratorio, incluyendo en cada una de estas la evaluación de diferentes materiales de interés ingenieril (Aceros al Carbono, Aceros Inoxidables, Aceros Galvanizados, Aluminio, Cobre, Latón, Níquel, entre otros). Una vez seleccionados los temas y diseñadas las prácticas se hicieron pruebas de laboratorio con el fin de definir los parámetros experimentales que serán utilizados por los estudiantes del curso. Por ejemplo, en el desarrollo de la Práctica 3, **Curvas de Polarización en Aceros al Carbono**, se estudiaron los diversos materiales, el diseño y montaje de la celda, la ubicación de los electrodos, el orden y el tipo de técnicas electroquímicas a utilizar, el tipo y concentración del electrolito, la duración de cada técnica y la práctica en general, la reproducibilidad y repetitividad de los resultados obtenidos en los diferentes experimentos.

Una vez probados y verificados cada uno de estos parámetros se procedió a la elaboración del “**Libro de Guías para el Laboratorio de Corrosión**” que se encuentra en el Anexo A. Con esta información se evaluó la pertinencia del nuevo contenido del curso con los estudiantes miembros del semillero de “Recubrimientos de Corrosión”. Esta experiencia permitió demostrar la viabilidad de los nuevos experimentos y técnicas que se realizarán en cada práctica.

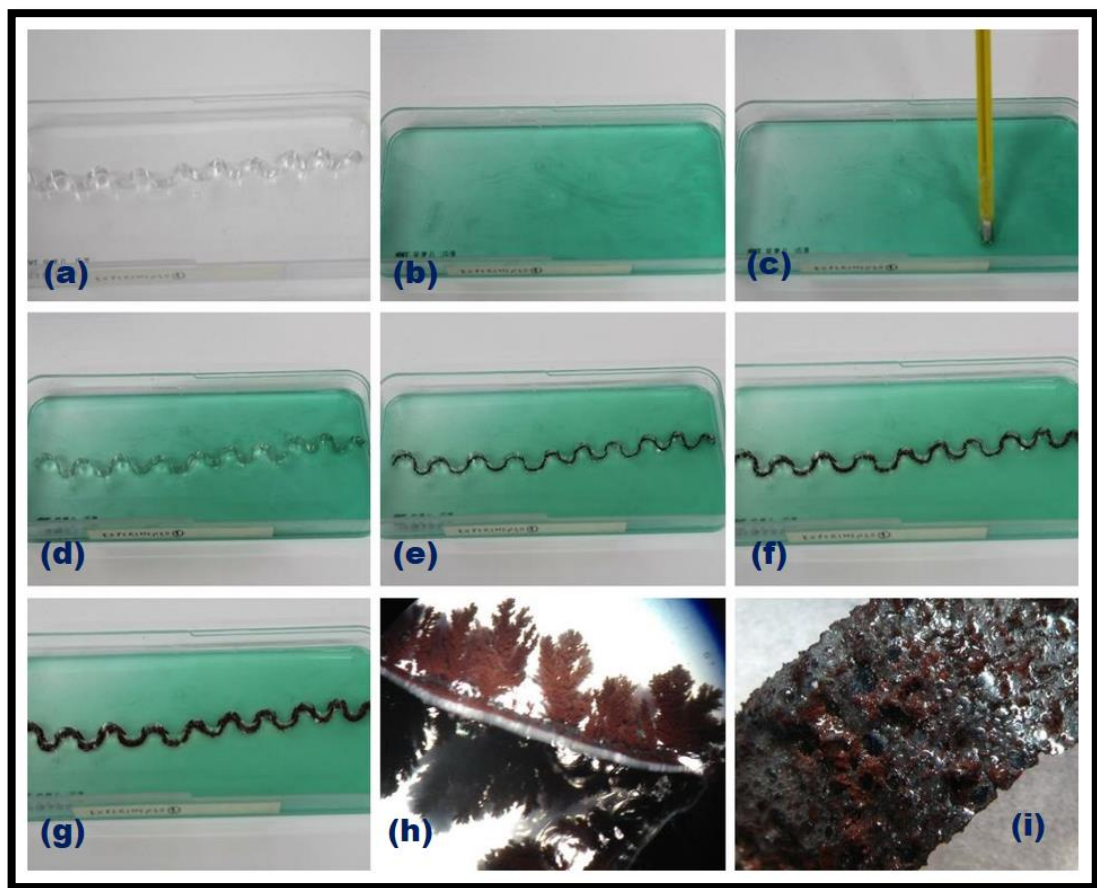
Los resultados obtenidos en el desarrollo del presente proyecto, se dieron a partir del diseño de cada actividad y su debida corrección. Cabe aclarar que, en todas las prácticas desarrolladas, se variaron parámetros experimentales con el fin de encontrar situaciones más acordes para la enseñanza dentro del Laboratorio de Corrosión. A continuación, se hará una descripción de los resultados que se desean obtener para cada práctica y se describen los contenidos que el estudiante deberá desarrollar:

#### **4.1 PRÁCTICA 1. CORROSIÓN DEL ALUMINIO POR REACCIONES DE DESPLAZAMIENTO**

La Corrosión del aluminio por reacciones de desplazamiento, consiste en un experimento realizado por educadores de la República Democrática de China, donde se sumerge una lámina de aluminio en una solución agar rica en cobre [6]. (Anexo A, Práctica 1.). En este experimento se puede observar con facilidad las reacciones anódicas y catódicas que se producen al momento de interactuar los iones de  $\text{Cu}^{2+}$  con la lámina de aluminio. Las principales reacciones que se pueden identificar en este experimento están dadas a continuación:



**Figura 2.** Secuencia de una reacción de desplazamiento en una lámina de aluminio sumergida en una solución con iones de cobre, (a) preparación de la lámina, (b) preparación de la solución, (c) medición de la temperatura de la solución (40 °C), (d) inmersión de la lámina, (e) apariencia de la lámina después de 5 minutos, (f) 10 minutos, y (g) 20 minutos de reacción; y (h), (i) detalle de los productos formados durante la reacción.



En el desarrollo esta práctica, se desea que además de que los estudiantes observen como los iones de cobre se depositan en el aluminio conforme transcurre el tiempo, puedan apreciar su dependencia existente entre las reacciones, la identificación de las reacciones anódicas y catódicas que se están dando en el proceso corrosivo, la forma como se puede calcular la velocidad de

este y el color característico del cobre en el aluminio con el paso del tiempo. En la Figura 2. se observa los diversos pasos que el estudiante debe realizar durante la práctica, desde el momento de preparación del material dado (Ver Figura 2a.), hasta su observación en un estereoscopio, o con la ayuda de un Smartphone (Ver Figuras. 2h. y 2i.).

Otra variable que se desea que los estudiantes analicen bajo este experimento, es la forma que posee la lámina y la influencia que se tiene al realizar el experimento con otros patrones. Con esto, se puede identificar como se depositan los iones de cobre en la superficie del material, dependiendo de la forma escogida [16-23].

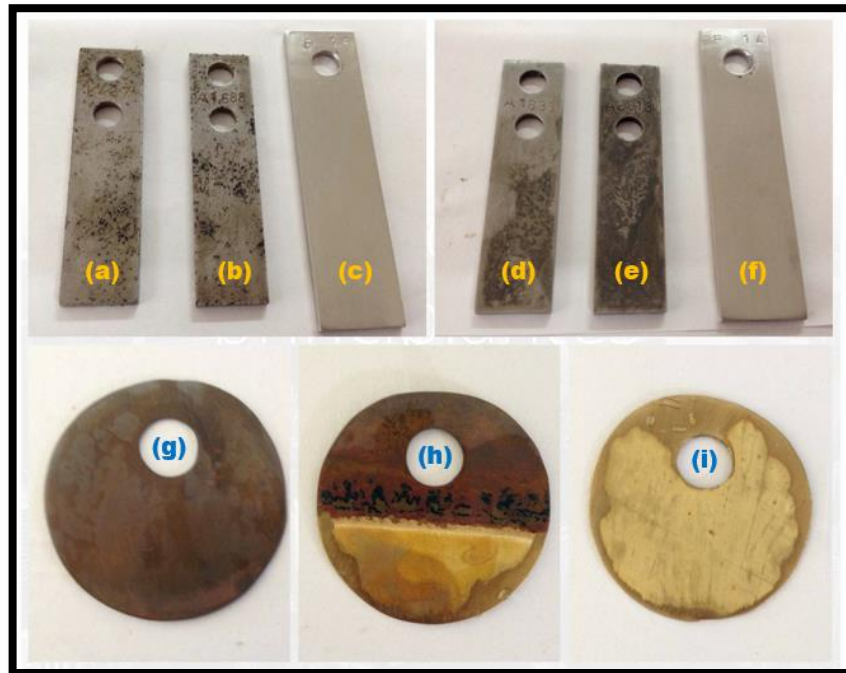
#### **4.2 PRÁCTICA 2. ESTABILIDAD DE DISTINTOS MATERIALES EN DIVERSOS MEDIOS MEDIANTE PRUEBAS DE INMERSIÓN**

Los ensayos de inmersión en soluciones o suelos, son de vital importancia para determinar el comportamiento de un material en cierto medio. Con la Práctica 2, se busca que el estudiante pueda comprender la velocidad a la cual se corroe un material en tiempo real, en concordancia con la norma ASTM G31 [11]. También se busca que comprenda y conozca la morfología de los productos de corrosión presentes en los materiales expuestos en ciertos medios como se puede apreciar en la Figura 3. donde se muestran los diversos materiales que estuvieron inmersos en cada prueba, y puedan analizar la incidencia de factores como el pH de las soluciones, la concentración de oxígeno y sales propias de cada tipo de suelo, donde se puedan generar reacciones catódicas producto del agua presente en estos o reacciones mucho más fuertes debido a la presencia de sales que puedan deteriorar el material en estudio. También, se busca que el estudiante esté en la capacidad de analizar si hay presencia de óxidos estables u óxidos adherentes a la hora de producirse la reacción anódica de los metales presentes. A su vez, se presentan los diversos materiales que el docente debe utilizar para el desarrollo de la práctica, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. Lista de materiales propuestos para la Práctica 2.**

Tipo	Materiales		Medio
Prueba de Inmersión	<b>Cupones</b>	<b>Láminas</b>	
	Aceros Inoxidables	Aceros Galvanizados	Suelos
	Aceros al Carbono	Cobre	
	Soldaduras		
		Latón	Ácido Acético
		Acero Inoxidable	Ácido Sulfúrico
		Acero al Carbono	Sal
		Acero Galvanizado	Hidroxido de Potasio

**Figura 3. Morfología de los productos de corrosión obtenidos en la prueba de inmersión durante 8 días, para diferentes medios: (a) Acero al carbono, (b) material de aporte para soldadura y (c) acero inoxidable AISI 316, en suelo artificial con alta concentración de sales; (d) Acero al carbono, (e) material de aporte para soldadura y (f) acero inoxidable, en suelo artificial con baja concentración de sales; y latón en ácido acético 5% a diferentes alturas: (g) sin sumergir, (h) la mitad sumergida y (i) completamente sumergida.**



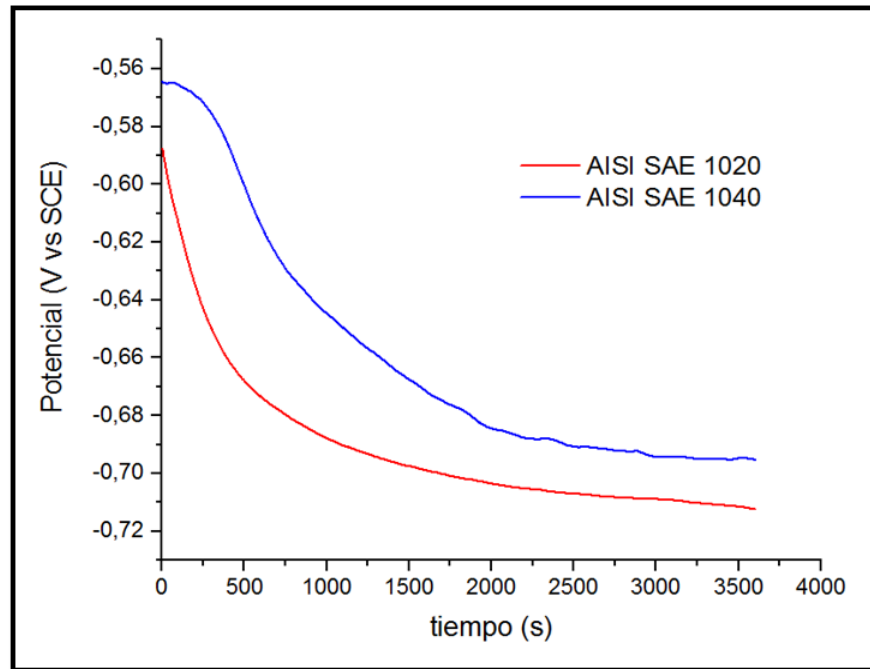
Finalmente, con el fin de preparar a los estudiantes para diversas situaciones en el ámbito laboral, se desea mostrar el uso de los cupones, y los tipos que existen para el uso en la industria y la finalidad que poseen, tal como se explica en la norma NACE SP0775-2013 [12]. Estos Cupones es una forma real de estudiar el efecto corrosivo que pueden tener los materiales en diferentes medios, conforme transcurre el tiempo. Dependiendo del tipo de cupón, se pueden analizar variables como la deposición del fluido sobre la tubería, el análisis de la corrosión sobre un cordón de soldadura y la morfología de los productos de corrosión obtenidos in situ [24-25].

### **4.3 PRÁCTICA 3. CURVAS DE POLARIZACIÓN EN ACEROS AL CARBONO**

Para el desarrollo de la práctica correspondiente a las curvas de polarización de aceros al carbono (Anexo A, Práctica 3.) [26-30], se busca que los estudiantes puedan comprender cómo funciona una celda electroquímica y cuáles son los resultados que se pueden obtener al aplicar las diferentes técnicas de interés en el estudio de los materiales. Cabe resaltar, que en el desarrollo de las pruebas piloto con estudiantes del semillero de “Recubrimientos de Corrosión” se hizo énfasis en los elementos que conforman una celda electroquímica, las conexiones eléctricas, los tipos de electrodos a utilizar, el orden de las técnicas para la práctica y la distancia mínima que debe existir entre el electrodo de referencia y el electrodo de trabajo.

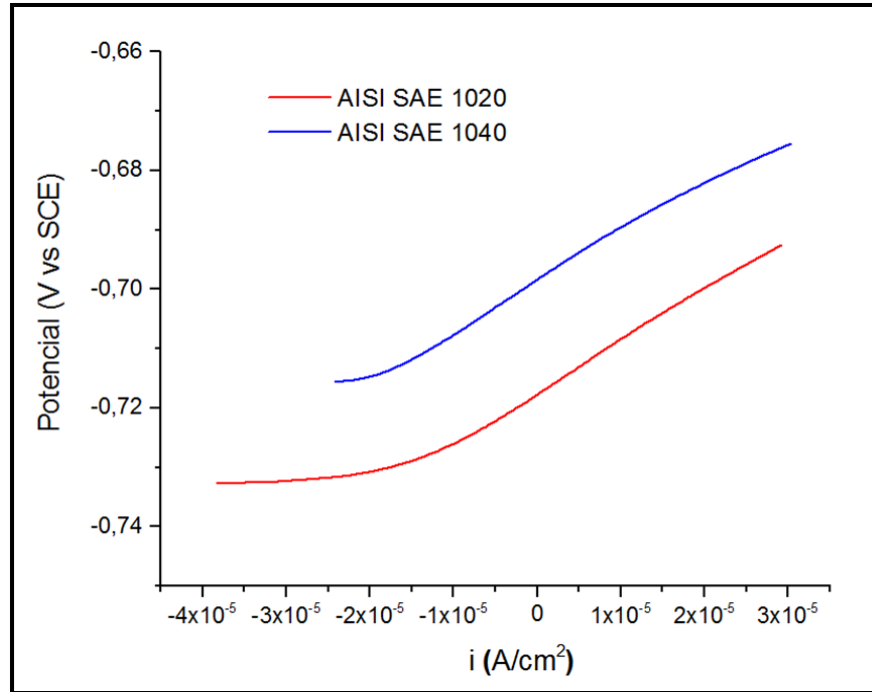
Cuando se realiza una medición de potencial a circuito abierto (Ver Figura 4.), se busca evaluar el potencial del material en cierto medio conforme transcurre el tiempo sin que se afecte por la presencia de la corriente. De hecho, en esta técnica la densidad de corriente tiende a 0, y es en la superficie donde ocurren las reacciones, tanto de oxidación como de reducción.

**Figura 4. Potencial a circuito abierto para aceros AISI SAE 1020 y 1040 en NaCl 5%.**



La segunda técnica electroquímica a realizar es la resistencia a la polarización (Ver Figura 5.). Su objetivo básicamente es que los estudiantes puedan determinar la velocidad de corrosión, ya que la pendiente que representa esta curva es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión. La curva está dada por la diferencia existente entre la corriente anódica y la corriente catódica.

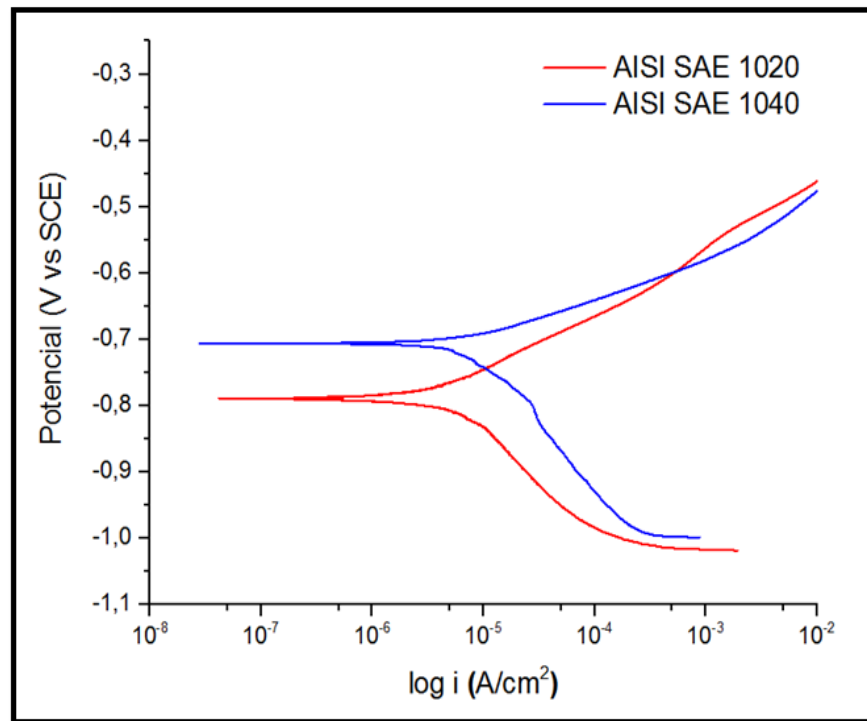
**Figura 5. Resistencia a la polarización para aceros AISI SAE 1020 y 1040 en NaCl 5% ( $\Delta E = 40 \text{ mV}$ ;  $v = 0,17 \text{ mV/s}$ ).**



Finalmente, la última técnica a analizar es la curva de polarización (Ver Figura 6.). Ésta se realiza después de haber realizado las técnicas de potencial a circuito abierto y de la resistencia a la polarización, debido a que las corrientes que circulan en la técnica pueden deteriorar el material. Gracias a la curva de polarización y la información contenida en la norma ASTM G3 [26], se podrán encontrar ciertas variables que ayudarán a comprender el desempeño del material en el medio que se está evaluando; Igualmente, para cada rama, tanto la anódica como la catódica, se pueden trazar las pendientes de Tafel. Con esta pendiente se busca analizar la velocidad a la cual cambia el potencial por década de corriente; este tipo de pendientes son características de cada material y en cierto modo puede corroborar el tipo de material que se está estudiando.

Al intersectar ambas pendientes, se podrá observar claramente cuáles son los valores de  $I_{corr}$  y  $E_{corr}$  que corresponden al material en el medio y como se puede prevenir la corrosión en el momento de servicio. A su vez, se puede inferir el tipo de control que se presenta en cada rama, ya sea cinético, por difusión o mixto.

**Figura 6. Curva de polarización de aceros AISI SAE 1020 y 1040 en NaCl 5% ( $v = 0,17$  mV/s).**



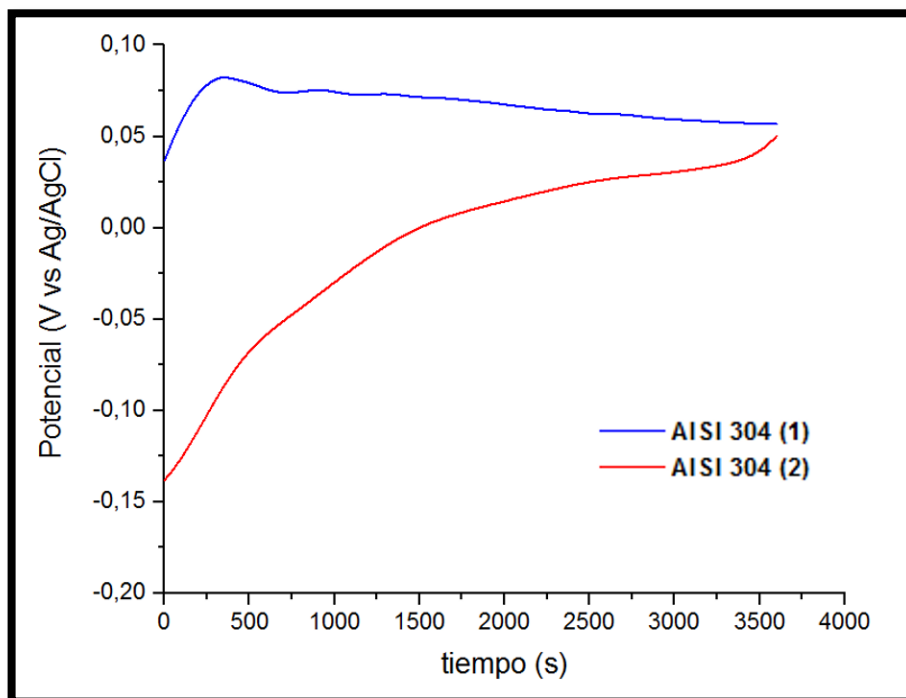
#### 4.4 PRÁCTICA 4. CURVAS DE POLARIZACIÓN EN ACEROS INOXIDABLES

Para el desarrollo de la práctica correspondiente a las curvas de polarización de aceros inoxidable (Anexo A, Práctica 4) [31], se busca que los estudiantes comprendan y visualicen el comportamiento de un acero inoxidable, para un medio dado (especialmente ácido) y cuáles son los resultados que se pueden obtener al

aplicar las diferentes técnicas de interés (potencial a circuito abierto y polarización anódica) en el estudio de este tipo de aceros.

Cuando se realiza una medición de potencial a circuito abierto (Ver Figura 7.), se busca que el acero estabilice su potencial conforme transcurre el tiempo sin que se afecte por la presencia de la corriente a tal punto en que esta técnica las corrientes que circulan por la celda electroquímica son muy pequeñas, cercanas a 0 y es en la superficie donde ocurren las reacciones, tanto de oxidación como de reducción (igual a la práctica anterior).

**Figura 7. Potencial a circuito abierto para un acero inoxidable AISI 304 en  $H_2SO_4$  1 N, obtenidos en dos mediciones independientes.**



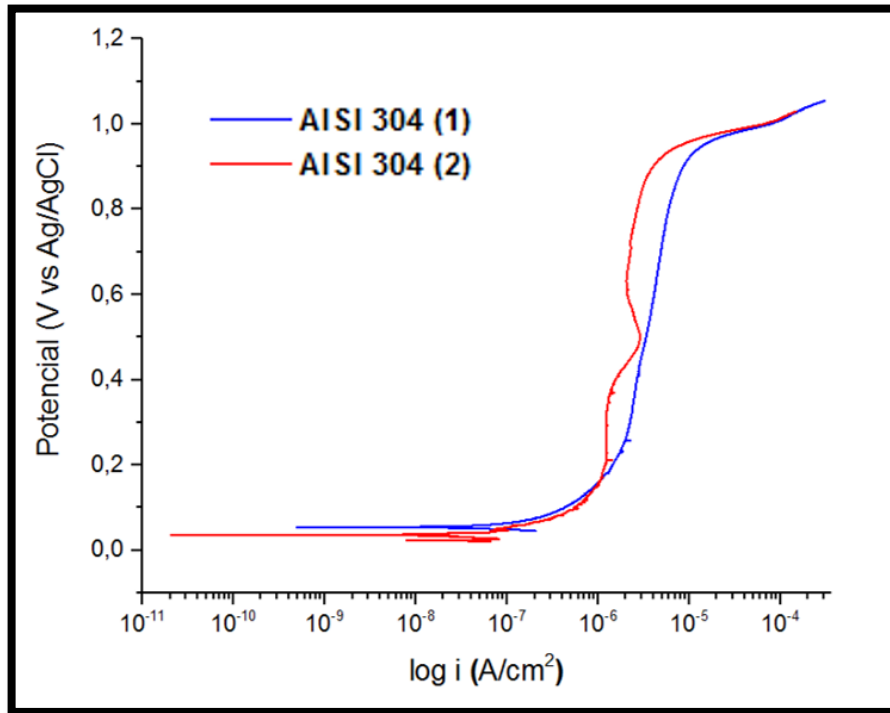
La segunda y última técnica a analizar es la curva de polarización (Ver Figura 8.). Ésta se realiza después de haber realizado la técnica de potencial a circuito

abierto debido a que las corrientes que circulan en la técnica pueden deteriorar o modificar destructivamente el material. Teniendo en cuenta que los parámetros en este ensayo son diferentes respecto al acero al carbono; según la norma ASTM G5 [14], no se debe realizar la curva catódica, sino solamente un barrido de la curva anódica desde -10 [mV] hasta los 800 [mV] vs. el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), ya que si se realiza la curva catódica, estos potenciales pueden romper la capa de óxido de cromo del material, y se obtendrían resultados incoherentes para la curva anódica; con esta técnica se podrán encontrar ciertas variables que ayudarán a comprender el desempeño del material en el medio que se está evaluando (para este caso, según la norma ASTM G5 [14], un ácido).

Con esta curva se busca que el estudiante pueda analizar y distinguir las diferentes zonas y transformaciones del comportamiento activo/pasivo de un acero inoxidable: activación, pasivación, inicio de corrosión por picado y transpasivación; también las variables (contenido de cromo y elementos de aleación en el acero inoxidable, tipo y concentración del electrolito, temperatura, agitación), que pueden modificar y mover la curva en diferentes posiciones.

Este tipo de curvas son características de cada acero inoxidable y en cierto modo puede corroborar el tipo de material que se está estudiando. A su vez, se puede inferir el tipo de control que se presenta en cada zona, ya sea cinético, por difusión o mixto, para que el estudiante pueda tener un amplio panorama a la hora de concluir la mejor composición esperada de la capa de óxido de cromo y realizar una selección de un acero inoxidable que resista sus principales peligros de corrosión como: corrosión intergranular, galvánica, por contacto, por picadura o bajo esfuerzo.

**Figura 8. Curva de polarización de acero inoxidable AISI 304 en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 N. Las dos curvas fueron obtenidas bajo las mismas condiciones demostrando la reproducibilidad del experimento ( $v = 0,17$  mV/s).**



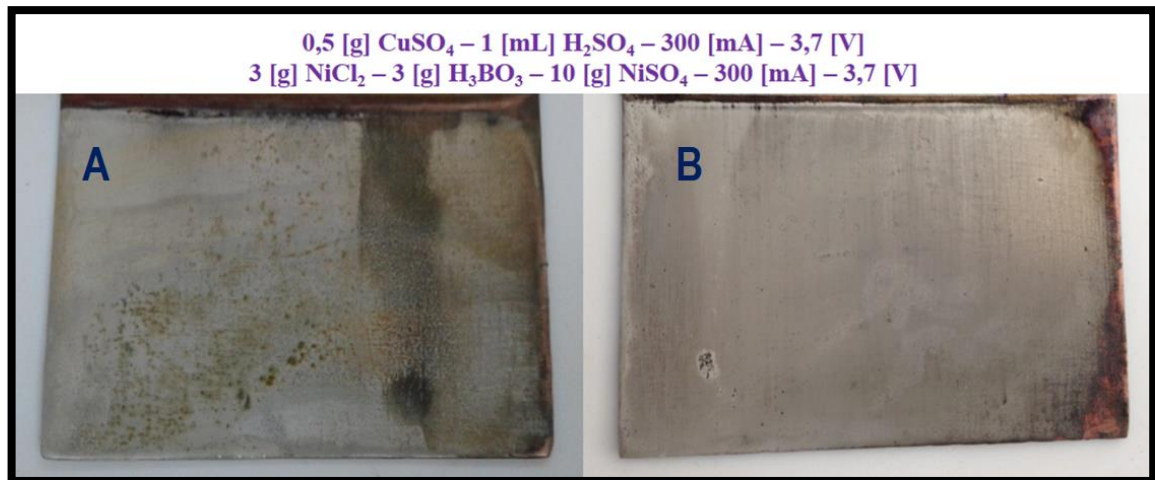
#### **4.5 PRÁCTICA 5. ELECTRODEPOSICIÓN POR MEDIO DE CELDA HULL**

En el desarrollo de esta Práctica, se busca que el estudiante, luego de comprender la importancia de la preparación de una celda electroquímica, y los posibles errores (Mal lijado, mal decapado, mala limpieza, contacto directo con las manos, mal contacto eléctrico) que pueden afectar las medidas y obtener resultados inadecuados (Ver Figura 9.) [32-34], analice y evalúe las reacciones ocurrientes en un proceso de electrodeposición tanto químico, como por la acción de una densidad de corriente eléctrica tanto en un cobreado sobre acero al carbono, como un niquelado sobre cobre. Con esto, principalmente analizaran el efecto de la serie galvánica a la hora de realizar una electrodeposición y cuales

materiales se están comportando como ánodo y cátodo, con sus respectivas reacciones de oxidación y reducción.

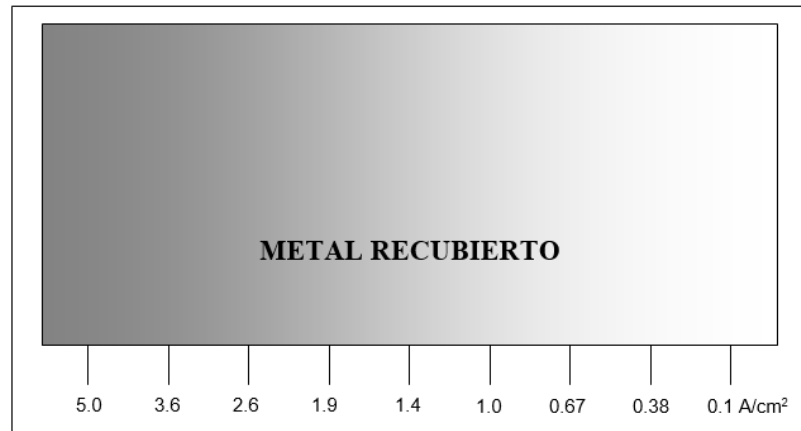
De igual manera, al desarrollar esta práctica de laboratorio, el estudiante estará en la capacidad de analizar la dependencia de variables operacionales tales como la temperatura, el pH y las concentraciones de las soluciones, las cuales les permitirán inferir sobre el tipo de recubrimiento que pueden obtener (electroless o electrodeposición).

**Figura 9. Apariencia de una lámina de acero al carbono recubierta por una bicapa de Cobre-Níquel, donde se observa la apariencia de una mala (A) y una buena (B) preparación superficial previa al proceso de electrodeposición**



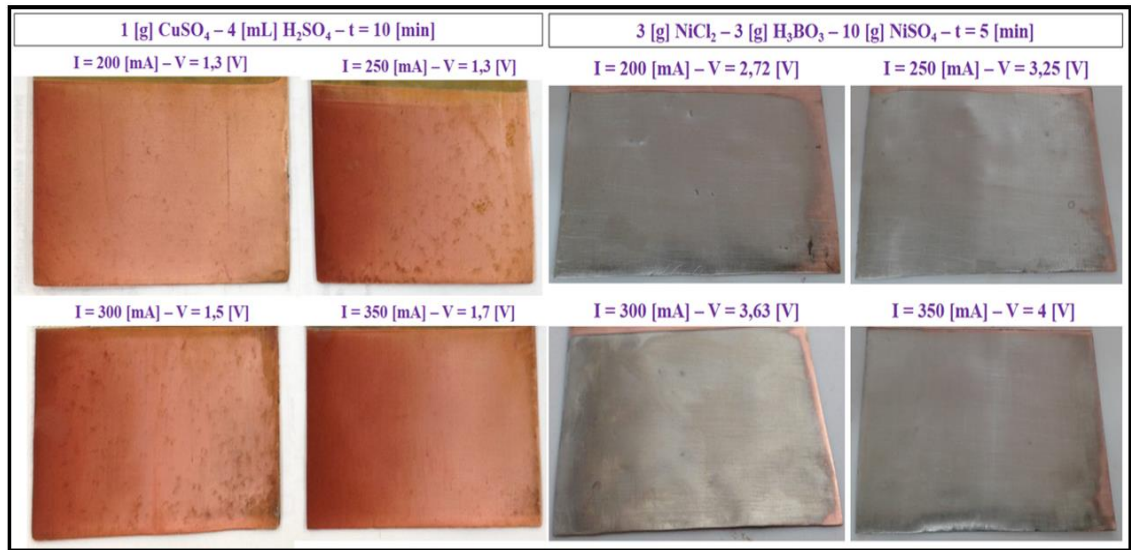
Para la electrodeposición por acción de corriente, al emplearse una celda Hull en esta Práctica, se espera que los estudiantes entiendan el comportamiento de una lámina a recubrir donde el diseño de la celda se hizo particularmente para que exista una variación tanto en la capa recubierta por la diferencia de densidad de corriente al estar posicionada de manera angular con la lámina que actúa como ánodo; donde a menor distancia, mayor densidad de corriente, mayor capa electrodepositada (Ver Figura 10.).

**Figura 10. Esquema de las densidades de corriente en una pieza Hull para una intensidad aplicada de 1 [A].**



Debido a que no existe una norma específica para esta celda (solamente una norma guía para la terminología relacionada con electrodeposiciones (ASTM B374 [15]), los estudiantes, de acuerdo a ciertos parámetros que se pueden variar en el ensayo (como lo son la receta electrolítica, el amperaje a aplicar, el tiempo de acción), pueden analizar sus resultados de acuerdo a estas variables, evaluar el estado de la electrodeposición de acuerdo a los cambios de densidad de corriente y observar su apariencia, donde la zona más cerca tiene mayor contraste, y la zona más lejana, menor contraste (Ver Figura 11.).

**Figura 11. Apariencia de láminas de Acero al Carbono recubiertas con Cobre (Izquierda) y láminas de Cobre recubiertas con Níquel (Derecha), para diferentes amperajes aplicados utilizando la Celda Hull.**



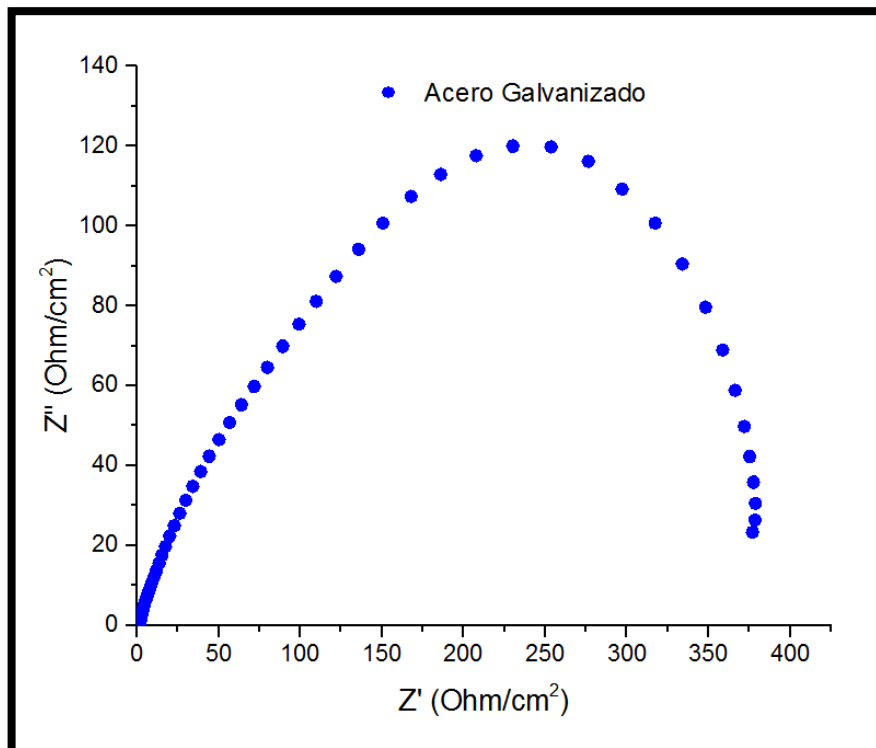
#### **4.6 PRÁCTICA 6. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA EN DIVERSOS METALES CON Y SIN RECUBRIMIENTO**

Para el desarrollo de la práctica correspondiente a EIS - Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (Anexo A, Práctica 6) [35-39], se busca que los estudiantes puedan entender el comportamiento de un metal, con y sin recubrimiento para un medio dado, a partir de los resultados que se pueden obtener al aplicar esta técnica en el estudio de los diferentes recubrimientos que existen y de la manera en cómo se deben interpretar.

Para la medición de potencial a circuito abierto, tal y como se explica en las prácticas 3 y 4, se busca que el material estabilice su potencial conforme transcurre el tiempo sin que se afecte por la presencia de la corriente a tal punto

en que esta técnica la densidad de corriente tienda a 0 (como se ve en las Figuras 4. y 7.).

**Figura 12. Curva de impedancia Nyquist para un acero galvanizado en NaCl al 3%, variando la frecuencia desde 100 [KHz] hasta 0,01 [Hz] (Amplitud 10 mV).**

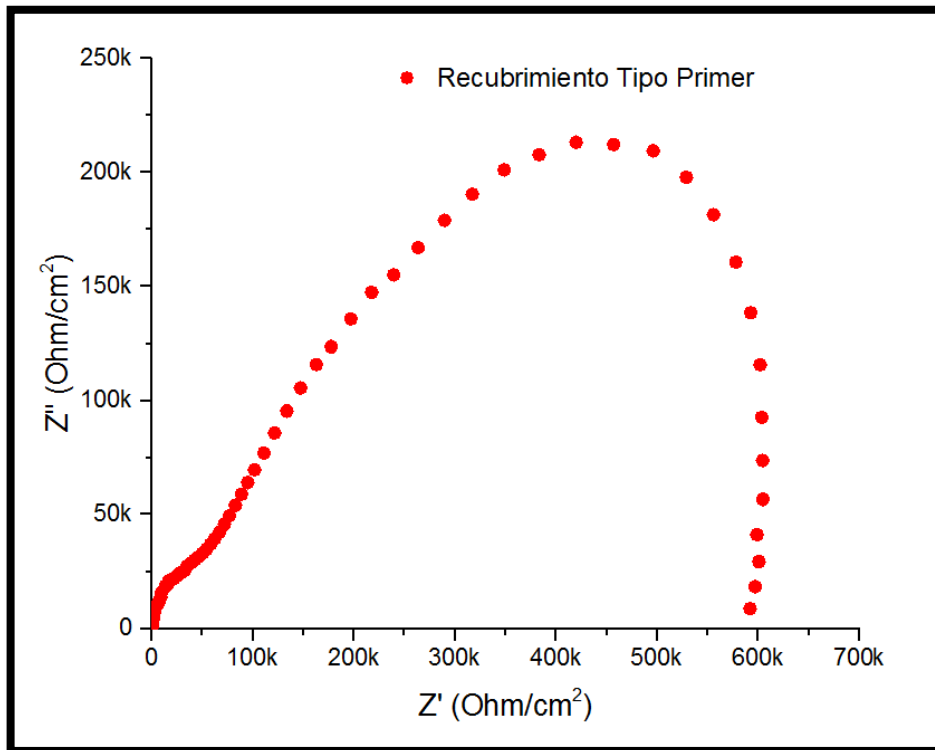


La segunda y última técnica a analizar es la de EIS potencioestática, la cual se realiza después de la técnica de potencial a circuito abierto; donde se obtienen los diagramas de Nyquist de Impedancia EIS (Ver Figura 12.).

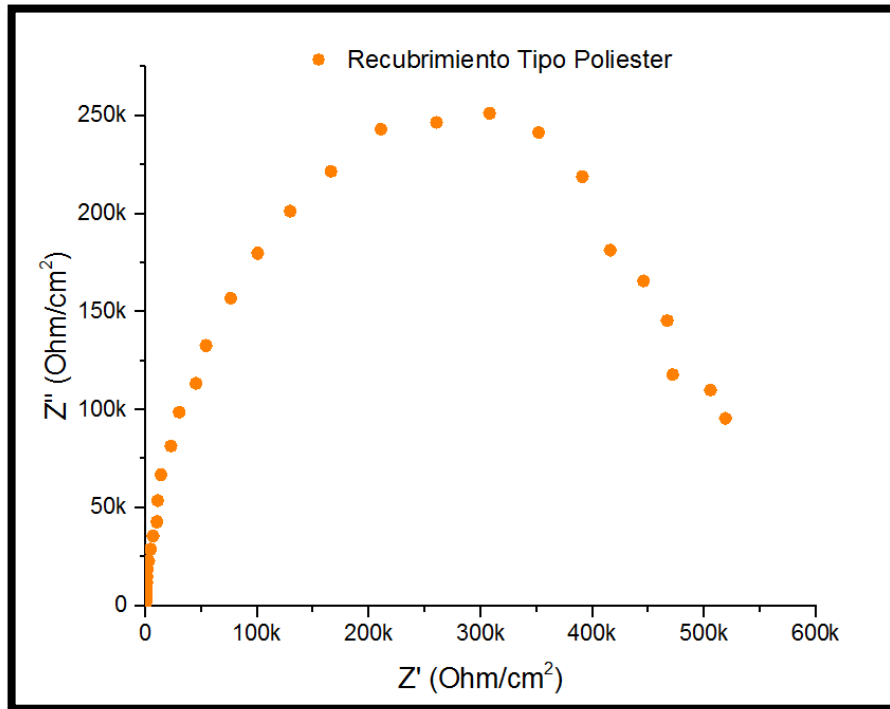
Se podrán encontrar variables que ayudarán a comprender el desempeño del material recubierto o no en el medio que se esté evaluando (ácidos, básicos o neutros a altas concentraciones de iones cloruros), las cuales pueden indicar

cambios en el sistema (metal-recubrimiento) antes de que sean visibles y caracterizar el deterioro del recubrimiento por acción de un electrolito; ya que esta técnica tiene la capacidad de dar mediciones válidas de la resistencia a la polarización corregida por las interferencias óhmicas de la resistencia a la solución.

**Figura 13. Curva de impedancia Nyquist para un acero galvanizado recubierto con Primer en NaCl al 3%, variando la frecuencia desde 100 [KHz] hasta 0,01 [Hz] (Amplitud 10 mV).**



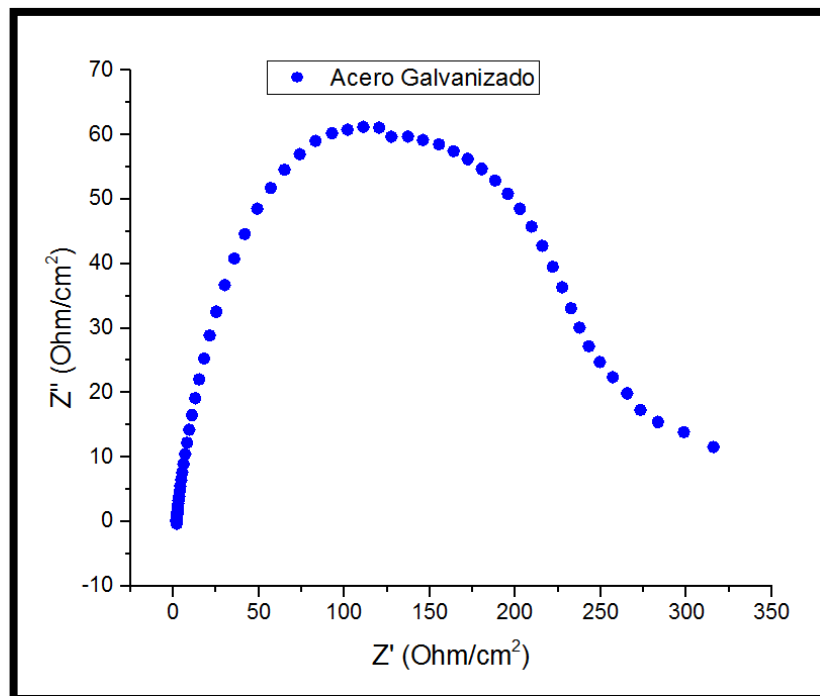
**Figura 14. Curva de impedancia Nyquist para un acero galvanizado recubierto con una capa de Primer, luego una capa de pintura poliéster en NaCl al 3%, variando la frecuencia desde 100 [KHz] hasta 0,01 [Hz] (Amplitud 10 mV).**



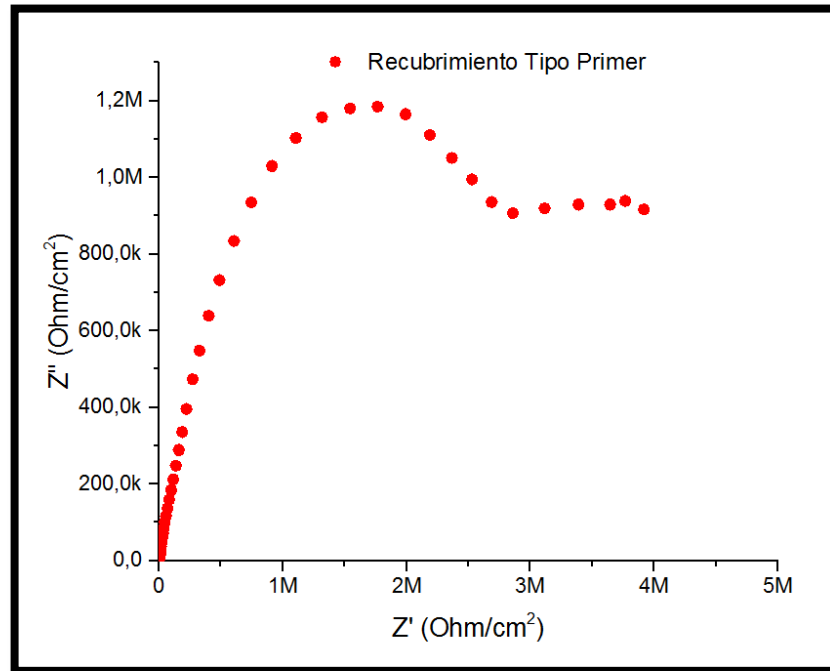
Por ejemplo, para la evaluación de tres láminas de acero, una galvanizada (Ver Figura 12.), otra recubierta con una capa de “Primer” que se usa como una capa primaria o pintura base para mejorar la adherencia del sustrato (Ver Figura 13.), y una recubierta por una pintura tipo Poliéster (Ver Figura 14.); expuestas en un mismo medio salino como cloruro de sodio (NaCl), o en un medio básico (Ver Figuras 15. y 16.) como Hidróxido de Potasio (KOH), bajo los mismos parámetros de frecuencia (Desde 100 KHz hasta 0,01 Hz) y amplitud (10 mV); se busca que el estudiante analice la información obtenida de esta técnica electroquímica, y con la ayuda de los gráficos de Nyquist, comprenda con mayor claridad los fenómenos físico-químicos que puedan estar ocurriendo en la interface metal-recubrimiento y lo que sucede en la resistividad del recubrimiento al aislar la superficie de la solución expuesta (el recubrimiento le da una mayor resistencia a la corrosión).

También el estudiante va a poder visualizar y separar los diferentes arcos que se generan en las curvas [45], los cuales pueden estar asociados a las propiedades del recubrimiento, o a la corrosión bajo película ocasionada por la penetración del electrolito, el contacto de este con el recubrimiento y las zonas donde este se puede pasivar debido a la resistencia que ofrece la película. Otro aspecto importante con la enseñanza de impedancia, es que se puede tener una clasificación de varios tipos de recubrimientos, gracias a la resistencia eléctrica que se obtiene de las medidas de impedancia, y de acuerdo a su propio criterio, a la normatividad y conocimiento teórico de la asignatura, servirá al estudiante como un indicador del comportamiento del recubrimiento (si este tiene una excelente o pobre protección anticorrosiva).

**Figura 15. Curva de impedancia Nyquist para un acero galvanizado en KOH a 0,1 M, variando la frecuencia desde 100 [KHz] hasta 0,01 [Hz] (Amplitud 10 mV).**



**Figura 16. Curva de impedancia Nyquist para un acero galvanizado recubierto con Primer en KOH a 0,1 M, variando la frecuencia desde 100 [KHz] hasta 0,01 [Hz] (Amplitud 10 mV).**



Finalmente, para esta práctica es muy importante que el estudiante comprenda muy bien las variables experimentales que pueden modificar y crear discrepancias en la medición ante cualquier prueba de cualquier material bajo las condiciones que sean; especialmente en el momento de realizar el montaje de la celda y la sensibilidad que tienen estos equipos en cuanto al ruido electrónico y eléctrico.

#### **4.7 PRÁCTICA 7. RESISTIVIDAD DE SUELOS**

Para la práctica de resistividad de suelos (Anexo A, Práctica 7) [40-44], se busca que el estudiante, basado en su criterio, llene una ficha técnica como informe final, donde pueda analizar todos los factores que ocurren al momento de realizar la medición y las consideraciones especificadas en la Norma ASTM G57 [13]. También se espera que, por medio de esta actividad, el estudiante se pueda

apropiar de la situación, utilice las conexiones necesarias en el equipo METREL, realice los cálculos necesarios para la resistencia y la resistividad, y pueda definir si es viable o no el terreno de estudio para realizar diversas aplicaciones.

## 5. CONCLUSIONES

Por medio del trabajo realizado, se diseñaron y modificaron las actuales guías del Laboratorio de Corrosión, ampliando los diversos panoramas de las industrias donde se podrían desempeñar los estudiantes, y a su vez, en la enseñanza de técnicas electroquímicas en pro de la investigación, donde se puedan generar mecanismos que permitan observar y cuantificar los procesos de corrosión.

Finalmente, luego de implementar las prácticas de laboratorio por medio de pruebas piloto a los estudiantes que cursan la asignatura de corrosión, y los miembros del grupo del Semillero de Investigación del Dr. Sergio Blanco, se realizó una retroalimentación con el fin de que la guía práctica que se entregue para cada clase, sea clara para los estudiantes y sirva como un apoyo de trabajo al auxiliar docente que esté a cargo del laboratorio.

## 6. RECOMENDACIONES

Para el desarrollo de las guías prácticas que se diseñaron para el Laboratorio de Corrosión, se recomienda ampliar a tres horas la práctica de laboratorio, debido a la duración de ciertas técnicas electroquímicas conforme se especifica en cada norma. De igual manera, con el fin de obtener óptimos resultados dentro de las prácticas, se pide la compra de un potencióstato nuevo para uso exclusivo del laboratorio; preferiblemente uno de marca Gamry Instruments Referencia: Interface 1000E, que fue el utilizado para el estudio, diseño y prueba de las técnicas electroquímicas implementadas en la Guía Práctica de Laboratorio.

Se debe tener en cuenta, que para la adecuación del laboratorio de Corrosión en el edificio Jorge Bautista Vesga, es indispensable la compra de material de vidrio idóneo para realizar prácticas de laboratorio de tipo universitario. De igual manera, se recomienda a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, la compra de las diversas celdas necesarias en el desarrollo de cada práctica, así como los reactivos para la preparación de las diversas soluciones a utilizar dentro del laboratorio. Finalmente, con el fin de analizar materiales de buena calidad, se recomienda la compra de láminas de diversos tipos de aceros y aleaciones ligeras, con el fin de variar los análisis que se realicen para cada tipo de práctica, motivando el libre pensamiento y análisis por parte de los estudiantes que cursen esta asignatura.

## REFERENCIAS

- [1] Corrosión y Protección, Tunja, Boyacá; (UPTC) Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Programa Académico de Pregrado, Ingeniería Metalúrgica [En Línea] [Citado: 20/02/2017]. [Disponible en: [http://www.uptc.edu.co/facultades/f\\_ingenieria/pregrado/metalurgica/inf\\_general/](http://www.uptc.edu.co/facultades/f_ingenieria/pregrado/metalurgica/inf_general/)].
- [2] Universidad de Antioquia (UDEA), Medellín, Programas de Pregrado, Ingeniería de Materiales, Plan de Estudios [En Línea] [Citado: 20/02/2017]. [Disponible en: [http://sikuani.udea.edu.co/programasUdeA/block/resource/LTc2NTcwNzk3NA==/export\\_1492964746271.pdf](http://sikuani.udea.edu.co/programasUdeA/block/resource/LTc2NTcwNzk3NA==/export_1492964746271.pdf)].
- [3] UNAM Universidad Autónoma de México, Facultad de Química, Ingeniería Metalúrgica, Ciclo Terminal y de Pre-Especialización, Corrosión y Protección [En Línea] [Citado: 20/02/2017]. [Disponible en: [http://www.quimica.unam.mx/materias.php?id\\_rubrique=299&id\\_article=&color=227AB9&rub2=299](http://www.quimica.unam.mx/materias.php?id_rubrique=299&id_article=&color=227AB9&rub2=299)].
- [4] The University of Manchester, United Kingdom, Undergraduate, MEng Materials Science and Engineering with Corrosion [En Línea] [Citado: 20/02/2017]. [Disponible en: <http://www.manchester.ac.uk/study/undergraduate/courses/2017/09899/meng-materials-science-and-engineering-with-corrosion/course-details/#course-profile>].
- [5] Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú; Escuela de Geología, e Ingeniería de Minas y Metalúrgica, Programa de Ingeniería Metalúrgica, Corrosión y Degradación de Materiales [En Línea] [Citado: 20/02/2017]. [Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/0B7XlYAbXz1Z1Nmg3bTlyUUYxZ0k/view?usp=shari>].

ng].

[6] Xu, X; Wu, M; Wang, X; Yang, Y; Shi, X; Wang, G. (2016). Experimenting with a Visible Copper–Aluminum Displacement Reaction in Agar Gel and Observing Copper Crystal Growth Patterns to Engage Student Interest and Inquiry. *Journal Of Chemical Education*. 93(9).

[7] Slabaugh, W. (1974). Corrosion. *Proceedings of the California association of Chemistry Teachers*. Oregon State University. 51(4).

[8] Onuchukwu, A. (1989). The Corrosion Inhibition of a Metal. *Journal of Chemical Education*. PMB, Nigeria. 66(8).

[9] Müller, B. (1995). Corrosion inhibitors for aluminum. *Journal Of Chemical Education*, 72(4), 350.

[10] Denny A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, Prentice Hall, 1996, the University of Michigan.

[11] “Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals”, ASTM Designation G31-72, ASTM Subcommittee G01.05 on Laboratory Corrosion Tests. 1999 [En Línea] [Citado: 22/02/2017]. [Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/G31.htm>]

[12] “Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations”, NACE International SP0775-2013.

[13] “Standard Test Method for Field measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four- Electrode Method”, ASTM International Designation G57-95a [En Línea] [Citado: 22/02/2017]. [Disponible en:

<https://www.astm.org/Standards/G5795.htm>]

[14] “Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements”, ASTM Designation G5-94, ASTM Subcommittee G01.11 on Electrochemical Measurements in corrosion Testing, Mayo, 1994 [En Línea] [Citado: 22/02/2017]. [Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/G5.htm>

[15] “Standard Terminology Relating to Electroplating”, ASTM Committee B08 on Metallic and Inorganic Coatings and, ASTM Designation B374-06, ASTM Subcommittee B08.01 on Ancillary Activities. Abril, 2011 [En Línea] [Citado: 22/02/2017]. [Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/B374.htm>]

[16] Bettelheim, F. A; Landesberg, J. M. Laboratory Experiments for General, Organic and biochemistry, 6 ed; Thomson Brooks.

[17] Spacht, R. B. The corrosion Resistance of Aluminum and Its Alloys. Journal of Chemical Education. 1946, 23, 253-257.

[18] Vernon, A. A. Treatment of Aluminum for corrosion prevention. Journal of Chemical Education. 1949, 26, 147-148.

[19] Ikemoto, I.; Saitou, K. Visual Observation of Dissolution of Copper Ions from a Copper Electrode. Journal of Chemical Education. 2013, 90, 763-764.

[20] Jara Pérez, David; Materiales Aeronáuticos, Apuntes de Arquitectura y mantenimiento de aeronaves, EUITA [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: <http://www.sandglasspatrol.com/IIGM-12oclockhigh/Materiales%20Aeronauticos.htm>].

[21] Interempresas, Metalmecánica, Materiales metálicos de uso frecuente en aeronáutica: aleaciones ligeras Al-Li [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/101138-Materiales-metalicos-de-uso-frecuente-en-aeronautica-aleaciones-ligeras-Al-Li.html>].

[22] Interempresas, Reciclaje y Gestión de Residuos, Recuperación de metales con la máxima pureza [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: <http://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/100855-Recuperacion-de-metales-con-la-maxima-pureza.html>].

[23] Continental, Steel & Tube Company, Metales Utilizados en la Industria Aeroespacial [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: <http://latinamerica.continentalsteel.com/metales-utilizados-en-la-industria-aeroespacial>]

[24] “Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens”, ASTM Designation G1-90, ASTM Subcommittee G01.05 on Laboratory Corrosion Tests. Enero, 1999 [En Línea] [Citado: 22/02/2017]. [Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/G1.htm>]

[25] “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”, ASTM Designation E3-11, ASTM Subcommittee E04.01 on Specimen Preparation. Mayo, 2011 [En Línea] [Citado: 22/02/2017]. [Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/E3.htm>]

[26] “Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing”, ASTM Designation G3-89, ASTM Subcommittee E01.11 on Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. 1999 [En Línea] [Citado: 22/02/2017]. [Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/G3.htm>]

[27] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE-API-, Specification for Line Pipe (API 5L), 42nd Edition, 2000.

[28] University of Cambridge, DoITPoMS, Teaching and Learning Packages, TLP Library, The Nernst Equation and Pourbaix Diagrams. Octubre, 2008 [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/pourbaix/index.php>].

[29] W. Bale, Christopher, EpH-Web, One-metal Eh vs pH Pourbaix diagram. Septiembre, 2013 [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: <http://www.crct.polymtl.ca/ephweb.php>].

[30] University of Cambridge, DoITPoMS, Teaching and Learning Packages, TLP Library, Kinetics of Aqueous Corrosion. Agosto, 2009 [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: [https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/aqueous\\_corrosion/index.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/aqueous_corrosion/index.php)].

[31] Bavaria; La cerveza, Proceso Cervecerero [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: <http://www.bavaria.co/la-cerveza/proceso-cervecerero>].

[32] PAUNOVIC, M. Modern Electroplating, Fifth Edition. The Electrochemical Society, Inc. Pennington, New Jersey. 2010.

[33] Oros Procman Aguilar, Recubrimientos Metálicos, Polilibros, Unidad 4, Procesos de Manufactura [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: [http://148.204.211.134/polilibros/Portal/Polilibros/P\\_terminados/procman-Aguilar-Oros/UMD/Unidad4/Contenido/4.c.htm](http://148.204.211.134/polilibros/Portal/Polilibros/P_terminados/procman-Aguilar-Oros/UMD/Unidad4/Contenido/4.c.htm)]

[34] H. C. Kazas. Genn E. PROCESOS PARA INGENIERÍA DE MANUFACTURA. Editorial: Mcgraw Hill, 2005.

[35] “Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements”, ASTM Designation G106-89, ASTM Subcommittee G01.11 on Electrochemical Measurements in corrosion Testing. 1999 [En Línea] [Citado: 22/02/2017]. [Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/G106.htm>].

[36] Proceso de extracción de la pasta de celulosa, Curso Comunicación de la ciencia, Facultad de Química, World Wide Day in Science. Uruguay, 2006 [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: <http://dec.fq.edu.uy/wwds2006/celulosa/kraft/kraft.html>].

[37] Proceso de Producción de celulosa kraft, Polisacáridos, Química y Tecnología de Macromoléculas. Escuela de Ingenierías Industriales – Uva [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso08-09/pls/proceso.htm>].

[38] Tipos y Componentes Fundamentales de un Recubrimiento, Capítulo 4. Tesis Digitales, Biblioteca Digital Mundial [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/11596/Capitulo4.pdf>].

[39] Aluminio en la Construcción, Sostenibilidad Maleable; Promateriales, de construcción y arquitectura actual [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: <http://www.promateriales.com/pdf/pm0706.pdf>].

[40] “Standard Test Method for Electrical Resistivity of Membrane-Pavement Systems”, ASTM International. Designation D3633--98 [En Línea] [Citado: 22/02/2017]. [Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/D3633.htm>]

[41] “Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes”, ASTM International. Designation G71-81 [En Línea] [Citado:

22/02/2017]. [Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/G7181.htm>]

[42] “Standard Practice for Conducting and Evaluating Laboratory Corrosions Tests in Soils”, ASTM International. Designation G162-99 [En Línea] [Citado: 22/02/2017]. [Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/G16299.htm>]

[43] IEEE Std 81-1983. “Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System”, ISBN: 978-0-7381-8028-1. December, 2012 [En Línea] [Citado: 22/02/2017]. [Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6392181/?reload=true>]

[44] SILVA, Y. Mediciones de la resistividad del suelo para diseños de sistemas de puesta a tierra. Junio, 2016 [En Línea] [Citado: 12/03/2017]. [Disponible en: [https://issuu.com/yanmirsilva8/docs/la\\_resistividad\\_del\\_suelo\\_1](https://issuu.com/yanmirsilva8/docs/la_resistividad_del_suelo_1)]

[45] Mendoza Flores, J. y asociados, Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en Corrosión, Instituto Mexicano del Petróleo, Facultad de Química, UNAM [En Línea] [Citado: 20/02/2017]. [Disponible en: <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF>].

## BIBLIOGRAFÍA

BETTELHEIM, F. A; LANDESBURG, J. M. Laboratory Experiments for General, Organic and biochemistry, 6 ed; Thomson Brooks.

CONTINENTAL, STEEL & TUBE COMPANY. Metales Utilizados en la Industria Aeroespacial. [En Línea]; [Disponible en: <http://latinamerica.continentalsteel.com/metales-utilizados-en-la-industria-aeroespacial>].

IKEMOTO, I.; SAITOU, K. Visual Observation of Dissolution of Copper Ions from a Copper Electrode. Journal of Chemical Education. 2013, 90, 763-764.

INTEREMPRESAS, Metalmecánica, Materiales metálicos de uso frecuente en aeronáutica: aleaciones ligeras Al-Li. [En Línea]; [Disponible en: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/101138-Materiales-metalicos-de-uso-frecuente-en-aeronautica-aleaciones-ligeras-Al-Li.html>].

INTEREMPRESAS, Reciclaje y Gestión de Residuos, Recuperación de metales con la máxima pureza. [En Línea]; [Disponible en: <http://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/100855-Recuperacion-de-metales-con-la-maxima-pureza.html>].

JARA PÉREZ, David; Materiales Aeronáuticos, Apuntes de Arquitectura y mantenimiento de aeronaves, EUITA. [En Línea]; [Disponible en: <http://www.sandglasspatrol.com/IIGM-12oclockhigh/Materiales%20Aeronauticos.htm>].

SPACHT, R. B. The corrosion Resistance of Aluminum and Its Alloys. Journal of Chemical Education. 1946, 23, 253-257.

VERNON, A. A. Treatment of Aluminum for corrosion prevention. Journal of Chemical Education. 1949, 26, 147-148.