

**“DESARROLLO DE NANOMATERIALES PARA SU  
USO COMO ELECTRODOS EN SISTEMAS  
BIOELECTROQUÍMICOS PARA EL TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES DE INDUSTRIA  
AERONÁUTICA”**

TESIS PRESENTADA POR:

**IBQ NADIA ALEXANDRA LÓPEZ GARCÍA**

DIRIGIDA POR:

**DRA. ANTONIA SANDOVAL GONZÁLEZ  
DRA. BIBIANA CERCADO QUEZADA**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRÍA EN ELECTROQUÍMICA**

**AGOSTO, 2024**

# Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica

REALIZADO POR:  
IBQ NADIA ALEXANDRA LÓPEZ GARCÍA

DIRIGIDA POR:  
DRA. ANTONIA SANDOVAL GONZÁLEZ  
DRA. BIBIANA CERCADO QUEZADA

## SINODALES

Presidente

---

Firma

Secretario

---

Firma

Vocal

---

Firma

Vocal

---

Firma

Vocal

---

Firma

Vocal

---

Firma

## RESUMEN

---

La presente investigación se enfocó en la síntesis y caracterización de un electrodo anódico nanoestructurado, que combina fieltro de grafito (FG) con nanopartículas de óxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ) sintetizadas *in situ* por electrodeposición para su aplicación en una celda de electrolisis microbiana (CEM), la cual es un sistema multidisciplinario, que en este caso está destinada para el tratamiento de aguas residuales alcalinas procedentes de la industria aeronáutica. La metodología se dividió en varias etapas interconectadas. En cuanto a los electrodos, se llevó a cabo el pretratamiento del fieltro de grafito con el fin de mejorar sus propiedades electroquímicas y posteriormente, se procedió a la síntesis *in situ* de las nanopartículas de  $\text{SnO}_2$  sobre la superficie del electrodo. Por su parte, se aislaron y cultivaron microorganismos electroactivos a partir de humus de lombriz, se diseñó y construyó una CEM específicamente adaptada para el estudio. Con las pruebas experimentales se evaluó la eficiencia de los sistemas biótico y abiótico propuestos, así como con los electrodos desnudos y modificados. Finalmente, se realizaron análisis de la calidad del agua tratada para determinar los parámetros finales y se caracterizaron los electrodos utilizados para descartar su deterioro y funcionalidad. Los resultados revelaron una notable mejora en las propiedades electroquímicas del FG tras la incorporación de las nanopartículas de  $\text{SnO}_2$ , lo que se tradujo en un incremento de 156.5% del área electroactiva y una reducción de 98.6% de la resistencia a la transferencia de electrones. Además, se constató la biocompatibilidad de los microorganismos con el electrodo modificado, lo cual se reflejó en una disminución de 86.2±2.1% en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de las aguas residuales tratadas con el sistema frente a un 38.9% que presentó el sistema abiótico. Las conclusiones destacan la factibilidad del tratamiento de aguas residuales industriales alcalinas mediante CEM, empleando el electrodo de  $\text{SnO}_2$ /FG. No obstante, se reconoce que el agua tratada aún no cumple con los estándares regulatorios para su descarga en sistemas de alcantarillado o su reutilización, lo que sugiere la necesidad de investigaciones adicionales para optimizar el proceso.

## ABSTRACT

---

The present research focused on the synthesis and characterization of a nanostructured anodic electrode, which combines graphite felt (FG) with *in situ* synthesized tin oxide (SnO<sub>2</sub>) nanoparticles, for its application in a microbial electrolysis cell (MEC), which is a multidisciplinary system, which in this case is intended for treatment of alkaline wastewater from the aeronautical industry.

The methodology was divided into several interconnected stages. Regarding the electrodes, the graphite felt was pre-treated to improve its electrochemical properties, and subsequently, *in situ* synthesis of SnO<sub>2</sub> nanoparticles was carried out on the electrode surface. Microorganisms were isolated and cultivated from worm humus, and a MEC specifically adapted for the study was designed and built. Experimental tests were conducted to evaluate the efficiency of the proposed biotic and abiotic systems, as well as bare and modified electrodes. Finally, analyses of the treated water quality were performed to determine the final parameters, and the electrodes used were characterized to discard any deterioration and confirm functionality.

The results revealed a significant improvement in the electrochemical properties of the GF electrode after the incorporation of SnO<sub>2</sub> nanoparticles, resulting in a 156.5% increase in electroactive area and a 98.6% reduction in electron transfer resistance. Additionally, the biocompatibility of microorganisms with the modified electrode was confirmed, resulting in an 86.2±2.1% decrease in Chemical Oxygen Demand (COD) in the treated solutions compared to a 38.9% decrease observed in the abiotic system.

The conclusions highlight the feasibility of treating alkaline industrial wastewater using MEC, employing the graphite felt electrode modified with SnO<sub>2</sub> in a microbial electrolysis cell. However, it is acknowledged that the treated water still does not meet regulatory standards for discharge into sewer systems or reuse, suggesting the need for further research to optimize the process.

## IMPACTO SOCIAL DEL PROYECTO DE TESIS

---

- i. **Mejora en la calidad del agua y del medio ambiente:** El tratamiento efectivo de aguas residuales industriales alcalinas propicia una reducción significativa en la carga de contaminantes vertidos en cuerpos de agua locales, lo que contribuye a preservar los ecosistemas acuáticos y proteger la biodiversidad local.
- ii. **Beneficios para la salud pública:** Al minimizar la liberación de contaminantes en el medio ambiente, la investigación tendrá un impacto positivo en la salud pública de las comunidades cercanas a las instalaciones industriales, reduciendo el riesgo de contaminación de fuentes de agua potable y la exposición de la población a sustancias nocivas.
- iii. **Cumplimiento de regulaciones ambientales:** Ayudar a las industrias aeronáuticas y otros sectores a cumplir con normativas ambientales más estrictas es crucial para evitar sanciones regulatorias y mejorar la reputación corporativa en términos de responsabilidad ambiental, ello puede contribuir al fortalecimiento de las relaciones con las comunidades locales y los organismos reguladores.
- iv. **Promoción de prácticas industriales sostenibles:** Introducir tecnologías avanzadas y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales fomenta la adopción de prácticas industriales más responsables y sostenibles en otros sectores. Esto establece un precedente para la innovación tecnológica en la gestión de recursos hídricos y la reducción de huellas ambientales negativas.
- v. **Educación y conciencia ambiental:** La investigación y difusión de los resultados pueden contribuir a aumentar la conciencia pública sobre los desafíos ambientales relacionados con el tratamiento de aguas residuales industriales, lo que fomentaría una mayor participación pública en la discusión sobre políticas ambientales y prácticas sostenibles.



**Este trabajo fue realizado en el Centro de  
Investigación y Desarrollo Tecnológico en  
Electroquímica (CIDETEQ), bajo la  
dirección de**

**DRA. ANTONIA SANDOVAL GONZÁLEZ**

# AGRADECIMIENTOS

---

---

Quisiera expresar mi profunda gratitud a todas las personas e instituciones que han contribuido de manera significativa a la realización de este proyecto de investigación y la culminación de esta tesis.

En primer lugar, agradezco sinceramente a mi asesora de tesis, la Dra. Antonia Sandoval González y a mi co-asesora, la Dra. Bibiana Cercado Quezada por su guía experta, apoyo incondicional y valiosas sugerencias a lo largo de este proceso. Su compromiso y dedicación fueron fundamentales para orientar y enriquecer este trabajo.

Agradezco también al CIDETEQ por proporcionar los recursos necesarios y el ambiente propicio para llevar a cabo esta investigación. Los laboratorios y equipos facilitados fueron indispensables para realizar los experimentos y análisis que sustentan los hallazgos de este estudio.

Mi reconocimiento especial se extiende a mis colegas y compañeros de laboratorio, quienes colaboraron estrechamente en el desarrollo y la ejecución de los experimentos. Sus aportaciones y discusiones fueron invaluable para la evaluación crítica de los resultados y la formulación de conclusiones.

No puedo dejar de mencionar el apoyo brindado por mi familia y amigos durante todo este proceso, sus palabras de aliento y comprensión fueron mi fuente de fortaleza en los momentos desafiantes. En especial a mi mamá, por siempre estar al pendiente de mí y a mis roommates: Sayeth, Mati y Oscar, por hacer grata y maravillosa mi estancia en Querétaro.

Gracias a todos los que han sido parte de este viaje académico y profesional. Su contribución ha sido fundamental en cada etapa de esta investigación.

## ÍNDICE GENERAL

1. <b>Introducción</b> .....	1
2. <b>Antecedentes</b> .....	3
3. <b>Justificación</b> .....	8
4. <b>Hipótesis</b> .....	9
5. <b>Objetivos</b> .....	10
5.1 Objetivo General.....	10
5.2 Objetivos específicos.....	10
6. <b>Marco teórico</b> .....	11
6.1 Agua residual procedente del mantenimiento de motores aeronáutico.....	11
6.1.1 Pruebas no destructivas con líquidos penetrantes.....	11
6.2 Marco normativo para el vertido de aguas residuales.....	13
6.2.1 Parámetros utilizados para evaluar la calidad del agua.....	13
6.2.2 Técnicas de análisis del agua.....	19
6.2.3 Normas Oficiales Mexicanas con aplicación a aguas residuales.....	21
6.3 Tratamiento de aguas residuales.....	24
6.3.1 Planta de tratamiento de aguas residuales.....	24
6.3.1.1 Pre-Tratamiento.....	25
6.3.1.2 Tratamiento primario.....	25
6.3.1.3 Tratamiento secundario.....	26
6.3.1.4 Tratamiento terciario.....	26
6.3.2 Tratamientos electroquímicos.....	27
6.3.2.1 Electrocoagulación.....	28
6.3.2.2 Electrooxidación.....	29
6.3.3 Tratamientos bioelectroquímicos.....	30
6.3.3.1 Metabolismo bacteriano electrogénico.....	31
6.3.3.2 Celdas de combustible microbiana.....	33
6.3.3.3 Celdas de electrolisis microbiana.....	34
6.4 Modificación de electrodos con nanomateriales.....	36
6.4.1 Nanomateriales: definición y clasificación.....	36
6.4.2 Métodos de síntesis.....	37
6.5 Técnicas electroquímicas.....	39

6.5.1	Cronoamperometría.....	39
6.5.2	Voltamperometría cíclica.....	41
6.5.3	Electrólisis.....	42
6.5.4	Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE).....	43
<b>7.</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>48</b>
7.1	Pretratamiento del electrodo de fieltro de grafito.....	48
7.2	Síntesis <i>in situ</i> de nanopartículas de dióxido de estaño (SnO <sub>2</sub> ).....	49
7.3	Obtención de microorganismos.....	51
7.4	Diseño y construcción de la celda de electrólisis microbiana.....	52
7.5	Pruebas en celda para determinar la eficiencia del sistema.....	53
7.6	Pruebas de calidad del agua.....	55
7.7	Caracterización de las nanopartículas de SnO <sub>2</sub> sintetizadas.....	56
<b>8.</b>	<b>Resultados y discusión.....</b>	<b>57</b>
8.1	Pretratamiento del electrodo de fieltro de grafito.....	57
8.1.1	Potencial a circuito abierto .....	57
8.1.2	Voltamperometría cíclica.....	58
8.1.3	Espectroscopia de impedancia electroquímica.....	60
8.2	Síntesis <i>in situ</i> de SnO <sub>2</sub> .....	64
8.2.1	Caracterización física de los electodos FGt y SnO <sub>2</sub> /FG.....	66
8.2.1.1	Microscopia electronica de barrido.....	66
8.2.1.2	Difracción de rayosX.....	67
8.2.1.3	Espectroscopía Raman.....	68
8.2.1.4	Área electroquímicamente activa.....	70
8.3	Obtención de microorganismos.....	71
8.4	Biocompatibilidad de los microorganismos con el SnO <sub>2</sub> /FG.....	79
8.5	Pruebas electroquímicas en celda con agua residual alcalina de industria aeronáutica.....	82
8.5.1	Voltamperometría cíclica.....	84
8.5.2	Cronoamperometría.....	86
8.6	Análisis del agua.....	87
8.7	Análisis de los electodos utilizados.....	91
<b>9.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>95</b>
<b>10.</b>	<b>Perspectivas y trabajo futuro.....</b>	<b>96</b>

<b>11. Referencias</b> .....	97
<b>Anexos</b> .....	106
<b>Anexo 1.</b> Tablas de límites permisibles en el agua según la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	106
<b>Anexo 2.</b> Tablas de límites permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal según la NOM-002-ECOL-1996.....	107
<b>Constancias y reconocimientos otorgados durante la formación</b> .....	108

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tratamiento de agua con baja carga de sólidos disueltos totales .....	3
Figura 2. Tratamiento de agua con gran carga de SDT, concentrados ácidos y alcalinos.....	4
Figura 3. Diagrama del procedimiento de pruebas con líquidos penetrantes.....	12
Figura 4. Esquema de una planta de tratamiento de aguas residuales.....	25
Figura 5. Esquema de una celda de electrocoagulación-floculación.....	28
Figura 6. Diagrama de la transferencia de electrones entre las bacterias y el electrodo .....	32
Figura 7. Esquema de una celda de combustible microbiano .....	33
Figura 8. Mecanismo bioelectroquímico de oxidación de materia orgánica .....	34
Figura 9. Mecanismo electroquímico de oxidación de materia orgánica .....	35
Figura 10. Esquema de una CEM .....	35
Figura 11. Clasificación de nanomateriales .....	37
Figura 12. Gráficas de entrada y salida de un sistema al realizar una cronoamperometría ..	40
Figura 13. Gráficas de entrada y salida de un sistema al realizar una voltamperometría cíclica .....	41
Figura 14. Representación de un circuito equivalente de Randles.....	44
Figura 15. Diagrama de Pourbaix del estaño en un medio con cloruros .....	50
Figura 16. a) Esquema general de la celda; b) Vista superior .....	52
Figura 17. Foto de dos celdas utilizadas .....	53
Figura 18. Potencial de circuito abierto de electrodos de fieltro de grafito .....	57
Figura 19. Gráfico de Randles Sevcik para el electrodo sin tratar (líneas negras) y para el electrodo tratado (líneas rojas). Densidad de corriente pico anódica ( $i_{pa}$ ) y densidad de corriente pico catódica ( $i_{pc}$ ).....	59
Figura 20. Diagrama de Nyquist para el electrodo de fieltro de grafito sin tratar.....	60
Figura 21. Diagramas de Bode fase y módulo para el electrodo FG sin tratar.....	61

Figura 22. Circuito equivalente del sistema con el electrodo FG sin tratar.....	61
Figura 23. Diagrama de Nyquist para el electrodo FGt .....	62
Figura 24. Diagramas de Bode fase y módulo para el electrodo FGt .....	62
Figura 25. Circuito equivalente del sistema con el electrodo FGt.....	63
Figura 26. Voltamperograma con el potencial de cruce para la electrodeposición de estaño sobre fieltro de grafito .....	64
Figura 27. Cronoamperograma de la electrodeposición de estaño sobre fieltro de grafito ...	65
Figura 28. Caracterización por MEB del electrodo de FGt (a) y SnO <sub>2</sub> /FG (b), así como gráficos del análisis elemental EDE y del FGt (c) y SnO <sub>2</sub> /FG (d).....	67
Figura 29. Patrón de difracción de rayos X para los electrodos de FGt y SnO <sub>2</sub> /FG empleados en el tratamiento del agua residual de industria aeronáutica en una CEM.....	68
Figura 30. Puntos de observación y análisis Raman: (a) sin presencia aparente de SnO <sub>2</sub> ; (b) la unión entre un cristal de SnO <sub>2</sub> y una fibra de carbón, y (c) sobre un cristal de SnO <sub>2</sub> . (d), (e) y (f) Espectrogramas Raman del SnO <sub>2</sub> /FG .....	69
Figura 31. Comparativa del incremento en el área electroactiva entre electrodos .....	71
Figura 32. Voltamperogramas del sistema con microorganismos y acetato .....	72
Figura 33. Cronoamperograma del sistema de microorganismos con acetato.....	73
Figura 34. Diagrama de Nyquist del sistema con microorganismos y acetato .....	74
Figura 35. Diagrama Bode-Fase del sistema con microorganismos y acetato.....	74
Figura 36. Diagrama Bode-Módulo del sistema con microorganismos y acetato .....	75
Figura 37. Circuito equivalente del sistema con microorganismos y acetato .....	75
Figura 38. (a) Voltamperogramas y (b) cronoamperometría del sistema con acetato sin microorganismos .....	77
Figura 39. (a) Diagrama de Nyquist, (b) Diagrama de Bode-Modulo, (c) Diagrama de Bode-Fase y (d) circuito equivalente del sistema con acetato sin microorganismos. ....	78

Figura 40. Cronoamperograma para determinar biocompatibilidad del SnO <sub>2</sub> en el electrodo .....	80
Figura 41. Relación del edo. de oxidación del C con el porcentaje de oxígeno .....	81
Figura 42. Voltamperogramas del sistema con agua residual (a) Con electrodos de fieltro de grafito; (b) Con electrodos de fieltro de grafito y dióxido de estaño.....	85
Figura 43. Cronoamperograma del tratamiento del agua residual industrial en una CEM ....	87
Figura 44. Gráfica comparativa de los porcentajes de degradación de DQO, COT y UV-vis.	89
Figura 45. Gráficos de la intensidad de fluorescencia en el agua (a) cruda y tratada con (b) FG EQ, (c) FG BEQ, (d) SnO <sub>2</sub> /FG EQ, (e) SnO <sub>2</sub> /FG BEQ, (f) biológico.....	90
Figura 46. Análisis de MEB y EDE de los electrodos de carbono después de tratar de manera electroquímica el agua residual.....	92
Figura 47. Análisis mediante MEB y EDE de los electrodos de carbono después de tratar de manera bioelectroquímica el agua residual.....	94

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estado del arte sobre electrodos modificados con nanopartículas con aplicaciones en sistemas bioelectroquímicos (SBE).....	6
Tabla 2. Reacciones que se llevan a cabo en cada intervalo de ORP según la disponibilidad de oxígeno en el agua residual .....	17
Tabla 3. Límites máximos permisibles en promedio mensual según la tabla 1 de la NOM-001-ECOL-2021 .....	22
Tabla 4. Límites máximos permisibles según la NOM-002-ECOL-1996.....	22
Tabla 5. Límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la NOM-003- ECOL -1997 .....	23
Tabla 6. Métodos de síntesis de nanomateriales.....	38
Tabla 7. Elementos en un circuito equivalente de EIE.....	45
Tabla 8. Pruebas de análisis del agua residual .....	55
Tabla 9. Comparativa de parámetros de electrodos de fieltro de grafito.....	63
Tabla 10. Parámetros al preparar la disolución de estaño.....	64
Tabla 11. Comparativa de propiedades entre electrodos de fieltro de grafito .....	70
Tabla 12. Parámetros del sistema con microorganismos y acetato.....	76
Tabla 13. Parámetros del sistema con acetato sin microorganismos .....	79
Tabla 14. Parámetros fisicoquímicos iniciales y finales del electrolito donde se emplea el FG y SnO <sub>2</sub> /FG como electrodos anódicos .....	80
Tabla 15. Resultados de parámetros fisicoquímicos del agua residual antes y después de los Tratamientos.....	88
Tabla 16. Porcentaje de disminución de DQO, COT y absorbancia UV VIS. ....	88

---

# INTRODUCCIÓN

---

## 1. Introducción

En la industria aeronáutica los tratamientos superficiales que se les realizan a las piezas después de su fabricación y al darles mantenimiento, para verificar que no tengan fallas mediante pruebas no destructivas como el método de líquidos penetrantes, requieren de grandes cantidades de agua potable para llevar a cabo los enjuagues. Estas aguas residuales presentan gran cantidad y diversidad de contaminantes, entre los que destacan la materia orgánica, los compuestos aromáticos y los metales pesados (Pérez, 2019).

Para proponer una posible solución al tratamiento de agua residual de este sector industrial, los sistemas bioelectroquímicos (SBE), específicamente las celdas de electrólisis microbiana (CEM) son una buena alternativa, debido a su capacidad de remoción de diferentes tipos de contaminantes, con la producción simultánea de electricidad (Sarmin *et al.*, 2019; Zhang, *et al.*, 2009). Estos sistemas utilizan microorganismos como catalizadores para convertir en energía eléctrica la energía química obtenida del proceso metabólico necesario para eliminar contaminantes como materia orgánica, nitratos, nitritos, fosfatos y metales pesados.

Para que las reacciones redox en una CEM se realicen de manera eficiente es importante prestarle especial atención al material de los electrodos, debido a que de su composición y el área de superficie que posea, depende la biocompatibilidad para formar la biopelícula, así como de la tendencia que presenten los microorganismos para transferir electrones ( $e^-$ ) a éste. Mientras mejor se adapten las bacterias al ánodo, mayor será la eficiencia de la CEM en cuanto a remoción de contaminantes y a la producción de electricidad (Bi, *et al.*, 2018; Mehdinia *et al.*, 2014a).

Para ello, existen distintos materiales que son utilizados como electrodos, entre los que destacan los basados en carbono y los metales, por capacidad para conducir electricidad. Sin embargo, los metales no son recomendados para emplearse en las CEM debido a su alto costo, su tendencia a la corrosión, la toxicidad que puedan presentar y a que no facilitan la adhesión de los microorganismos. Por su parte, los materiales basados en carbono entre los que se encuentran el fieltro de carbón, varilla, fibra, tela, malla, papel, carbón activado, carbón vítreo, cepillos, carbón vítreo reticulado y el grafito; son más baratos, estables química y mecánicamente, biocompatibles y, aquellos que son porosos tienen mayor área superficial, lo que promueve la adhesión y el crecimiento de

la biopelícula, así como la transferencia electrónica (Yaqoob *et al.*, 2020). No obstante, la densidad de potencia máxima obtenida con los electrodos de materiales basados en carbono es pequeña como para ser aprovechada, además de que la eficiencia de remoción de contaminantes es insuficiente para aplicaciones prácticas.

Con base en lo anterior, se plantea la pregunta de investigación: ¿Es posible desarrollar un electrodo nanoestructurado como electrodo de trabajo para dar tratamiento a los efluentes de la industria aeronáutica en una celda de electrólisis microbiana? Por lo que, en el presente proyecto se expone el desarrollo de un electrodo con dióxido de estaño electro-sintetizado sobre fieltro de grafito, con el fin de utilizarse en una celda de electrólisis microbiana para degradar la materia orgánica del agua residual alcalina de la industria aeronáutica.

---

# ANTECEDENTES

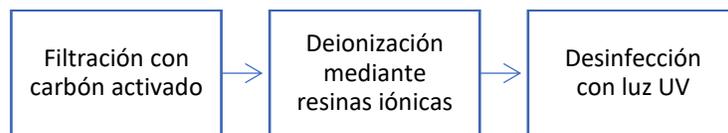
---

## 2. Antecedentes

El agua residual procedente de la industria aeronáutica contiene una completa carga de contaminantes orgánicos e inorgánicos, por lo que se necesita de un tratamiento especializado. Existen empresas como ©*MacDermid Envio Solutions* que se enfocan en tratar aguas residuales industriales, entre ellas las provenientes de la industria aeronáutica. Su proceso para tratar este tipo de agua comienza separando el líquido en cuatro tanques (*MacDermid Envio Solutions*, 2021):

1. Agua con baja carga de sólidos disueltos totales (SDT).
2. Agua con alta carga de SDT.
3. Concentrados ácidos.
4. Concentrados alcalinos.

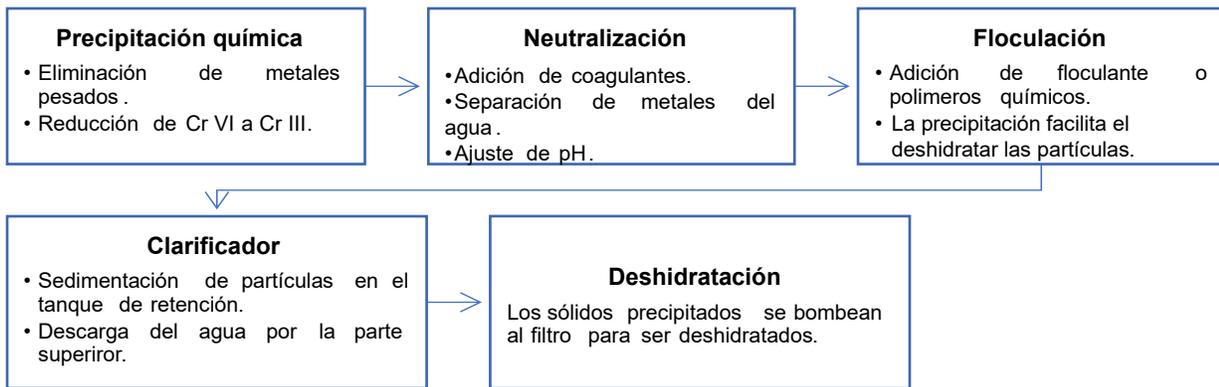
El agua del tanque que presenta baja carga de SDT se trata por deionización, proceso que consiste en pasar el agua a través de resinas catiónicas y aniónicas, después de ser filtradas con carbón activado. Para su desinfección se irradian con luz ultravioleta. Mediante este proceso se puede reutilizar el 90-95% del agua, ahorrando en costos de agua y alcantarillado, como se muestra en la Figura 1 (*MacDermid Envio Solutions*, 2019).



**Figura 1.** Tratamiento de agua con baja carga de sólidos disueltos totales.

Por su parte, los tres tanques de agua restantes se someten a un proceso más complejo, el cual se comienza con la adición de sustancias químicas para eliminar los metales pesados, principalmente el Cr (VI), que es reducido a Cr (III). Después se lleva a cabo una neutralización en donde se hace un ajuste de pH y se añaden coagulantes al agua para lograr la separación de los metales; le sigue la floculación, donde se le agregan polímeros para facilitar la precipitación de los coágulos formados. Finalmente, el agua pasa a un clarificador, en donde las partículas se sedimentan y el agua es descargada por la parte superior del tanque de retención; los sólidos precipitados son bombeados a

un filtro para ser deshidratados, este proceso se muestra en la Figura 2 (MacDermid Envio Solutions, 2019).



**Figura 2.** Tratamiento de agua con gran carga de SDT, concentrados ácidos y alcalinos.

En el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica se estudió un proceso electroquímico para el tratamiento de las aguas residuales de la industria aeronáutica; la electrocoagulación. Se encontró que sí es posible reducir los contaminantes presentes por este método, sin embargo, no es la mejor opción debido a que requiere un ajuste de pH, los lodos resultantes presentan residuos de los metales con los que están hechos los electrodos, necesita de la aplicación de una corriente eléctrica y sólo es funcional durante los primeros 20 min; ya que después la Demanda Química de Oxígeno (DQO) comienza a incrementar debido a la cantidad de iones presentes en la solución.

Otra tecnología electroquímica prometedora para el tratamiento de aguas residuales son las celdas de electrólisis microbiana; motivo por el cual se ha reportado ampliamente cómo influye el material de los electrodos, el uso de electrocatalizadores y las especies microbianas inoculadas en la degradación de contaminantes y en la producción de electricidad. A continuación, se mencionan algunos casos de estudio: Qui, *et al.* (2017), estudiaron la reducción del metal Vanadio V utilizando un biocátodo, es decir, un electrodo de fieltro de carbono recubierto con una biopelícula de un consorcio bacteriano anaerobio, donde predominaron *Dysgonomonas* y *Klebsiella*. Después de 7 días de operación logró una eficiencia de 60% de remoción del Vanadio V y obtuvo una densidad de potencia máxima de  $529 \pm 12 \text{ mW m}^{-2}$ . Los estudios electroquímicos confirmaron que los microorganismos promueven la transferencia de electrones, tanto en la cámara anódica para oxidar materia orgánica, como en la catódica para reducir metales pesados.

Wang, *et al.* (2016), evaluaron el uso de un bioánodo (electrodo con biopelícula de un consorcio bacteriano) modificado con un electrodepósito de  $\text{MnO}_2$  para la remoción de Cr (VI) de aguas residuales y encontraron que es un material biocompatible que funciona como capacitor y mejora la eficiencia de la celda, con una densidad de potencia máxima de  $16.47 \text{ W m}^{-2}$ . El porcentaje de remoción de Cr (VI) fue 1.8 mayor en un sistema operado de manera intermitente (ciclos de 10 min en circuito cerrado con  $500 \Omega$  y 10 min en circuito abierto), frente a un sistema continuo (circuito cerrado con  $500 \Omega$  en todo el experimento). Sekar *et al.* (2019), evaluaron la eficiencia en el tratamiento de efluentes de la industria láctica en una Celda de Combustible Microbiana (CCM) con un ánodo modificado con nanopartículas de óxido de hierro (FeO) dopadas con cobre. Las nanopartículas se sintetizaron mediante la reducción de  $\text{FeCl}_3$  y  $\text{CuCl}_2$  con un extracto de *Amarantus blitum*; después fueron mezcladas con alcohol polivinílico (PVA) y utilizando una brocha se recubrió el electrodo de papel de carbón. Los microorganismos nativos del efluente láctico fueron utilizados como inóculo en la cámara anódica. Se obtuvo una eficiencia de remoción en la DQO de 75% y una densidad de potencia máxima de  $161.5 \text{ mW m}^{-2}$  con el ánodo modificado. Mehdinia, Ziaei y Jabbari (2014) construyeron un ánodo de óxido de grafeno reducido, con nanopartículas de óxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ) sintetizadas hidro-térmicamente y depositadas en la superficie por microondas. Utilizaron como inóculo bacterias *Escherichia coli* (ATCC 11,775) y como anolito una solución con glucosa como fuente de carbono. El resultado fue que al utilizar el electrodo nano-híbrido se observó una disminución a la resistencia de transferencia de electrones, así como una densidad de potencia máxima de  $1624 \text{ mW m}^{-2}$ , un valor más elevado en comparación con el electrodo desnudo.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los distintos casos de estudio en el que se utilizó un ánodo modificado con nanopartículas, con el fin de aumentar la eficiencia de la celda al mejorar las propiedades electrocatalíticas y de biocompatibilidad de los electrodos. La mayoría de los estudios encontrados se llevaron a cabo con medios controlados de anolito, sin embargo, también se ha demostrado que es posible eliminar diferentes tipos de contaminantes en un mismo sistema. No obstante, no se ha prestado especial atención en la utilización de estos electrodos modificados para el tratamiento de aguas residuales de la industria aeronáutica.

**Tabla 1.** Estado del arte sobre electrodos modificados con nanopartículas con aplicaciones en sistemas bioelectroquímicos (SBE).

Material de electrodo	Nanopartículas	Microorganismo	Electrolito	Densidad de potencia (mW m <sup>-2</sup> )	Eficiencia de remoción de DQO (%)	Referencia
Tela de carbón	SnO <sub>2</sub> /rGO	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 11,775)	Medio con glucosa	1624.00	-	(Mehdinia <i>et al.</i> , 2014a)
	MWCNTs/SnO <sub>2</sub>	<i>Escherichia coli</i>	Medio con glucosa	1421.00		(Mehdinia, Ziaei, & Jabbari, 2014b)
	SnO <sub>2</sub>	<b>Consorcio bacteriano de PTAR</b>	<b>Contaminantes fenólicos mixtos</b>	<b>522.77</b>	<b>85.58</b>	<b>(Khan, <i>et al.</i>, 2020)</b>
	Polipirrol y óxido de grafito reducido (rGO)	<i>Escherichia coli</i> ATCC 27325	Medio de glucosa y 2-hidroxi-1,4naftoquinona (HNQ)	1068.00	-	(Gnana Kumar <i>et al.</i> , 2014)
	TiO <sub>2</sub> /rGO	<i>Shewanella putrefaciens</i> (CN32)	Medio LuriaBertani	540.00	-	(Zou <i>et al.</i> , 2015)
	Pt	<i>Shewanella algae</i> (MTCC-10608)	Aguas residuales lácteas reales, diluidas y esterilizadas	50.00	92.21	(Choudhury <i>et al.</i> , 2021)
	Ppy/MoO <sub>2</sub>	<i>Shewanella putrefaciens</i>	Medio con glucosa 800 mg/L	630.00	TOC: 81.00%	(Karthick & Haribabu, 2020)

Continuación de la tabla 1.

Material de electrodo	Nanopartículas	Microorganismo	Electrolito	Densidad de potencia (mW m <sup>-2</sup> )	Eficiencia de remoción de DQO (%)	Referencia
Filtro de carbono	SnO <sub>2</sub> :PANI	Lodos anaerobios	Medio con acetato	65.00	-	(Tiwari, Jain, Mungray, & Mungray, 2020)
Papel de carbón	FeO dopadas con cobre	Nativos del efluente láctico	Efluentes de la industria láctica.	161.50	75.00	(Sekar <i>et al.</i> , 2019)
Espuma de Níquel	TiO <sub>2</sub> /rGO	<i>Shewanella putrefaciens</i> (CN32)	Medio LuriaBertani	3169.00	-	(Zou <i>et al.</i> , 2015)
	CNT-SnO <sub>2</sub>	Efluente de CCM activa	Acetato	673.50	-	(Duan, Chen, Wen, Yin, & Wang, 2016)
Filtro de Grafito	Película de NiO	Lixiviado de humus de lombriz	Efluente de industria aeronáutica	-	64.00	(Figueroa, 2023)

De la información presentada en la tabla 1 se observa que el sistema que produjo mayor densidad de potencia fue el electrodo de TiO<sub>2</sub> y espuma de Níquel, sin embargo, el material libre de Pt que presenta mayor remoción de la DQO es el SnO<sub>2</sub>, lo cual se busca en este proyecto, por lo que, se decidió trabajar con este material.

---

# JUSTIFICACIÓN

---

### 3. Justificación

Las nanopartículas de óxidos metálicos presentan una actividad catalítica equivalente a la de los metales puros, con la ventaja de que al ser requeridos en menor cantidad son más baratos y pueden disminuir significativamente la toxicidad hacia las bacterias, lo que aumenta su biocompatibilidad y facilita la adhesión de la biopelícula (Füeg *et al.*, 2019). Por otro lado, se ha comprobado que modificar los electrodos basados en carbono para formar compósitos con nanopartículas añadidas sobre su superficie aumenta su actividad electrocatalítica (Khan *et al.*, 2020; Sekar *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2018). En ese mismo sentido, Duan y colaboradores demostraron que el sistema con nanopartículas de SnO<sub>2</sub> en el ánodo, presentaba una menor resistencia a la transferencia de electrones y una mejora notable de la reacción catalítica debido a que promueve las interacciones entre el sustrato orgánico microbiano y el ánodo (Duan *et al.*, 2016). El uso como ánodo de electrodos basados en carbono con nanopartículas de SnO<sub>2</sub> aumenta el área superficial del electrodo, así como la cantidad de sitios activos, mientras que disminuye la resistencia eléctrica que involucra al electrodo y los costos de construcción. De igual manera facilita la biocompatibilidad y promueve la electrocatálisis, lo cual se ve reflejado en una mayor eficiencia en la oxidación de materia orgánica por los microorganismos y en la densidad de potencia máxima.

En cuanto a los microorganismos, utilizar un consorcio microbiano mejora la eficiencia de remoción de materia orgánica en aguas residuales con una variada y gran carga de contaminantes, como el agua residual de industria aeronáutica. La sinergia que existe entre las diferentes bacterias ayuda a que soporten las condiciones extremas del medio; aunque normalmente solo proliferan aquellos microorganismos resistentes a las condiciones presentadas. La transferencia electrónica también se ve incrementada debido a que, al encontrarse especies bacterianas en el medio con un metabolismo distinto, cada una es capaz de oxidar contaminantes diferentes y con ello conducir mayor carga electrónica al electrodo.

---

# HIPÓTESIS

---

#### **4. Hipótesis**

La implementación de un ánodo de fieltro de grafito con nanopartículas de SnO<sub>2</sub> en una celda de electrólisis microbiano para el tratamiento del efluente alcalino de la industria aeronáutica permitirá alcanzar una mayor eficiencia de remoción de la materia orgánica, comparado con el electrodo de fieltro de grafito desnudo.

---

# OBJETIVOS

---

## 5. Objetivos

### 5.1 Objetivo general

Sintetizar y caracterizar fisicoquímicamente un electrodo anódico nanoestructurado a base de fieltro de grafito y nanopartículas de óxido de estaño ( $\text{SnO}_2/\text{FG}$ ) con aplicación en una celda de electrólisis microbiana para el tratamiento de agua residual alcalina de la industria aeronáutica.

### 5.2 Objetivos específicos

- 5.2.1 Sintetizar nanopartículas de  $\text{SnO}_2$  *in situ* mediante electrodeposición sobre fieltro de grafito.
- 5.2.2 Caracterizar las nanopartículas de  $\text{SnO}_2$  a través de microscopía electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos X (DRX), Raman y espectroscopía de dispersión de electrones (EDE).
- 5.2.3 Evaluar la calidad del agua residual de la industria aeronáutica antes, durante y después de su tratamiento en la celda de electrólisis microbiana.
- 5.2.4 Verificar la eficiencia del electrodo con nanopartículas de  $\text{SnO}_2$  en el tratamiento de los efluentes residuales de la industria aeronáutica en la generación de energía eléctrica.

---

# MARCO TEÓRICO

---

## **6. Marco teórico**

### **6.1 Agua residual procedente del mantenimiento de motores aeronáuticos**

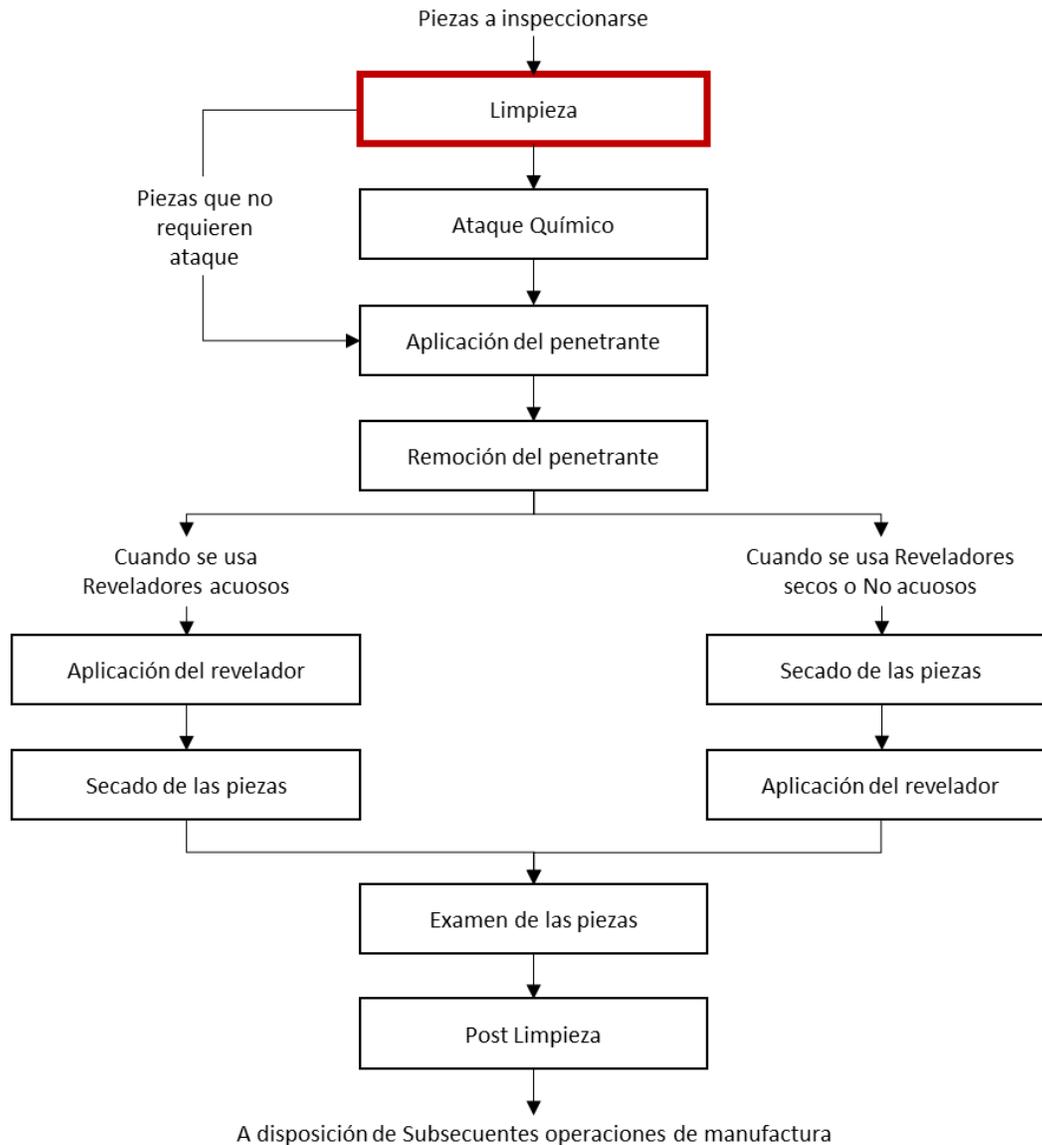
A pesar de que los avances en ciencia y tecnología han logrado reducir la huella ecológica en todo el proceso de mantenimiento realizado en las piezas de aeronaves a lo largo de la historia, aún es significativo el impacto ambiental generado; debido a que se requieren de procesos de limpieza previos a los tratamientos y pruebas superficiales que se realizan a los materiales, cuya huella hídrica no solo es importante, sino que también es compleja y difícil de remediar. Tal es el caso de las aguas resultantes del proceso de realizar pruebas no destructivas con líquidos penetrantes a las piezas del motor durante su mantenimiento.

#### **6.1.1 Pruebas no destructivas con líquidos penetrantes**

El análisis con líquidos penetrantes se utiliza para evidenciar defectos superficiales en materiales no porosos, como metales, cerámicos, vidrios, plásticos, etc., ya sea en el momento de su fabricación o durante el mantenimiento. El principio de esta técnica se basa en el fenómeno de la fuerza de cohesión del líquido, la fuerza de adherencia del líquido a la superficie, la capilaridad del líquido dentro de los defectos del material y la tensión superficial del material expuesto en los defectos.

El procedimiento llevado a cabo se describe en la norma ASTM E1417 99 - Práctica normalizada para el examen por líquidos penetrantes (ASTM, 1998). En la Figura 3 se muestra el diagrama a seguir para realizar la prueba y se observa que el primer paso es la preparación de las superficies de las muestras mediante una limpieza.

Todas las superficies para inspeccionar deben estar limpias, secas y libres de sólidos, aceites, grasas, pintura y otros recubrimientos que son productos de corrosión, escamas, metal, depósitos de *flux* de soldadura, residuos químicos, y otros materiales que podrían impedir que el penetrante ingrese en las discontinuidades, suprima la acción del tinte o produzca un fondo inaceptable. La limpieza implica desengrasar con vapor de solvente, limpieza ultrasónica o soluciones de limpieza en base acuosa, siendo esta última la más común por su practicidad. La limpieza base acuosa se lleva a cabo añadiendo solventes alcalinos sobre la superficie y después de dejarlos actuar, son enjuagados con agua desionizada para eliminar por arrastre los contaminantes superficiales.



**Figura 3.** Diagrama del procedimiento de pruebas con líquidos penetrantes.

Con lo anterior se sabe que el agua desionizada utilizada para el enjuague después de los lavados se convierte en agua residual del proceso con una composición variante, la cual dependerá de los contaminantes y la cantidad de estos presentes sobre la superficie de la muestra, pues el agua residual será una mezcla de estos con el solvente alcalino utilizado. Estas características hacen que el agua requiera de tratamientos especiales previo a su descarga para que se cumpla con las concentraciones de contaminantes permitidas según las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001 Y NOM-003, cuyos límites máximos permisibles varían según sea su sitio de disposición final.

## 6.2 Marco normativo para el vertido de aguas residuales

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) se encarga de establecer y verificar el cumplimiento de la normatividad que envuelve el régimen a seguir en cuanto a los parámetros que se evalúan para determinar si el agua residual se encuentra en condiciones óptimas para ser vertida a un cuerpo de disposición final. En caso de no cumplir con los límites establecidos las aguas residuales deben ser tratadas y posteriormente evaluadas nuevamente hasta que se cumpla con lo establecido.

### 6.2.1 Parámetros utilizados para evaluar la calidad del agua

#### a. Sólidos Totales

Como lo establece la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCIFI-2015 (2015), los Sólidos Totales en una muestra de agua se definen como el residuo que permanece en una cápsula después de evaporar y secar la muestra a una temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El principio de este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sólidos disueltos, así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas; mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos se pesan y sirven de base para el cálculo del contenido de éstos. La fórmula para hacer el cálculo del contenido de sólidos totales en las muestras es la siguiente:

$$ST = \frac{(m_3 - m_1)}{V} 1\ 000\ 000 \quad (1)$$

donde:

ST: sólidos totales,  $\text{mg L}^{-1}$ .

$m_3$ : masa de la cápsula con residuo post-evaporación, g.

$m_1$ : masa de la cápsula vacía a masa constante, g.

V: volumen de la muestra, mL.



### c. Potencial de hidrógeno (pH)

La magnitud pH o potencial de iones hidrógeno, es una medida de la actividad de los iones hidrógeno ( $H^+$ ) presentes en una disolución. Se utiliza una escala de 0 a 14 para determinar la concentración de los iones  $H^+$  presentes en unidades de pH, y con ello conocer si se trata de una solución ácida, básica o neutra (Chang & Goldsby, 2013):

- Solución Ácida:  $[H^+] > 10^{-7} \rightarrow pH < 7$  UpH
- Solución Neutra:  $[H^+] = 10^{-7} \rightarrow pH = 7$  UpH
- Solución Básica:  $[H^+] < 10^{-7} \rightarrow pH > 7$  UpH

En la Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016 (ANÁLISIS DE AGUA-MEDICIÓN DEL pH EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS-MÉTODO DE PRUEBA- se define al pH en términos de la actividad relativa de los iones de hidrógeno en la disolución:

$$pH = -\log a_H = -\log (m_H \gamma_H/m^0) \quad (4)$$

Donde  $a_H$  es la actividad relativa del ion hidrógeno (en base molal);  $\gamma_H$  es el coeficiente de actividad molal del ion hidrógeno  $H^+$  a la molalidad  $m_H$ , y  $m^0$  es la molalidad estándar.

El principio de la medición del valor de pH se basa en determinar la diferencia de potencial que se genera entre la concentración de iones  $H^+$  de la solución salina de referencia que contiene el electrodo (concentración conocida y con un pH neutro) y la solución de la muestra. Cuando la concentración de  $H^+$  es mayor en la muestra que en la solución de referencia, se tiene un valor de pH ácido; cuando es menor la concentración de  $H^+$  en la muestra que en la solución de referencia se trata de una solución básica; y cuando se igualan las concentraciones, se trata de una muestra con pH neutro. El valor de pH de una medición depende de la temperatura debido al equilibrio de disociación. Por lo tanto, la temperatura de la muestra siempre debe ser reportada en conjunto con el pH de la muestra (Chang & Goldsby, 2013).

#### **d. Potencial de óxido-reducción (ORP)**

El potencial de óxido-reducción (ORP, por sus siglas en inglés) es una medida de la capacidad oxidante o reductora que posee una solución acuosa. La capacidad que tiene una solución acuosa de oxidar o reducir varía según su composición ya que depende del potencial estándar de reducción de las sustancias presentes en ella; por ejemplo, mientras más oxígeno disuelto exista en la solución, mayor capacidad oxidante tendrá la muestra debido a que el oxígeno es un agente oxidante con un potencial estándar positivo de reducción (Lehr & Keeley, 2005).

Para medir el ORP se utiliza como referencia un electrodo inerte (metales nobles) con un potencial constante y conocido. A partir del electrodo de referencia se cuantifica la diferencia de potencial entre éste y la muestra a analizar. El resultado es expresado en milivolts (mV), un ORP positivo indica condiciones oxidantes; mientras que un ORP negativo, reductoras (Bard, Inzelt, & Scholz, 2008).

El análisis del ORP en muestras acuosas se utiliza en el proceso de desinfección para determinar la cantidad del desinfectante que se requiere y verificar que el agua se encuentre en las condiciones adecuadas para su uso según la normativa requerida, por ejemplo, para potabilizar agua o para ser utilizada en piscinas. También se utiliza en procesos industriales que requieren la acción de microorganismos para conocer cualitativamente que reacciones se están llevando a cabo y controlar el sistema en tiempo real, como es el caso de la industria cervecera en donde a partir del ORP del mosto se sabe cuándo se llega al punto de fermentación deseado según el tipo de cerveza (Kruse, 2018).

En el proceso de tratamiento de aguas residuales se utiliza esta técnica de medición para conocer en qué condiciones se encuentra el medio en cuanto a la disponibilidad de oxígeno y con ello que microorganismos son capaces de proliferar en él según sea su respiración: aerobios, anaerobios, facultativos o ninguno. Por lo tanto, conociendo la medición del ORP del agua se sabe que microorganismos se desarrollan óptimamente en el medio y con ello, las reacciones bioquímicas que se llevan a cabo. En la Tabla 2 se muestran las reacciones que se llevan a cabo en cada intervalo de ORP según las condiciones del medio en cuanto a la disponibilidad de oxígeno (Lehr & Keeley, 2005).

**Tabla 2.** Reacciones que se llevan a cabo en cada intervalo de ORP según la disponibilidad de oxígeno en el agua residual.

Intervalo de ORP (mV)	Condiciones	Reacciones
+300 a +600	Aerobias (oxidantes) <b>ORP &lt; -200 mV</b>	Reducción de nitratos
+220 a +500		Reducción de manganeso
+180 a +400		Reducción de hierro
+100 a +350	Anóxicas <b>-200 mV &lt; ORP &lt; +200 mV</b>	Nitrificación
+100 a -200		Reducción de sulfatos
+50 a +250		Oxidación de materia orgánica con O <sub>2</sub> libre
+25 a +250		Remoción biológica de fósforo
+50 a -50		Denitrificación
-50 a -250		Formación de sulfitos (H <sub>2</sub> S)
-100 a -225	Anaerobias (reductoras) <b>ORP &gt; +200 mV</b>	Fermentación
-100 a -250		Formación biológica de fósforo
-175 a -400		Producción de metano

### e. Conductividad electrolítica

La norma NMX-AA-093-SCFI-2000 (ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTROLÍTICA - MÉTODO DE PRUEBA) define a la conductividad electrolítica como “una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura”.

La conducción de la corriente eléctrica en agua puede explicarse por medio de la disociación electrolítica; cuando se disuelve en agua un ácido, una base o una sal una porción se disocia en iones positivos y otra en negativos:  $MA \rightarrow M^+ + A^-$ .

La determinación de la conductividad electrolítica en el agua se utiliza para conocer el grado de mineralización del agua según la cantidad de iones que se encuentran disueltos

en ella. Para medirla se utiliza una celda electroquímica con dos electrodos de área conocida separados a una distancia constante, donde el electrolito será la muestra de agua a analizar. Al aplicar un campo eléctrico entre los electrodos, el voltaje, es decir, la diferencia de potencial entre ellos será proporcional a la distancia y al campo eléctrico:

$$V = d E \quad (5)$$

Donde:

V es el voltaje entre los electrodos, en V.

E es el campo eléctrico aplicado, en  $V \text{ cm}^{-1}$ .

d es la distancia de separación entre los electrodos, en cm.

La conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica y está definida por la relación:

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (6)$$

Donde:

J es la densidad de corriente,  $A \text{ cm}^{-2}$ .

E es el campo eléctrico,  $V \text{ cm}^{-1}$ .

Por su parte, la densidad de corriente se establece como la relación entre la corriente eléctrica (I, en A) que atraviesa una superficie y el área (A, en  $\text{cm}^2$ ) de esa superficie:

$$J = \frac{I}{A}; \text{ mientras que la relación del campo eléctrico es voltaje sobre área: } E = \frac{V}{d}$$

Tomando en cuenta lo anterior, si se despeja E de las ecuaciones (5) y (6) para después igualar los términos, se tiene la equivalencia:  $\frac{V}{d} = \frac{J}{\sigma}$ , de donde se tiene que el voltaje es:

$$V = \frac{I d}{\sigma A} \quad (7)$$

Y la resistencia de la solución al paso de corriente entre ambos electrodos se representa según la ecuación:

$$R = \frac{d}{\sigma A} \quad (8)$$

A partir de la cual se despeja la conductividad y se calcula su valor en unidades de siemens por cm [ $S\text{ cm}^{-1}$ ].

Considerando las relaciones mostradas, se tiene que la ecuación 7 se transforma en la Ley de Ohm:

$$V = I R \quad (9)$$

## 6.2.2 Técnicas de análisis del agua

### a) Espectroscopía de fluorescencia

La espectroscopía de fluorescencia es una técnica utilizada para determinar la concentración de ciertos analitos en una muestra según sus propiedades fluorescentes. La fluorescencia es un tipo de luminiscencia generada debido a la excitación de los átomos de las moléculas del analito al incidir un haz de radiación ultravioleta sobre la muestra. Los átomos absorben los fotones provenientes del haz de luz UV, cuyo aporte energético propicia la transición de los electrones de su estado fundamental a un estado excitado, aumentando su nivel energético temporalmente; una vez que los electrones regresan a su estado fundamental el exceso de energía es liberado emitiendo un fotón de menor energía, que corresponde a una longitud de onda más larga que el fotón absorbido.

### b) Espectroscopía ultravioleta-visible (UV-VIS)

La espectroscopía UV-VIS es una técnica analítica empleada para detectar elementos o moléculas presentes en una muestra a partir de la longitud de onda que emitan los enlaces que los conforman. El principio de la espectroscopía UV-VIS involucra la absorción de radiación ultravioleta – visible por una molécula, causando la promoción de un electrón de un estado basal a un estado excitado, liberándose el exceso de energía en forma de calor (Perkampus *et al.*, 2013).

El proceso de absorción de radiación ultravioleta y visible por una especie M se lleva a cabo en dos etapas, la primera de las cuales corresponde a la excitación según:



donde  $M^*$  representa la partícula atómica o molecular en su estado electrónico excitado que se produce como resultado de la absorción del fotón  $h\nu$ . Este estado excitado tiene un breve tiempo de existencia ( $10^{-8}$  a  $10^{-9}$  s) y desaparece a través de procesos de relajación, típicamente calor (Perkampus *et al.*, 2013).



La absorción de la radiación ultravioleta o visible se produce por lo general como consecuencia de la excitación de los electrones de enlace; debido a esto, la longitud de onda de los picos de absorción se puede correlacionar con los tipos de enlace existentes en la especie que se estudia (Perkampus *et al.*, 2013). Esta técnica se rige por la Ley de Beer-Lambert, la cual establece que la absorbancia es proporcional al número de moléculas absorbentes. Cuando un haz de radiación UV-Vis atraviesa una disolución conteniendo un analito absorbente, la intensidad incidente del haz ( $I_0$ ) es atenuada hasta  $I$ . Esta fracción de radiación que ha logrado traspasar la muestra es denominada transmitancia (T):

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (12)$$

Por aspectos prácticos, se utiliza la absorbancia (Abs) en lugar de la transmitancia (Abs =  $-\log T$ ), por estar relacionada linealmente con la concentración de la especie absorbente según la Ley de BeerLambert (Perkampus *et al.*, 2013):

$$\text{Abs} = \varepsilon \cdot l \cdot c \quad (13)$$

Dónde:

$\varepsilon$  es el coeficiente de absortividad molar, en  $L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ .

$l$  es la longitud del trayecto de la luz a través de la solución, en cm; y

$c$  es la concentración de la especie absorbente, en  $\text{mol L}^{-1}$ .

### **6.2.3 Normas Oficiales Mexicanas con aplicación a aguas residuales**

Las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-ECOL-2021, NOM-002-ECOL-1996 y NOM003-ECOL-1997 establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en los efluentes de agua residual, diferenciándose en que cada una aborda un lugar distinto de descarga. Todas tienen como referencia las normas en las que se establecen los métodos para cuantificar contaminantes físicos, químicos y biológicos, ya que esos son los procedimientos a seguir para cumplir con los niveles permitidos de cada contaminante en el efluente de descarga. En el caso de la NOM-002 y NOM-003, también se referencian con la NOM-001 ya que esta norma se refiere de manera más generalizada a la calidad de las aguas de descarga.

Los límites, así como los métodos de prueba, son determinados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se deben hacer muestreos y análisis de manera periódica en las descargas para analizar la calidad del efluente y, en caso de que los valores de ciertos contaminantes sean superiores a los permitidos, los responsables de cada descarga deben alertar a las autoridades correspondientes y están obligados a presentar un programa con las acciones u obras que realizarán para controlar la calidad de sus descargas. La CONAGUA realiza análisis de manera aleatoria para verificar que se cumplan con los requisitos necesarios y si se encuentra alguna irregularidad o incumplimiento de las normas, aplica una sanción.

En caso de que el responsable proponga algún método de prueba alternativo, debe solicitar la autorización de la CONAGUA para llevarlo a cabo, ya que todos los procesos industriales son diferentes y por consiguiente las descargas generadas poseen distintas características, así que deben tratarse de manera especializada cada una. Por ello, en algunos casos es necesario que la empresa proponga la manera ideal de tratar sus residuos, siempre y cuando se tomen en cuenta los estándares aceptados y se cumplan con los requisitos de las normas. Una vez que los métodos alternos hayan sido analizados y aceptados por la CONAGUA, estos planes se pueden usar de referencia para futuros casos que presenten alguna similitud.

En particular, la NOM-001 se aplica para las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, excepto las provenientes de drenajes separados de aguas pluviales. La vigilancia de su cumplimiento le corresponde a la SEMARNAT y a la marina por tratarse de temas nacionales. En la Tabla 3 se enlistan los límites máximos permisibles

de los parámetros relevantes para el proyecto, según el cuerpo de agua receptor y considerando su uso como público urbano. Para más detalles ver Anexo 1.

**Tabla 3.** Límites máximos permisibles en promedio mensual según la tabla 1 de la NOM-001-ECOL-2021.

Parámetros	Ríos	Embalses naturales y artificiales
pH (UpH)	6-9	6-9
Temperatura (°C)	35	35
Grasas y aceites (mg L <sup>-1</sup> )	15	15
Sólidos Suspendidos Totales (mg L <sup>-1</sup> )	60	20
Demanda Química de Oxígeno (mg L <sup>-1</sup> )	150	100
Cianuro (mg L <sup>-1</sup> )	1	1
Cobre (mg L <sup>-1</sup> )	4	4
Cromo (mg L <sup>-1</sup> )	1	0.5
Zinc (mg L <sup>-1</sup> )	10	10

**Tabla 4.** Límites máximos permisibles según la NOM-002-ECOL-1996.

Parámetros	Promedio mensual	Instantáneo
pH (UpH)	5.5 - 10	5.5 - 10
Temperatura (°C)	NA	40
Grasas y aceites (mg L <sup>-1</sup> )	50	100
Sólidos Sedimentables (mg L <sup>-1</sup> )	5	10
Cianuro total (mg L <sup>-1</sup> )	1	2
Cobre total (mg L <sup>-1</sup> )	10	20
Cromo hexavalente (mg L <sup>-1</sup> )	0.5	1
Zinc (mg L <sup>-1</sup> )	6	12

La NOM-002 es para las descargas a los sistemas de alcantarillado, excepto a las aguas residuales domésticas, pluviales y las generadas por la industria, que sean distintas a las del proceso y conducidas por un drenaje separado. En este caso, la autoridad competente podrá fijar condiciones particulares de descarga como nuevos límites máximos, siempre y cuando estén justificados, así como también podrá quedar exento el responsable de realizar los análisis correspondientes, únicamente si se demuestra que su proceso no genera contaminantes. La vigilancia del cumplimiento corresponde a los gobiernos estatales, municipales y del distrito federal. En la Tabla 4 se enlistan los límites máximos permisibles de los parámetros relevantes para el proyecto. Para más detalles ver Anexo 2. Por su parte, la NOM-003 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos, ya sea con contacto directo, indirecto u ocasional. Entre los servicios con contacto directo se encuentra el llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines; mientras que los servicios con contacto indirecto u ocasional incluyen el riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones. En la Tabla 5 se muestran los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas establecidos en la NOM-003 por promedio mensual y según el tipo de reúso del agua tratada.

**Tabla 5.** Límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la NOM-003- ECOL -1997.

Tipo de reúso	Coliformes fecales NMO/100 mL	Huevos de helminto (h/L <sup>-1</sup> )	Grasas y aceites (mg L <sup>-1</sup> )	DBO <sub>5</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	SST (mg L <sup>-1</sup> )
Servicios al público con contacto directo	240	1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1,000	5	15	30	30

El cumplimiento de estas normas es de gran importancia para la salud pública, el ecosistema del lugar en el que se realicen las descargas y para el ambiente en general.

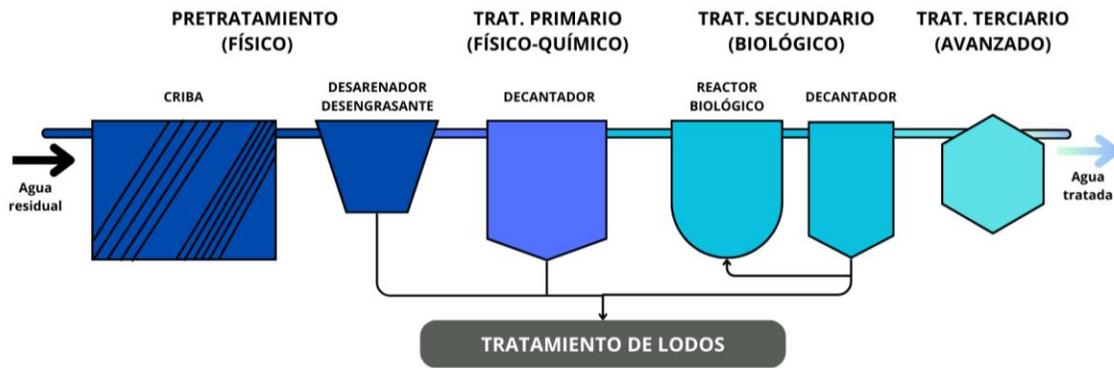
Si se respetan los límites máximos permitidos en las aguas se fomenta el equilibrio ecológico; en caso contrario, no sólo habría descargas de agua tóxica, sino que generaría efectos secundarios como contaminación del suelo que a su vez afectaría a la flora y fauna del lugar, además de emitir al aire una gran cantidad de contaminantes y se dispersarían causando distintas enfermedades. Para cumplir con las normativas establecidas para las aguas residuales es necesario darles el tratamiento adecuado según su origen y composición hasta que sean aptas para ser vertidas en algún sitio de disposición final o bien, ser reutilizadas.

### **6.3 Tratamiento de aguas residuales**

Según sea el tipo de agua residual varía el tratamiento que se requiera para eliminar de ella los contaminantes presentes, los cuales van desde los tratamientos convencionales en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) hasta el uso de nuevas tecnologías que involucran métodos multidisciplinarios, como son los electroquímicos y bioelectroquímicos, así como la incorporación de estos últimos métodos emergentes a las PTAR convencionales.

#### **6.3.1 Planta de tratamiento de aguas residuales**

Con el fin de descargar el agua residual con los parámetros establecidos por las normas correspondientes, se lleva a cabo un proceso de depuración en una planta de tratamiento. Según sean las características del agua y su procedencia, varían los pasos que se requieren y el tamaño de los equipos instalados. De manera general se describe el procedimiento que se lleva a cabo en una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas y se esquematiza en la Figura 4.



*Figura 4. Esquema de una planta de tratamiento de aguas residuales. Elaboración propia.*

### 6.3.1.1 Pre-Tratamiento

Al inicio del tratamiento de los efluentes residuales es de suma importancia separar todo aquello que pueda obstruir los equipos de las etapas posteriores, como los sólidos de gran tamaño, arenas, aceites y grasas. El pre-tratamiento es la fase en donde esto se lleva a cabo, mediante operaciones físicas o mecánicas y se conforma de los siguientes equipos (Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento, 2007):

1. Criba: Separación de sólidos grandes por medio de rejillas.
2. Desarenadores – Desengrasantes: Separación física por diferencia de densidades de grasas y aceites, así como decantación de arenas y sólidos de mayor tamaño.

### 6.3.1.2 Tratamiento primario

Su objetivo es reducir la carga orgánica presente en el agua, mediante la eliminación de sólidos suspendidos y materiales flotantes. Puede remover hasta un 90% de sólidos sedimentables, 60% de sólidos suspendidos y el 40% de la DBO. En este proceso se utiliza un decantador, donde se lleva a cabo la separación de partículas suspendidas en el agua por sedimentación, ya sea por simple gravedad o utilizando sistemas coagulantes (Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento, 2007).

### **6.3.1.3 Tratamiento secundario**

En esta fase del proceso se busca degradar sustancialmente el contenido orgánico del agua residual mediante la degradación bacteriana de la materia orgánica a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En esta fase se disminuye considerablemente la DBO y existen tres procesos que varían en el equipo a utilizar para fijar los microorganismos y en el flujo del agua:

1. Filtro percolador: Equipo en donde se rocía continuamente el agua residual sobre una superficie plástica y porosa donde se desarrolla una biopelícula bacteriana. Los microorganismos consumen la materia orgánica presente en el agua al pasar a través de la biopelícula por gravedad, por ello se considera como un filtro biológico.
2. Reactores biológicos rotatorios: Dispositivo donde se instalan discos sobre un eje que gira continuamente sumergido parcialmente en un tanque con el agua a tratar. Sobre la superficie de los discos se fija la biomasa, que se encuentra en contacto con el agua residual y el aire.
3. Lodos activados: Tanque donde se encuentran consorcios microbianos sedimentados en lodos que se mantienen con aireación constante. El efluente ingresa por la parte superior del tanque y luego de su tratamiento es decantada.

### **6.3.1.4 Tratamiento terciario**

Proporciona una etapa final para aumentar la calidad del efluente al estándar requerido antes de ser descargado al ambiente receptor, sobre todo cuando existe la presencia de contaminantes emergentes. Algunos de los procesos implementados en el tratamiento terciario son:

1. Separación de sólidos en suspensión.
2. Adsorción en carbón activado.
3. Desinfección: Ozonización, Cloración, y radiación UV, entre otros.

### 6.3.2 Tratamientos electroquímicos

El agua residual de procesos industriales contiene diferentes contaminantes, según sea el proceso de manufactura que lleven a cabo, por lo que requieren de tratamientos especializados para lograr cumplir con las normas en sus descargas ya que los tratamientos convencionales son insuficientes. Por ello, técnicas alternas como las electroquímicas han tenido especial interés debido a su eficiencia para tratar aguas con alto contenido de contaminantes complejos: compuestos aromáticos, grasas, aceites, metales pesados.

Las técnicas electroquímicas de tratamiento de agua se llevan a cabo en una celda electrolítica, la cual está compuesta de:

- a) Electrodo: Conductores electrónicos de materiales metálicos, cerámicos, carbonosos o compuestos, que son sumergidos en el conductor iónico. Son los encargados de transferir una corriente eléctrica hacia el electrolito, por lo que en su superficie se llevan a cabo reacciones de óxido reducción y se forma una doble capa electroquímica debido a la polarización del material y el electrolito que se encuentra en la interfase. Una celda electroquímica puede estar conformada solo por dos electrodos: el ánodo (reacciones de oxidación) y el cátodo (reacciones de reducción), o bien; por tres electrodos: el electrodo de trabajo (reacción de interés), electrodo auxiliar (reacción complementaria) y el electrodo de referencia (electrodo inerte y a potencial constante).
- b) Electrolito: Conductor iónico líquido o sólido donde se encuentran iones y especies solvatadas, transportadores químicos de carga cuyo objetivo es cerrar el circuito entre los electrodos y conducir la corriente eléctrica.
- c) Circuito externo: Conexiones de cables con los que se comunican los electrodos con una fuente de poder o un potencióstato.

La electrocoagulación y electro-oxidación son técnicas electroquímicas que consisten en la aplicación de una corriente eléctrica a través de dos electrodos para propiciar reacciones químicas cuyo resultado sea la eliminación o separación física de los contaminantes del agua.

### 6.3.2.1 Electrocoagulación

La técnica electroquímica de electrocoagulación se realiza en una celda compuesta de dos electrodos, ánodo y cátodo; así como de una solución conductora, y el agua residual a tratar. Para llevar a cabo la electrocoagulación se utiliza un ánodo de sacrificio, el cual puede ser de hierro o de aluminio, este electrodo cumplirá la función de desintegrarse tras el paso de la corriente eléctrica con el fin de liberar iones de hierro o aluminio, para el caso del hierro se sigue la reacción (Peralta *et al.*, 2005):



Los iones liberados actuarán como coagulantes reaccionando con los contaminantes presentes en la solución y precipitándolos, para separarlos físicamente del agua. También tienen la función de floculantes, según sea el contaminante presente; en este caso, son las burbujas de hidrógeno producidas en el cátodo las que ayudan a transportar los flocúlos generados a la superficie (Peralta *et al.*, 2005). En la Figura 5 se ilustra el proceso:

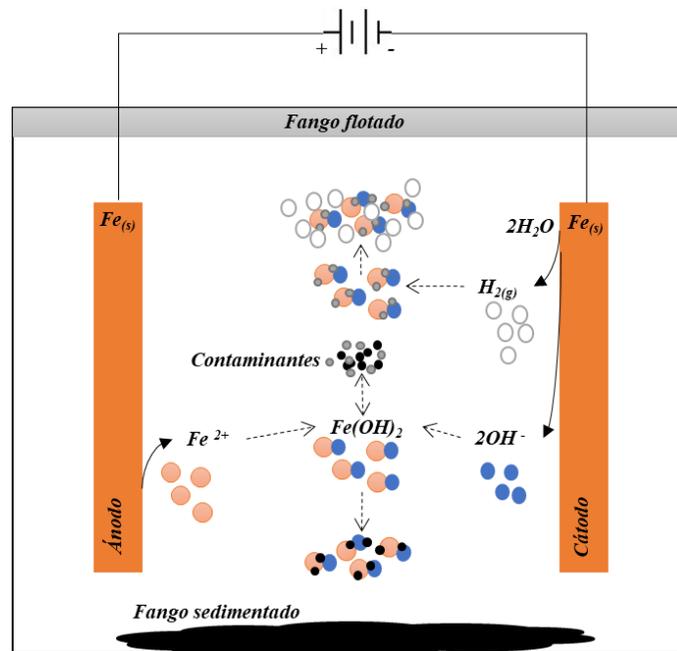


Figura 5. Esquema de una celda de electrocoagulación-floculación. Elaboración propia.

Las ventajas de esta técnica frente a la coagulación química son:

- No se requieren reactivos químicos coagulantes, únicamente electricidad.
- Hay menor cantidad de lodos sedimentados para ser tratados.
- Es más rápida la disociación de los iones de hierro del electrodo de sacrificio que de los compuestos químicos coagulantes.
- Los coágulos formados presentan un mayor tamaño, lo que hace más fácil su filtración.

### 6.3.2.2 Electrooxidación

La electrooxidación es una técnica de tratamiento de aguas también conocida como incineración electroquímica cuyo objetivo es oxidar electroquímicamente los componentes químicos orgánicos disueltos en el agua. Este proceso se lleva a cabo en una celda electroquímica de dos electrodos, en el ánodo donde ocurren reacciones de oxidación y en el cátodo reacciones de reducción. Lo ideal es que cada electrodo se encuentre en una cámara, separadas por una membrana de intercambio iónico e inerte electroquímicamente, para evitar la reducción de los iones hidroxilo formados (Peralta *et al.*, 2005). La oxidación de los contaminantes es promovida por la formación del radical hidroxilo ( $\cdot OH_{ads}$ ) el cual resulta de la oxidación electroquímica del agua que ocurre en la interfase del electrodo-electrolito (Peralta *et al.*, 2005):



Debido a que la formación de radicales hidroxilo es de suma importancia para la eficiencia del sistema, el material del electrodo es un factor clave para su desempeño puesto que de él dependerá la electrocatálisis de la oxidación del agua (Peralta, Mejía, Godínez, & Meas-Vong, 2005).

### 6.3.3 Tratamientos bioelectroquímicos

Los tratamientos bioelectroquímicos se realizan en una celda electroquímica, distinguiéndose por la presencia de microorganismos en el medio, los cuales poseen la capacidad de generar corriente eléctrica al alimentarse de materia orgánica presente en el agua residual. Estos microorganismos son llamados electrogénicos y los más reportados son bacterias del filo proteobacterias (Heidrich *et al.*, 2018).

#### 6.3.3.1 Metabolismo bacteriano electrogénico.

El metabolismo electrogénico de los microorganismos varía según la especie que se utilice, sin embargo, a continuación, se describe un proceso generalizado utilizando como ejemplo el modelo de la especie *Geobacter sulfurreducens*, la cual requiere de acetato como fuente de carbono (Kracke *et al.*, 2015; Madigan *et al.*, 2009):

1. El acetato ingresa al citosol de las bacterias a través de canales selectivos, proteínas transportadoras ubicadas en la membrana externa.
2. Dentro del citosol la materia orgánica se dirige a la enzima Acil-CoA sintetasa donde se le añade el grupo CoA y se convierte en Acetil-CoA.
3. El Acetil-CoA ingresa al ciclo de Krebs, ruta metabólica donde por cada molécula que ingresa se obtiene una molécula que aporta energía a la célula llamada adenosín trifosfato (ATP); dos moléculas de dióxido de carbono, 2 CO<sub>2</sub>; cuatro moléculas transportadoras de carga, 3 NADH (dinucleótido de nicotinamida y adenina) y 1 FADH<sub>2</sub> (dinucleótido de flavina y adenina).
4. En su forma oxidada (NAD<sup>+</sup>) esta molécula se encuentra disponible para recibir electrones, por lo que ingresa al ciclo de Krebs y se reduce (recibe electrones y protones) a NADH; en esta forma se transporta hacia la membrana interna, específicamente a una enzima que se encuentra embebida en ella, llamada NADH deshidrogenasa.
5. La NADH deshidrogenasa oxida el NADH al extraer los electrones y protones que transporta. En esta enzima ingresa una molécula de NADH y se expulsa una molécula oxidada NAD<sup>+</sup> hacia el citosol, dos electrones (2 e<sup>-</sup>) y un protón (1 H<sup>+</sup>).
6. Los protones son liberados al periplasma para seguir su camino hacia la ATP sintasa, que es un complejo enzimático que funciona como una turbina propulsada

por el flujo de protones y cuya energía potencial generada se utiliza para sintetizar ATP.

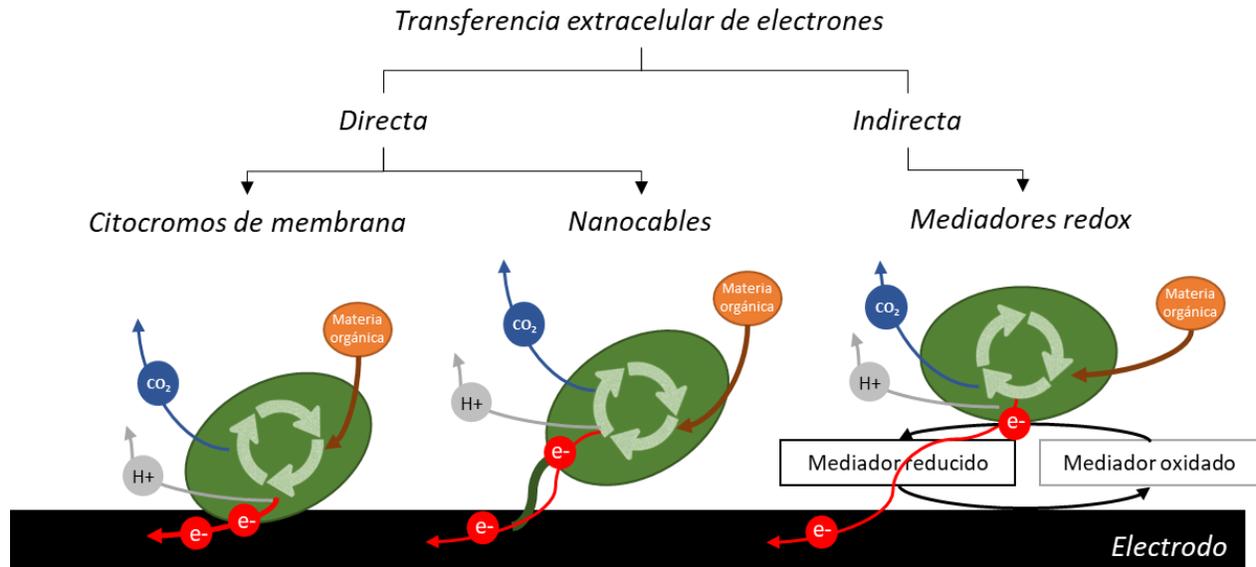
7. Los electrones son llevados por las quinonas hacia el citocromo de membrana interna para iniciar su camino a través de la cadena de transporte de electrones.
8. En la cadena de transporte de electrones, estos son conducidos de un citocromo a otro gracias a la diferencia de potencial que existe entre ellos. El flujo de electrones va desde los citocromos de potencial negativo hacia los positivos, debido a que estas condiciones favorecen a la reducción (aceptar  $e^-$ ) y posterior oxidación (donar  $e^-$ ) de los citocromos.
9. Los electrones son expulsados de la bacteria con la ayuda de los citocromos de membrana externa tipo c (los últimos de la cadena de transporte de electrones) hacia el aceptor final.

La cantidad de electrones liberados depende del aceptor final que se encuentre disponible, en una celda bioelectroquímica los electrones serán recibidos por el electrodo, siempre y cuando sea de un material capaz de recibir electrones, es decir, que posea un potencial más positivo que el del citocromo c para que continúe el flujo y con ello se genere la corriente eléctrica en la celda. Si el electrodo no cumple con estas condiciones los electrones serán entregados a un receptor disponible del medio, como en el caso de *G. sulfurreducens* que reduce el  $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$  (Song *et al.*, 2016).

En caso de que no exista algún aceptor externo disponible, disminuye la generación de electrones por medio de esta ruta metabólica y se activa la gluconeogénesis. La gluconeogénesis se lleva a cabo en el citosol y consiste en aprovechar las moléculas energéticas formadas para sintetizar glucosa y moléculas que le ayudan al metabolismo propio del crecimiento bacteriano (Song *et al.*, 2016).

La transferencia de electrones entre las bacterias y el electrodo puede ser de manera directa o indirecta. De manera directa a través de los citocromos se encuentran embebidos en la membrana celular, los cuáles reducen al electrodo al entregarle los electrones; o bien, por medio de pilis o flagelos que son extensiones membranales y se asemejan a unos nano cables que conectan a la bacteria con el electrodo. La transferencia de electrones de manera indirecta ocurre a través de mediadores redox, ya sea que se añadan al medio o sean producidos por los mismos microorganismos, lo que depende de la especie bacteriana (Koch *et al.*, 2016; Sánchez, Bustos, & González,

2022). En la Figura 6 se ilustra con un diagrama los 3 procesos de transferencia de electrones entre las bacterias y el electrodo.



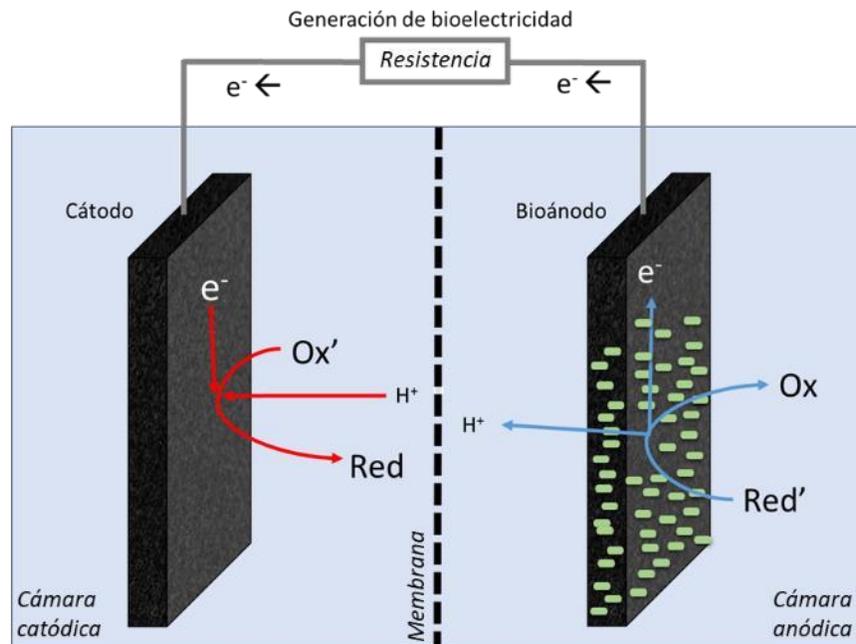
**Figura 6.** Diagrama de la transferencia de electrones entre las bacterias y el electrodo. Elaboración propia.

En el tratamiento de aguas residuales, los microorganismos electrogénicos son los encargados de degradar los contaminantes presentes en el agua a través de su metabolismo y como producto del mismo, liberar electrones y protones (Koch *et al.*, 2016). Los microorganismos se inoculan de una fuente exterior (como lodos activos o lixiviado de composta) en la celda y se mezclan con el agua a tratar; o bien, se utilizan los originarios del agua residual, si es que ya contiene carga microbiana (Cercado *et al.*, 2013; Sekar *et al.*, 2019). Estos sistemas pueden ser electrolíticos, es decir, que requieran un aporte energético para su funcionamiento, como en el caso de las celdas de electrólisis microbiana; o galvánicos, en los cuáles se genera bioelectricidad a partir de la acción microbiana de transformar energía bioquímica en eléctrica como son las celdas de combustible microbianas (Koch *et al.*, 2016).

### 6.3.3.2 Celdas de combustible microbianas

Una CCM es un biorreactor con dos cámaras separadas y comunicadas por una membrana de intercambio catiónico que permite el paso de los protones. En cada cámara se encuentra un electrodo: el ánodo en la cámara aniónica, donde ocurren reacciones de oxidación y el cátodo en la catiónica, en donde se lleva a cabo la reducción de especies (Koch *et al.*, 2016).

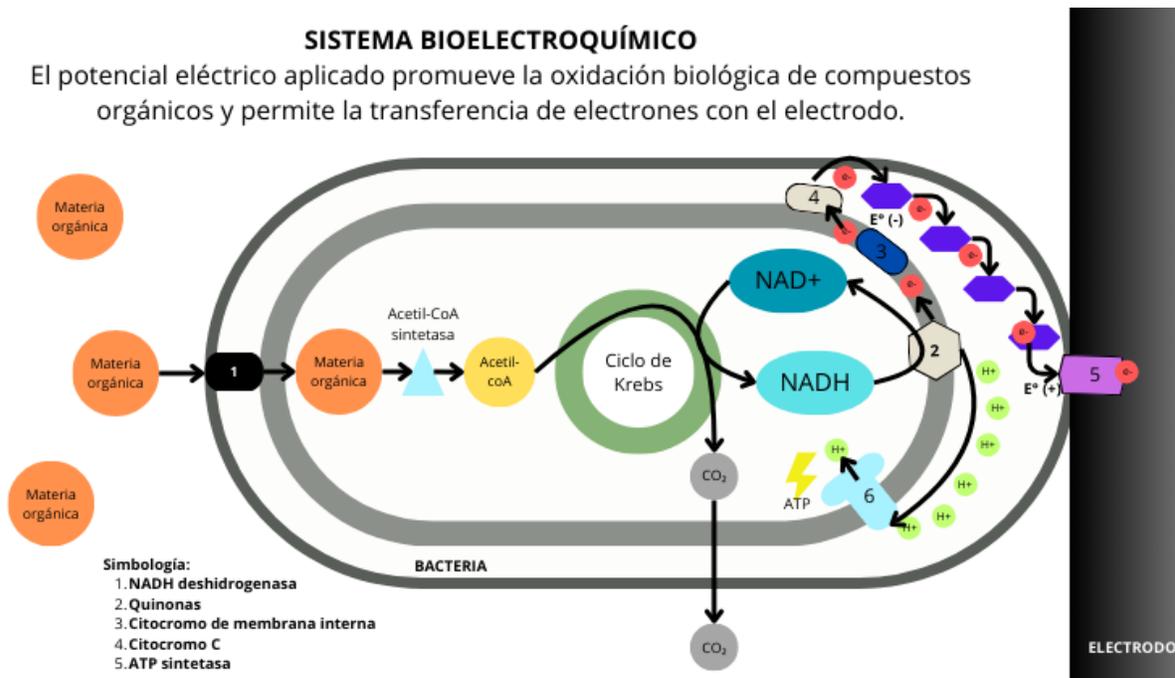
El agua residual se trata en estos biorreactores a partir de la oxidación de materia orgánica del medio por la acción de las bacterias electrogénicas presentes en la cámara anódica, las cuáles también son capaces de producir energía eléctrica al limpiar el agua debido a su metabolismo. Los microorganismos liberan protones y electrones como producto al degradar el sustrato añadido al medio, creando un flujo de electrones a través de un circuito que está compuesto por el ánodo, una resistencia externa y el cátodo, como se muestra en la Figura 7 (Flimban *et al.*, 2019).



**Figura 7.** Esquema de una celda de combustible microbiano. Elaboración propia.

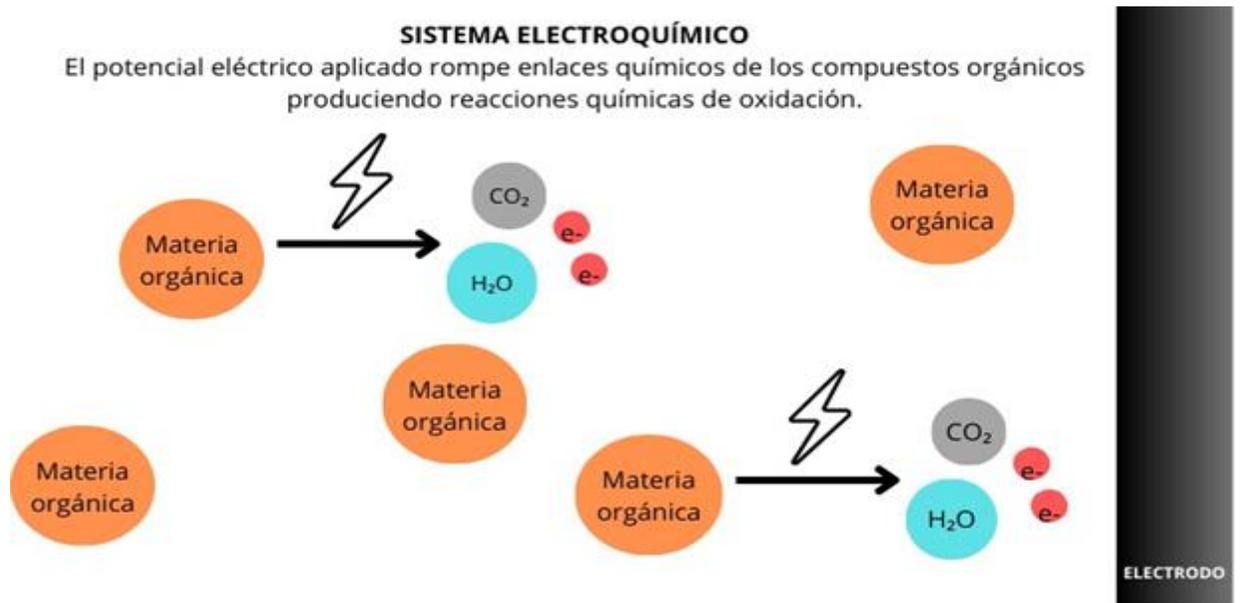
### 6.3.3.3 Celdas de electrólisis microbianas

La CEM es un dispositivo que fusiona principios de biología y electroquímica para degradar materia orgánica mediante la actividad metabólica de microorganismos electroactivos. En esta configuración, los microorganismos se adhieren al electrodo por acción del potencial aplicado a la celda, estas bacterias electroactivas oxidan los compuestos orgánicos presentes en el medio liberando dióxido de carbono y electrones que son transferidos hacia el electrodo (Ver Figura 8).



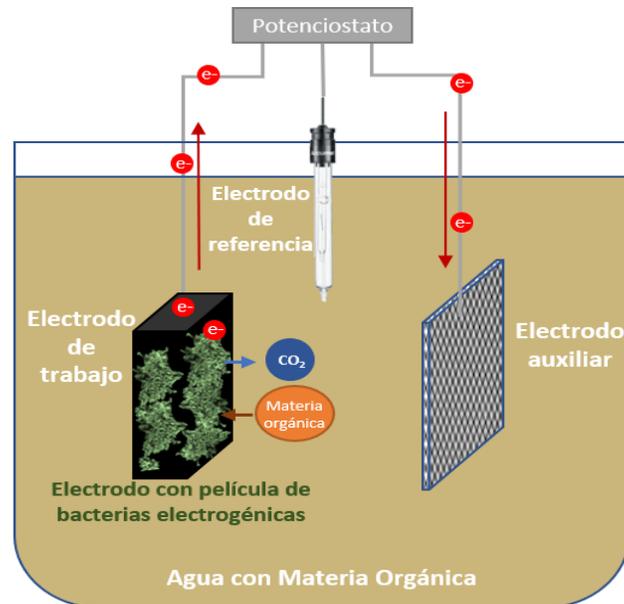
**Figura 8.** Mecanismo bioelectroquímico de oxidación de materia orgánica. Elaboración propia con referencia en Kracke et al., 2015; Madigan et al., 2009.

A diferencia de la celda de electrólisis convencional, que depende de que el potencial aplicado sea suficiente para propiciar las reacciones químicas necesarias para la descomposición de compuestos (Ver Figura 9), la celda de electrólisis microbiana utiliza la actividad biológica para catalizar y mejorar las reacciones redox, lo que resulta en una mayor eficiencia energética y una mayor capacidad para tratar aguas residuales ricas en materia orgánica.



**Figura 9.** Mecanismo electroquímico de oxidación de materia orgánica. Elaboración propia.

Una CEM está compuesta por tres electrodos: de trabajo, auxiliar o contraelectrodo y de referencia, los cuáles se conectan a un potenciostato o una fuente de poder y se sumergen en la muestra que contiene el agua a tratar y los microorganismos. Es en la superficie del electrodo de trabajo polarizado donde se forma la película bacteriana que degrada la materia orgánica mediante su metabolismo electrogénico. En la Figura 10 se muestra un esquema de una CEM.



**Figura 10.** Esquema de una CEM. Elaboración propia.

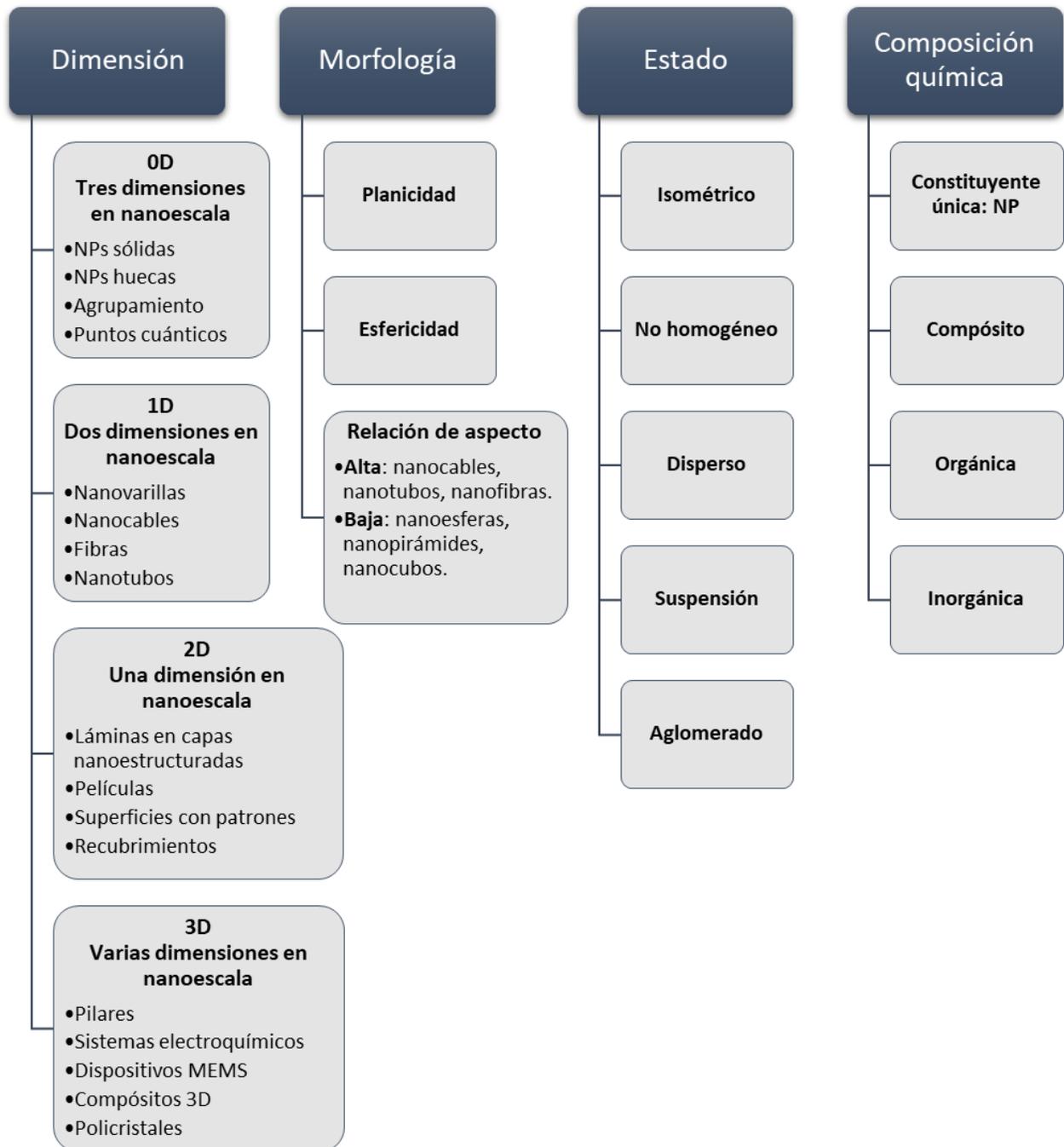
## **6.4 Modificación de electrodos con nanomateriales**

### **6.4.1 Nanomateriales: definición y clasificación**

Los nanomateriales son materiales que poseen al menos una de sus dimensiones en la nanoescala, en un intervalo entre 1 y 100 nm. Las propiedades de los nanomateriales dependen de su tamaño, y varían respecto a las que presenta un material macrométrico compuesto de los mismos elementos, ya que propiedades como el punto de fusión, la fluorescencia, la conductividad eléctrica, la permeabilidad magnética y la reactividad química cambian en función del tamaño de las partículas (Barhoum *et al.*, 2020; Saleh, 2020). Los materiales nanométricos se pueden clasificar según sus dimensiones, su morfología, su estado o su composición química. En la Figura 11 se definen y ejemplifican cada una de sus clasificaciones.

Debido a la versatilidad que presentan los nanomateriales en cuanto a morfología y propiedades, su campo de aplicación es extenso. Específicamente en electroquímica, se utilizan para modificar electrodos y mejorar las propiedades electrocatalíticas de los materiales. Al modificar los electrodos con nanomateriales se busca incrementar su área superficial y electroactiva, mejorar su actividad y selectividad, aumentar su durabilidad y reducir costos de fabricación, al soportar cantidades mínimas de materiales de alto valor en materiales baratos (Saleh, 2020; Sánchez, Bustos, & González, 2022).

Por su parte, en las CEM también se toma en cuenta la biocompatibilidad de los microorganismos inoculados con los nanomateriales presentes en los electrodos, ya que se encuentran presentes en la interfase y son los encargados de la transferencia electrónica hacia los electrodos.



**Figura 11.** Clasificación de nanomateriales. Modificada y traducida de (Saleh, 2020).

### 6.4.2 Métodos de síntesis

Existen dos clasificaciones para los métodos de síntesis de nanomateriales, los descendentes o “*top-down*” y los ascendentes o “*Bottom-up*”. Los métodos descendentes implican la reducción de tamaño de la partícula por medios físicos o químicos, mientras que en los métodos ascendentes los nanomateriales se construyen a partir de entidades

más pequeñas, por ejemplo, uniendo átomos, moléculas o partículas de menor tamaño (Mittal *et al.*, 2013; Sandoval & Cercado, 2023).

El método idóneo para sintetizar los nanomateriales dependerá del uso que se les dará, en el caso de la modificación de electrodos con nanopartículas es importante considerar los parámetros requeridos para cada técnica, como el tiempo que se demora en el proceso, las condiciones ambientales, los equipos y los precursores necesarios; así como también la manera en que serán acoplados los nanomateriales sintetizados al electrodo, tomando en cuenta las interfases que este proceso genere, ya que cada interfase representa una resistencia a la transferencia de carga. En la Tabla 6 se muestra una comparativa entre diferentes técnicas de síntesis de nanomateriales.

**Tabla 6.** Métodos de síntesis de nanomateriales (Kolahalam *et al.*, 2019).

Método	Proceso	Equipo	Acoplamiento al electrodo
Sol-gel	Se parte de una solución con los precursores, la cual se hidroliza para formar un sistema coloidal (sol). Después se elimina el líquido sobrante del sol y se gelifica formándose el gel que pasará a ser secado para su solidificación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza.</li> <li>• Parrilla de calentamiento con agitación.</li> <li>• Horno.</li> </ul>	Mediante tintas, impregnación o electropolimerización.
Sonoquímica	El ultrasonido genera ondas ultrasónicas en la solución con los precursores, las cuáles producen un proceso de cavitación en donde las burbujas implotan generando condiciones de presión y temperatura tales que catalizan la reacción química de formación de los nanomateriales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza.</li> <li>• Sonicador.</li> </ul>	Mediante tintas o depositada directamente por ultrasonido.
Microondas	La solución de precursores se irradia con microondas en un horno especial, después se enfría y se centrifuga para separar el precipitado. El precipitado obtenido se lava con agua y etanol para posteriormente ser secado en un horno y obtener los nanomateriales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza.</li> <li>• Horno de microondas.</li> <li>• Centrifuga.</li> <li>• Horno.</li> </ul>	Mediante tintas, impregnación o electropolimerización.

Continuación de la tabla 6...

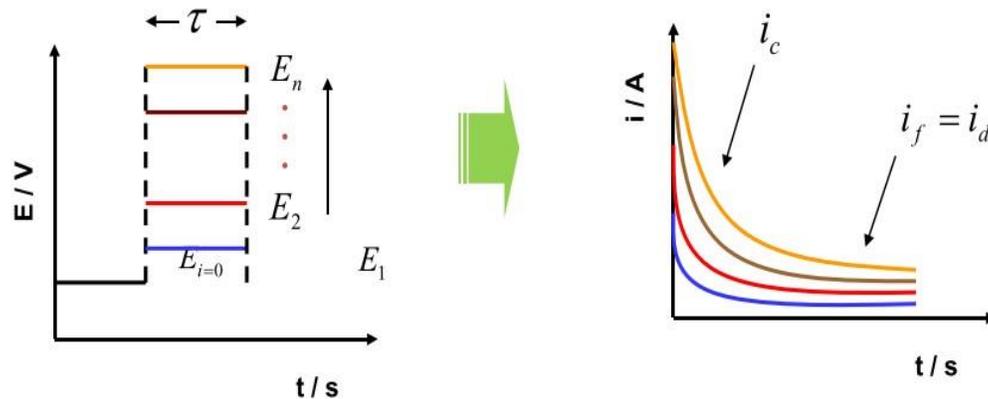
Método	Proceso	Equipo	Acoplamiento al electrodo
Depósito físico en fase vapor	Se genera vacío en la cámara, después se aplica una corriente eléctrica en el magnetrón para generar una diferencia de potencial y producir plasma. Los iones de plasma erosionan el objetivo y las partículas son transportadas hacia el sustrato, donde se depositan a manera de película sobre su superficie.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fundidora para preparar el objetivo.</li> <li>• Reactor de sputtering.</li> </ul>	Se deposita físicamente formando una película nanométrica.
Electrodepósitos	Se coloca la disolución con los precursores en una celda electrolítica, donde el electrodo de trabajo será el material que se desea modificar. Se realiza una cronoamperometría aplicando el potencial de reducción de la especie de interés para promover su electrodeposición directamente en el electrodo. También se puede hacer mediante varios ciclos de voltamperometría cíclica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza</li> <li>• Parrilla de calentamiento con agitación.</li> <li>• Fuente de poder o potencióstato.</li> </ul>	Se enlaza químicamente de manera directa por la electrodeposición.

## 6.5 Técnicas electroquímicas

Las técnicas de análisis electroquímico se llevan a cabo en una celda electroquímica donde se busca analizar el electrolito, el material de los electrodos o todo el sistema. Para su realización y control se requiere de un potencióstato o una fuente de poder, así como un electrodo de referencia. Estas técnicas se caracterizan por una alta sensibilidad, su gran selectividad y elevada precisión. A continuación, se describen algunas de ellas:

### 6.5.1 Cronoamperometría

La cronoamperometría es una técnica en donde se polariza el electrodo de trabajo con potencial fijo y se mide la respuesta que da el sistema en cuanto a la corriente que se obtiene con el paso del tiempo (Kissinger & Heineman, 1996); En la Figura 12 se observa la gráfica representativa de lo descrito.



**Figura 12.** Gráficas de entrada y salida de un sistema al realizar una cronoamperometría (Kissinger & Heineman, 1996).

Considerando un sistema donde  $Ox + ne^- \rightarrow Red$ , cuando  $C_0(0,t) \rightarrow 0$ ; la cronoamperometría se rige con la ecuación de Cottrell (Kissinger & Heineman, 1996):

$$\begin{array}{cc}
 \text{Disco plano} & \text{Electrodo esférico} \\
 i(t) = i_d(t) = \frac{nFAD_0^{1/2}C_0^*}{(\pi t)^{1/2}} = Kt^{1/2} & i(t) = i_d(t) = \frac{nFAD_0^{1/2}C_0^*}{(\pi t)^{1/2}} + \frac{nFAD_0C_0^*}{r_0} \quad (16)
 \end{array}$$

Donde:

I: corriente de celda, A.

n: número de electrones transferidos, mol e- o eq mol<sup>-1</sup>.

F: constante de Faraday = 96 485 C mol<sup>-1</sup> e- = 96 485 C eq<sup>-1</sup>.

A: área electroactiva, cm<sup>2</sup>.

D<sub>0</sub>: coeficiente de difusión de la especie redox, cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>.

C<sub>0</sub>: concentración de la especie redox, mol L<sup>-1</sup>.

$\frac{1}{2} \pi^{1/2}$  = constante de proporcionalidad, adim.

t: tiempo al momento de la medición, s.

K: constante para reacción controlada por difusión para un electrodo plano, adim.

La ecuación de Cottrell tiene las siguientes consideraciones:

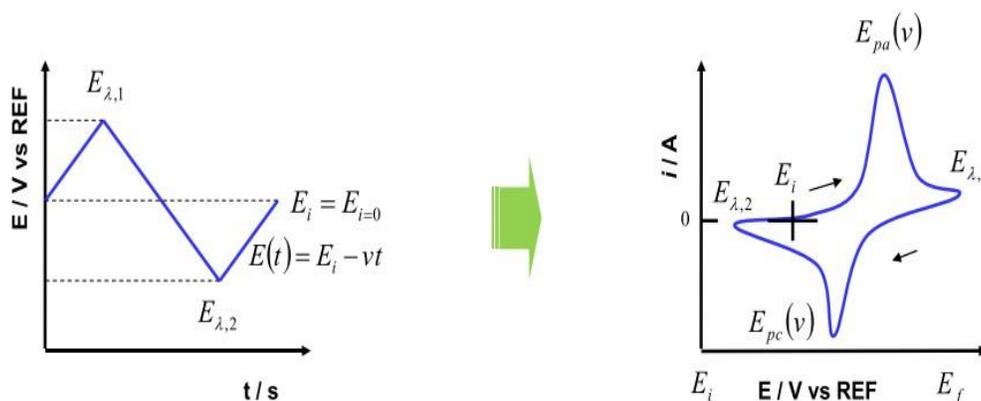
1. K puede variar por difusión no planar, convección en la celda, cambio lento del electrodo durante la aplicación de potencial y reacciones químicas acopladas.
2. Para cada caso, la variación de  $it^{1/2}$  es característica cuando se grafica respecto a t.

3. Para electrodos no planos como esferas y cilindros muestran un incremento de  $it^{1/2}$  conforme incrementa  $i$ .
4. La difusión planar se puede aproximar con la medición de corriente a tiempos breves.

La cronoamperometría se aplica para determinar los coeficientes de difusión y el potencial estándar de la reacción redox en estudio; obtener el área geométrica electroactiva conociendo el coeficiente de difusión de la especie redox empleada; calcular el número de electrones transferidos; medir la constante de velocidad heterogénea si la transferencia electrónica heterogénea de las especies redox con el electrodo es lenta (esto sucede en un sistema en el cual la transferencia electrónica es rápida, ya que la corriente después de la aplicación de potencial es necesariamente menor); cuantificar las reacciones químicas homogéneas, ya que la variación de  $it^{1/2}$  vs  $t$  es característica; así como para estudiar mecanismos de reacción, etc. (Kissinger & Heineman, 1996).

### 6.5.2 Voltamperometría cíclica

La voltamperometría cíclica es una técnica electroquímica en la que se aplica un barrido de potencial triangular al sistema a través del electrodo de trabajo, para polarizarlo de manera escalonada a diferentes potenciales a través del tiempo. Se mide la respuesta que tiene el sistema en cada potencial en cuanto a la corriente que entrega; ya sea positiva, de oxidación o negativa, de reducción (Kissinger & Heineman, 1996). En la Figura 13 se observa la gráfica  $E_i$  representativa de lo descrito.



**Figura 13.** Gráficas de entrada y salida de un sistema al realizar una voltamperometría cíclica (Kissinger & Heineman, 1996).

Esta técnica se rige por la ecuación de Randles Sëvcik, la cual varía dependiendo el tipo de sistema que se esté analizando (Kissinger & Heineman, 1996):

Sistema reversible	Sistema irreversible	
$i_p = (2.69 \times 10^5) n^{3/2} A D_0^{1/2} C_0^{1/2} v^{1/2}$	$i_p = (2.99 \times 10^5) A C_0^* D_0^{1/2} v^{1/2}$	(17)

Donde:

$i_p$ : corriente de pico, A.

$n$ : número de electrones transferidos, mol e- o eq mol<sup>-1</sup>.

$A$ : área electroactiva, cm<sup>2</sup>.

$D_0$ : coeficiente de difusión de la especie oxidada, cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>.

$C_0$ : concentración, mol cm<sup>-3</sup>.

$v$ : velocidad de barrido, V s<sup>-1</sup>.

$\alpha$ : coeficiente de transferencia de carga, adim.

Entre las aplicaciones que engloba esta técnica se encuentran: determinar coeficientes de difusión y potencial estándar de la reacción redox en estudio, detectar especies en altas concentraciones a través del coeficiente de difusión, conocer si un sistema es reversible, irreversible o cuasi reversible, obtener el área electroactiva conociendo el coeficiente de difusión de la especie redox empleada, estudiar mecanismos de reacción, etc. (Kissinger & Heineman, 1996).

### 6.5.3 Electrólisis

La electrólisis se lleva cabo en una celda electrolítica y se trata de la disociación de moléculas a través de la aplicación de una corriente eléctrica. Los electrodos de la celda son sumergidos en un electrolito y conectados a una fuente de poder, con lo que se polarizan uno de manera positiva y el otro negativamente. El electrodo negativo se conoce como cátodo y en su interfase se llevan a cabo reacciones de reducción, mientras que en el positivo ocurren las reacciones de oxidación y se conoce como ánodo. Por su parte, el electrolito sufre una disociación iónica en cationes y aniones, los cationes serán atraídos por el cátodo y los aniones por el ánodo (Chang & Goldsby, 2013). Esta técnica se basa en las leyes de Faraday (Chang & Goldsby, 2013):

- i. El peso de una sustancia depositada es proporcional a la intensidad de la corriente (o sea, al número de electrones por segundo) y al tiempo que ésta circula.
- ii. El peso de una sustancia depositada durante la electrólisis es proporcional al peso equivalente de la sustancia.

$$m = \frac{Q}{F} \cdot \frac{M}{z} \quad (18)$$

Donde:

m: masa de la sustancia producida en el electrodo, g.

Q: carga eléctrica total que pasó por la solución, C.

F: constante de Faraday, C mol<sup>-1</sup>.

M: masa molar de la sustancia, g mol<sup>-1</sup>.

z: número de valencia de la sustancia como ion en la solución, e<sup>-</sup>/ion.

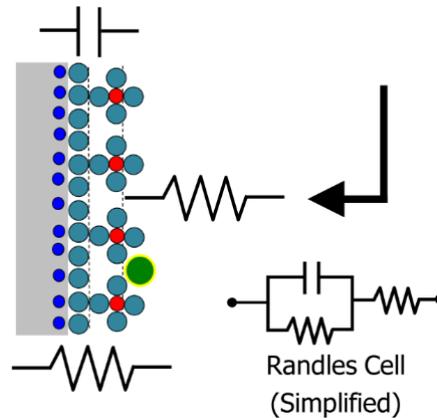
Cuanto mayor sea el peso equivalente de un elemento, tanto mayor será su peso, que se depositará durante la electrólisis. Este fenómeno se aplica actualmente en la galvanoplastia y la extracción y purificación de algunos metales. La electrólisis se aplica para la producción de elementos como el aluminio, litio, sodio, potasio y magnesio, así como de hidrógeno con múltiples usos en la industria: como combustible, en soldaduras, etc.; en la producción de compuestos como el cloro, hidróxido de sodio, clorato de sodio y clorato de potasio; en la electrometalurgia para separar el metal puro de otros compuestos, como el hidróxido de sodio es separado en sodio puro, oxígeno puro y agua; en la anodización para proteger los metales de la corrosión; en la galvanoplastia para evitar la corrosión de metales, creando una película delgada de un metal menos corrosible sobre otro metal (Kissinger & Heineman, 1996).

#### 6.5.4 Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE)

La impedancia es un tipo de resistencia que opera cuando se aplica una perturbación eléctrica alternante a un sistema bajo estudio, y se representa de la siguiente manera:

$$Z = \frac{V_{ac}}{I_{ac}} \quad (19)$$

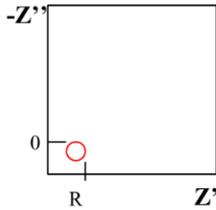
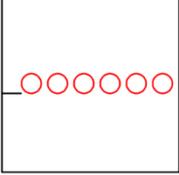
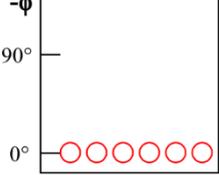
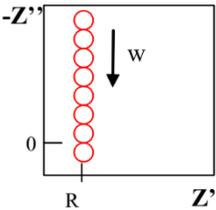
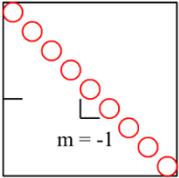
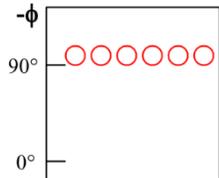
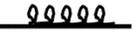
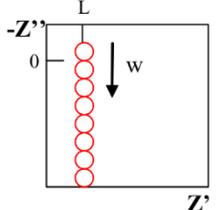
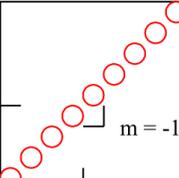
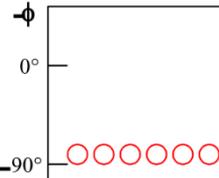
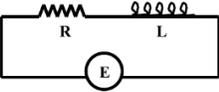
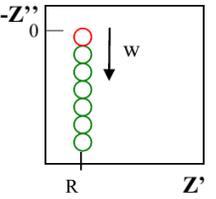
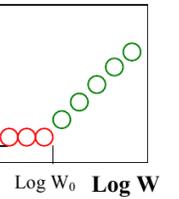
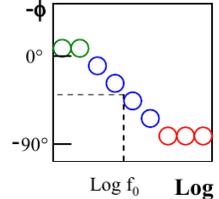
La EIE utiliza la frecuencia como variable (a diferencia de las técnicas convencionales que utilizan el tiempo), la cual puede interpretarse como una transformada del tiempo, es decir, se hace un cambio de dominio. En esta técnica se impone una perturbación periódica de pequeña amplitud en corriente alterna hacia el sistema y se mide su respuesta a diferentes frecuencias (Azzarello *et al.*, 2012). En EIE se representa cada parte de la celda electroquímica con un componente electrónico, de tal manera que se obtiene el circuito equivalente del sistema a analizar (Figura 14).



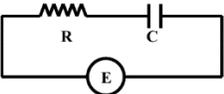
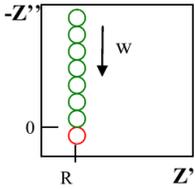
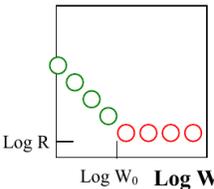
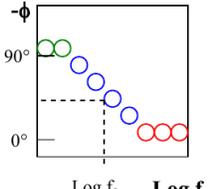
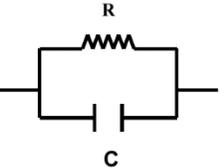
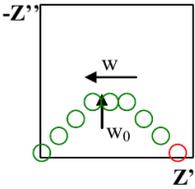
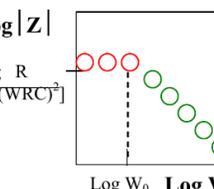
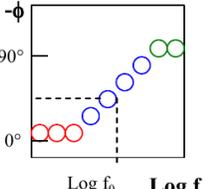
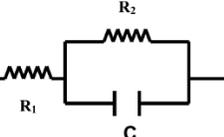
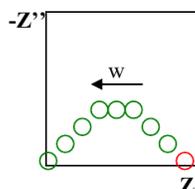
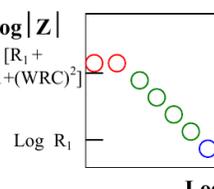
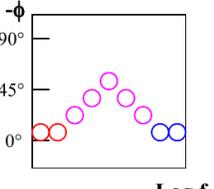
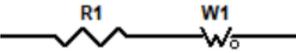
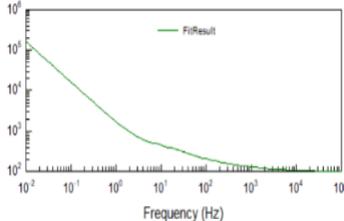
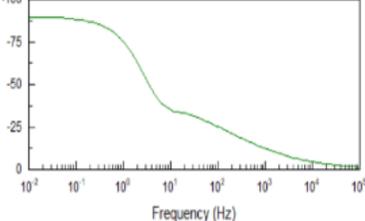
**Figura 14.** Representación de un circuito equivalente de Randles, tomada de (Azzarello *et al.*, 2012).

En las celdas electroquímicas cada elemento representa un proceso que se lleva a cabo entre el electrodo y la solución: la doble capa formada en la interfase electrodo-electrolito se representa como un elemento capacitivo (o de fase constante, según sea el sistema), debido a la acumulación de cargas que presenta; la resistencia que opone el electrolito al transporte iónico se representa con una resistencia, al igual que la resistencia electrónica del electrodo y que impide transferir electrones entre la interfase y el electrodo; por su parte, los procesos de difusión se representan con un componente de Warburg (Azzarello *et al.*, 2012). En la Tabla 7 se describe cada componente de la celda y su análogo en el circuito equivalente.

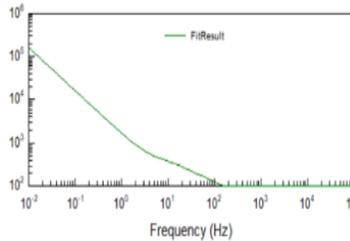
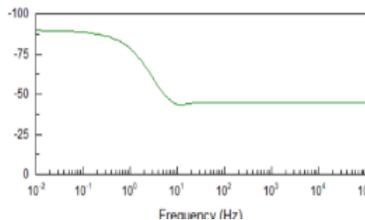
Tabla 7. Elementos en un circuito equivalente de EIE, (Azzarello et al., 2012).

Elemento	Nyquist	Bode-Módulo	Bode-Fase
<p><b>Resistencia</b></p>  <p><math>Z = R [\Omega]</math></p> <p>Fase <math>0^\circ</math></p>		<p><math>\text{Log }  Z </math></p>  <p><math>\text{Log } R</math></p> <p><math>\text{Log } w</math></p>	<p><math>-\phi</math></p>  <p><math>90^\circ</math></p> <p><math>0^\circ</math></p> <p><math>\text{Log } f</math></p>
<p><b>Capacitancia</b></p>  <p><math>Z(w) = -\frac{j}{w \cdot C} [F]</math></p> <p>Fase <math>-90^\circ</math></p>		<p><math>\text{Log }  Z </math></p>  <p><math>-\text{Log } C</math></p> <p><math>m = -1</math></p> <p><math>\text{Log } w</math></p> <p><math>Z(w) = \frac{1}{w \cdot C}</math></p> <p><math>\log  Z  = -\log w - \log C</math></p>	<p><math>-\phi</math></p>  <p><math>90^\circ</math></p> <p><math>0^\circ</math></p> <p><math>\text{Log } f</math></p> <p><math>\phi = \tan^{-1}\left(\frac{-j \cdot w^{-1} \cdot C^{-1}}{0}\right)</math></p> <p><math>\phi = \tan^{-1}(-\infty) = -90^\circ</math></p>
<p><b>Inductancia</b></p>  <p><math>Z = j w L [H]</math></p> <p>Fase <math>90^\circ</math></p>		<p><math>\text{Log }  Z </math></p>  <p><math>\text{Log } L</math></p> <p><math>m = +1</math></p> <p><math>\text{Log } w</math></p> <p><math>Z(w) = w \cdot L</math></p> <p><math>\log  Z  = \log w + \log L</math></p>	<p><math>-\phi</math></p>  <p><math>0^\circ</math></p> <p><math>-90^\circ</math></p> <p><math>\text{Log } f</math></p> <p><math>\phi = \tan^{-1}\left(\frac{j \cdot w \cdot L}{0}\right)</math></p> <p><math>\phi = \tan^{-1}(\infty) = 90^\circ</math></p>
		<p><math>\text{Log }  Z </math></p>  <p><math>\text{Log } R</math></p> <p><math>\text{Log } W_0</math> <math>\text{Log } W</math></p>	<p><math>-\phi</math></p>  <p><math>0^\circ</math></p> <p><math>-90^\circ</math></p> <p><math>\text{Log } f_0</math> <math>\text{Log } f</math></p>
<p>NOTA: Predominio de: L ( <span style="color: green;">○</span> ) y R ( <span style="color: red;">○</span> ). Combinación de L y R ( <span style="color: blue;">○</span> ).</p>			

Continuación de la tabla 7...

Elemento	Nyquist	Bode-Módulo	Bode-Fase
			
<p><b>NOTA:</b> Predominio de: C ( <span style="color: green;">○</span> ) y R ( <span style="color: red;">○</span> ). Combinación de C y R ( <span style="color: blue;">○</span> ).</p>			
			
<p><b>NOTA:</b> Predominio de: C ( <span style="color: green;">○</span> ) y R ( <span style="color: red;">○</span> ). Combinación de C y R ( <span style="color: blue;">○</span> ).</p>			
			
<p><b>NOTA:</b> Predominio de: R<sub>1</sub> ( <span style="color: blue;">○</span> ) y C ( <span style="color: green;">○</span> ). Combinación de R<sub>1</sub> y R<sub>2</sub> ( <span style="color: red;">○</span> ), así como R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> y C ( <span style="color: magenta;">○</span> ). En esta última combinación, se tendrían dos valores, de Z<sub>1</sub> = R<sub>1</sub>C y Z<sub>2</sub> = R<sub>2</sub>C.</p> <p>En el caso del diagrama de Bode-Fase, si R<sub>2</sub> &gt; 3R<sub>1</sub> no se observará pico porque el efecto de R<sub>1</sub> será insignificante y tendríamos un circuito RC en paralelo. En cambio, si R<sub>2</sub> &lt; 3R<sub>1</sub> el efecto de R<sub>1</sub> es importante y observaremos el pico.</p>			
	<p>---</p>		

Continuación de la tabla 7...

Elemento	Nyquist	Bode-Módulo	Bode-Fase
 <p data-bbox="227 430 341 472">Warburg</p>	---		

Para que la técnica de EIE sea válida debe cumplir con los siguientes criterios (Azzarello *et al.*, 2012):

- a. **Estabilidad.** Se aplica la perturbación alternante en un periodo donde se sabe que el sistema no cambia, con el fin de que el dominio del tiempo pueda ser transformado al de frecuencia.
- b. **Linealidad.** Consiste en aplicar perturbaciones pequeñas ( $0 < E < 10$  mV) de tal forma que  $I(w)$  siga siendo directamente proporcional a  $E(w)$  a través de  $Z(w)$ . Por tal motivo, para asegurar que tenemos una buena linealidad, lo primero que se tiene que hacer es variar  $E_{dc}$  en un intervalo de 0 a 10 mV y obtener espectros, en cada uno de ellos medir  $Z$  y el sistema será lineal si  $Z$  es constante para todos los espectros.
- c. **Causalidad.** La respuesta se debe sólo a la perturbación.
- d. **Valor finito.** El valor de impedancia debe ser finito en un intervalo infinito de frecuencias.

Entre las aplicaciones de esta técnica se encuentran el análisis de corrosión de materiales, de la rugosidad de los electrodos y de las propiedades de biopelículas o recubrimientos, así como la caracterización de las propiedades eléctricas de diversos tipos de polímeros.

---

# METODOLOGÍA

---

## 7. Metodología

### 7.1 Pretratamiento del electrodo de fieltro de grafito

El electrodo de fieltro de grafito fue tratado con ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ , 69.6%, J.T. Baker) haciendo referencia a lo descrito previamente por (Cai *et al.* 2013), con el fin de incrementar su área, es decir; su carácter hidrofílico al añadir grupos funcionales basados en oxígeno (-COH, -CO, -COOH) para favorecer la adhesión de las bacterias; así como para disminuir la resistencia interna para promover la transferencia electrónica entre los microorganismos y el ánodo.

Se realizaron dos lavados en un baño ultrasónico, el primero con acetona ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ ,  $\geq 99.5\%$ , Sigma Aldrich) por 10 min y el segundo con etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , 70%, Hycel), para remover compuestos orgánicos y grasos en la superficie del electrodo, después se dejaron secar en aire a temperatura ambiente. Posteriormente, el electrodo de fieltro de grafito se sumergió en ácido nítrico 50% v/v y se mantuvo en agitación durante cuatro horas a una temperatura de 80 °C, después se enjuagó con agua desionizada hasta que se obtuvo un pH neutro en el agua de lavado.

Para evaluar los resultados del tratamiento y verificar que se obtuvieron los resultados deseados en el mejoramiento de las propiedades de los electrodos, estos se analizaron electroquímicamente, antes y después del tratamiento, en una celda de tres electrodos utilizando una solución de ferrocianuro de potasio ( $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN}_6)] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , 98.5%, Karal) 10 mM en nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ , 99.0%, Karal) 100 mM como electrolito; donde el fieltro de grafito fungió como electrodo de trabajo; una malla de platino como electrodo auxiliar y un electrodo de plata cloruro de plata saturado (Ag/AgCl con KCl sat) como electrodo de referencia. En todas las pruebas electroquímicas se utilizó un potencióstato/galvanostato marca BioLogic modelo VSP-CHAS; voltaje a circuito abierto; voltamperometría cíclica, con una ventana de -0.6 a 1.0 V vs Ag/AgCl con KCl sat a diferentes velocidades de barrido, desde 5 mV/s hasta 80 mV/s; y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE), de 100 kHz a 10 mHz en el potencial de circuito abierto (PCA).

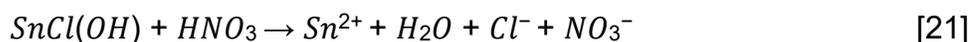
## 7.2 Síntesis *in situ* de nanopartículas de dióxido de estaño (SnO<sub>2</sub>)

El dióxido de estaño se sintetizó *in situ* mediante una electrodeposición con base en el procedimiento descrito por (Ko *et al.*, 2017). Se utilizó un sistema de tres electrodos, donde el fieltro de grafito tratado de 1 cm<sup>2</sup> actuó como electrodo de trabajo; una malla de platino de 2 x 5 cm soportada en un alambre de titanio fungió como electrodo auxiliar, la cual rodeó completamente al fieltro con el fin de lograr una síntesis uniforme en el electrodo y un electrodo de plata cloruro de plata saturado (Ag/AgCl con KCl sat.) como electrodo de referencia. El electrolito consistió en 50 mL de una solución 0.05 M de cloruro de estaño (SnCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, 98.0-103.0%, Karal) con 1 mL de ácido nítrico concentrado (HNO<sub>3</sub>, 69.6%, J.T. Baker).

Tomando en cuenta la teoría química, se tiene que al disolver la sal de cloruro de estaño en agua a una temperatura de 25 °C sus componentes reaccionan formando un ácido fuerte (ácido clorhídrico:HCl) y una base débil (hidróxido de estaño II: Sn(OH)<sub>2</sub>), según la siguiente reacción:



Considerando que no ocurre una disociación completa se sabe que también se encuentra en la solución el compuesto SnCl(OH), por lo que es necesario de añadir un ácido para neutralizar la base débil y liberar los iones de estaño a la solución. No se debe utilizar ácido clorhídrico porque la reacción se haría reversible, así que lo ideal es utilizar otro ácido como el nítrico, el cual sigue la siguiente reacción:



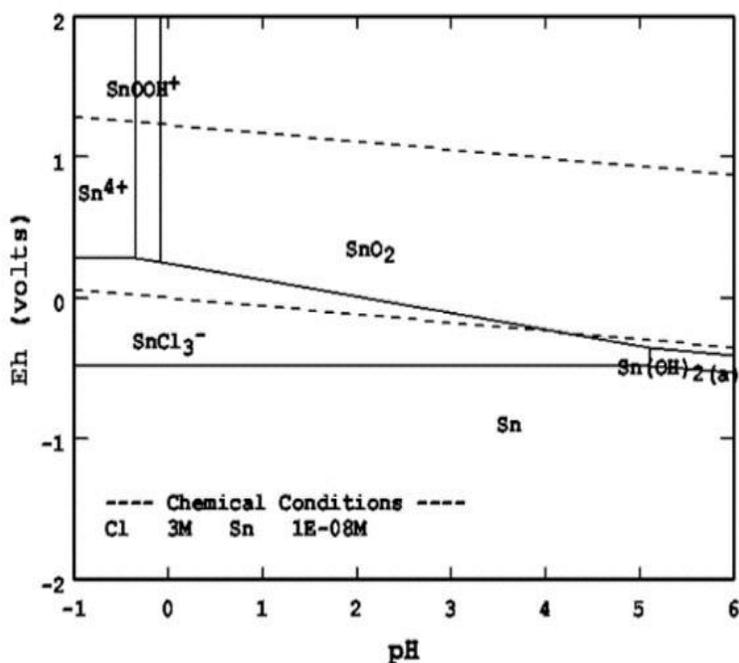
Una vez que los iones de estaño se encuentran libres en la solución, ésta se encuentra lista para utilizarse como el electrolito en la celda.

Previo a la electrosíntesis, la solución estuvo en agitación durante una hora a una temperatura de 60 °C; el electrodo auxiliar se limpió con acetona (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O, ≥99.5%, Sigma-Aldrich) y etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, 70%, Hycel), y después fue enjuagado con agua desionizada (H<sub>2</sub>O<sub>d</sub>); el alambre de titanio donde se soportó el fieltro de grafito se pulió mecánicamente para eliminar la película de óxido formada en la superficie y se limpió ultrasónicamente en acetona y etanol (Chen *et al.*, 2010). Posteriormente, se armó la celda electrolítica y se conectó al potenciostato para evaluar las condiciones del sistema al realizar el electrodeposición. El sistema se mantuvo a circuito abierto hasta que se

estabilizó y después se realizaron tres ciclos de una voltamperometría cíclica con una ventana de -1.0 V a 0.5 V vs Ag/AgCl con KCl sat y a una velocidad de barrido de 10 mV/s, para conocer el potencial de síntesis contra el electrodo de referencia utilizado; puesto que teóricamente el potencial estándar de reducción del ion estaño II es de -0.136 V vs SHE.



Se llevó a cabo una cronoamperometría durante una hora a una temperatura de 60 °C en el potencial de cruce determinado por los voltamperogramas. Finalmente, el material obtenido sometió un tratamiento térmico a 400 °C durante 30 minutos para garantizar la formación del óxido de estaño. Considerando estas condiciones y tomando en cuenta el diagrama de Pourbaix del estaño en presencia del cloruro y en un medio ácido (Figura 15); se puede observar que se obtendrán los compuestos deseados, en virtud de que se encuentra dentro del intervalo en el que se espera la electrodeposición (Chen *et al.*, 2010).



**Figura 15.** Diagrama de Pourbaix del estaño en un medio con cloruros. Tomado de (Groot & Van Der Linde, 2009).

Para referirse a los electrodos empleados en esta investigación se considera al fieltro de grafito sin tratamiento de limpieza como FG, al fieltro de grafito tratado, FGt y las nanopartículas de óxido de estaño sobre fieltro de grafito como SnO<sub>2</sub>/FG. Señalando que el FG sólo se utilizó como referencia para evaluar la diferencia del área electroactiva del FG sin tratar y el tratado.

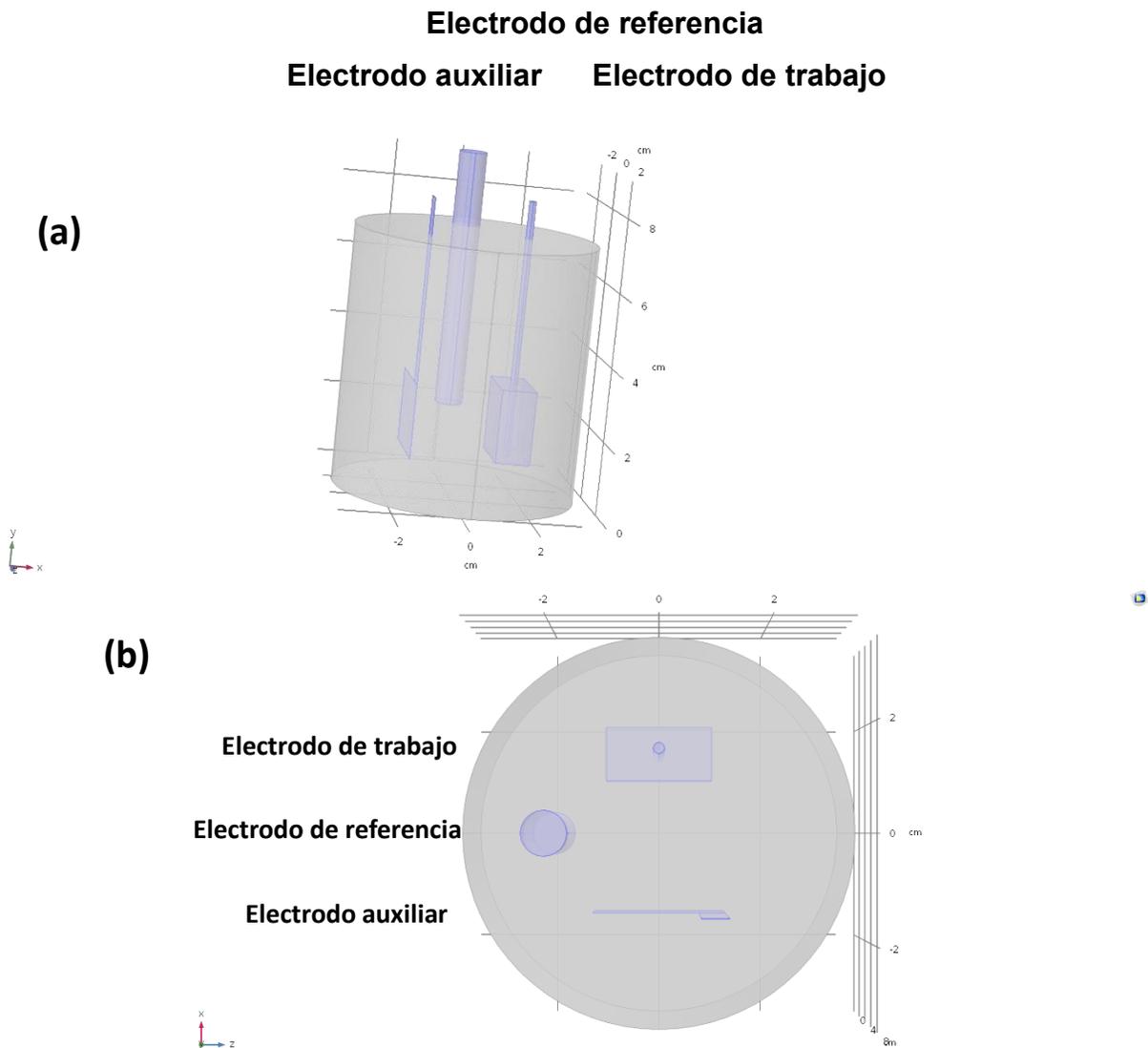
### **7.3 Obtención de microorganismos**

Los microorganismos se extrajeron en un lixiviado de composta de humus de lombriz. Se diluyó la composta en agua desionizada y se le adicionó cloruro de potasio (KCl, 99.9%, J.T. Baker) 50 mM y acetato de sodio (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>NaO<sub>2</sub>, 99.6%, J.T. Baker) 10 mM como sustrato. Después se mantuvo en agitación lenta durante 24 h a temperatura ambiente. Una vez completado el tiempo, se obtuvo el lixiviado mediante una percolación a través de tela porosa.

Para evaluar el comportamiento electrogénico de los microorganismos presentes en el lixiviado, se realizaron pruebas en una celda que contenía como electrolito 50 mL del lixiviado obtenido y 10 mL de una solución 10 mM de acetato de sodio como fuente de carbono; las celdas se mantuvieron en un baño de agua a una temperatura constante de 25 °C, siguiendo el procedimiento descrito por (Cercado *et al.*, 2013). Se utilizó un electrodo de 1 cm<sup>2</sup> de cara y 0.2 cm de espesor de fieltro de grafito pretratado con ácido nítrico como electrodo de trabajo, un electrodo de 2 x 2 x 0.5 cm de malla de acero inoxidable como electrodo auxiliar y como electrodo de referencia un electrodo de Ag/AgCl con KCl sat. Se realizaron pruebas a circuito abierto, de voltamperometría cíclica, espectroscopía de impedancia electroquímica y cronoamperometría. Con el fin de evaluar la respuesta del sistema y su comportamiento conforme se desarrolla la biopelícula. Asimismo, para verificar que los microorganismos son capaces de degradar la materia orgánica presente en el agua residual, se realizaron pruebas de degradación biológica. Se inoculó de igual manera 10 mL del lixiviado obtenido en 50 mL del agua residual y se mantuvo en un baño de agua a 25 °C para asemejar las mismas condiciones que las CEM a examinar.

## 7.4 Diseño y construcción de la celda de electrólisis microbiana

En el presente trabajo se utilizó una celda de vidrio con un volumen de 100 mL para construir un sistema de media celda conformada por fieltro de grafito ( $1 \text{ cm}^2 \times 0.2 \text{ cm}$ ) sujetado con un alambre de titanio, como electrodo de trabajo; malla de acero inoxidable ( $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 0.05 \text{ cm}$ ) como electrodo auxiliar y un electrodo de referencia de Ag/AgCl con KCl sat. (Ver Figura 16a). Los electrodos de trabajo y auxiliar se mantuvieron a una separación de 2.5 cm uno del otro y entre ellos se colocó el electrodo de referencia, en la Figura 16b se ilustra lo descrito con un diagrama de la vista superior de la celda. Como electrolito se inocularon 10 mL de lixiviado de composta en la celda que contenía 50 mL de agua residual obtenida de la industria aeronáutica.



**Figura 16.** a) Esquema general de la celda; b) Vista superior. Elaboración propia.



*Figura 17. Foto de dos celdas utilizadas.*

### **7.5 Pruebas en celda para determinar la eficiencia del sistema**

Los electrodos con y sin dióxido de estaño se caracterizaron electroquímicamente para conocer y determinar su funcionamiento durante la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual de la industria aeronáutica, mediante las pruebas en celda con las técnicas de: Potencial a circuito abierto, voltamperometría cíclica, voltamperometría de barrido lineal, cronoamperometría y espectroscopía de impedancia electroquímica.

En la voltamperometría se utilizó el fieltro de grafito como electrodo de trabajo para determinar el potencial en el que los microorganismos tienen una mejor respuesta, antes de llegar al estrés; cuando la diferencia de potencial entre el electrodo y los microorganismos sea tal, que se favorezca la transferencia de electrones. Con esto se comprueba que existe una reacción de oxidación y el efecto que tienen los microorganismos en ella, esto realizando la voltamperometría cíclica con el electrodo en presencia de microorganismos y otra sin ellos. De esta manera se estudió más a detalle la interacción que tienen los microorganismos y se descartaron influencias de oxidación electroquímica únicamente por la diferencia del potencial. El valor de densidad de corriente permite comparar la eficiencia del sistema bioelectroquímico frente a un sistema abiótico, donde una mayor corriente obtenida indica un mejor comportamiento.

Una vez definido el potencial de oxidación, se realizó una cronoamperometría a ese potencial para analizar la capacidad de los microorganismos para oxidar la materia

orgánica y transferir los electrones al electrodo. Con esta técnica se comparó la capacidad del sistema para oxidar la materia orgánica presente en el agua, ya que la corriente es proporcional a la cantidad de sustrato oxidado.

Al tratarse de un sistema bioelectroquímico se sabe que ni en los electrodos planos lisos ni en los electrodos porosos, el área total de la superficie activa es accesible para la colonización microbiana y las interacciones bioelectrocatalíticas, por lo tanto, el uso del área de superficie expuesta (BET, por sus siglas en inglés) puede no ser pertinente para el cálculo de la densidad de corriente en la mayoría de los casos. Por lo que es necesario hacer el cálculo del área bioelectroactiva en el sistema con los microorganismos, para ello se analizó cronocoulombimétricamente el sistema y se obtuvo la carga transferida, con lo que se hicieron los cálculos correspondientes para obtener el área bioelectroactiva de cada electrodo utilizando la ecuación de Anson (Sharma *et al.*, 2014):

$$Q_d = 2nF A_{ECSA}CD^{1/2}\pi^{1/2}t^{1/2} \quad [23]$$

Donde:

$Q_d$ : la carga que surge de la difusión de un componente electroactivo que llega a la superficie del electrodo y reacciona, C.

$n$ : número de electrones transferidos.

$F$ : constante de Faraday = 96 485 C mol<sup>-1</sup> e<sup>-</sup> = 96 485 C eq<sup>-1</sup>.

$A_{ECSA}$ : área de superficie real involucrada en la reacción electroquímica de difusión limitada, cm<sup>2</sup>.

$C$ : concentración del sustrato disponible para la transformación electroquímica, mol L<sup>-1</sup>.

$D$ : coeficiente de difusión del sustrato, cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>; y

$t$ : tiempo, s.

Por otro lado, se realizó un análisis de espectroscopía de impedancia electroquímica al sistema, para comparar el comportamiento de la CEM con electrodos sin recubrir y recubiertos de dióxido de estaño, con el fin de evaluar lo que ocurre en la interfase del electrodo respecto a la transferencia de electrones, procesos pseudocapacitivos, resistencias que presenta y a los procesos de difusión. Se analizaron los resultados con la ayuda de un circuito equivalente y un ajuste matemático.

## 7.6 Pruebas de calidad del agua

La valoración de la efectividad del sistema bioelectroquímico propuesto para tratar efluentes de la industria aeronáutica, se realizó mediante distintas pruebas de calidad del agua. Las técnicas realizadas fueron las referidas en las Normas Oficiales Mexicanas NOM-003-ECOL-1997 y NOM-001-ECOL-2021, considerando los límites máximos permisibles que en ellas se establecen para descargas nacionales (IMTA, 2021).

La caracterización del agua antes y después de los tratamientos realizados se enlista en la Tabla 8 así como el método llevado a cabo con las condiciones y el equipo utilizado. Todas fueron realizadas a temperatura ambiente (25-28°C aproximadamente) en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica ubicado en Pedro Escobedo, Querétaro, México a una altura sobre el nivel del mar de 1947 m.

**Tabla 8.** Pruebas de análisis del agua residual.

Determinación	Método	Condiciones	Equipo	Norma
Demanda química de oxígeno.	Reflujo abierto. Espectrofotometría. UV-VIS.	T= 150 °C, t= 2 h $\lambda_{\text{detección}}= 620 \text{ nm.}$	Reactor DQO marca HACH DBR200 Espectrofotómetro HACH DR1900	NMX-AA-030/1-SCFI-2012
Carbono Orgánico Total.	Combustión a alta temperatura con detección infrarrojo.	Curva de calibración de 50 a 500 mg L <sup>-1</sup> .	Analizador de COT Shimadzu modelo TOC-L	NMX-AA-187-SCFI-2021
pH, ORP y temperatura.	Electrométrico con pH-metro.	NA	Medidor multiparamétrico OAKTON PCD650 Potenciómetro marca Conductronic modelo PH140	NMX-AA-008SCFI-2016 NMX-AA-007-SCFI-2013
Conductividad	Conductimétrico	NA	Medidor de conductividad HACH Pocket Pro (HR)	NMX-AA-093-SCFI-2018

Continuación de la tabla 8...

Determinación	Método	Condiciones	Equipo	Norma
Espectroscopía de fluorescencia	Espectrofotométrico	$\lambda_{\text{excitación}} = 500$ a 200 nm slit= 5 nm $\lambda_{\text{emisión}} = 250$ a 600 nm	Espectrofotómetro de fluorescencia Agilent technologies modelo Cary Eclipse	NA
Espectroscopía UV-VIS	Espectrofotométrico	$\lambda = 190$ a 700 nm	Espectrofotómetro UV- Vis HACH modelo DR6000	NA

### 7.7 Caracterización de las nanopartículas de SnO<sub>2</sub> sintetizadas.

El electrodo de FGt y el de SnO<sub>2</sub>/FG se caracterizaron mediante (a) microscopia electrónica de barrido, para obtener información de la morfología, (b) análisis químico elemental para determinar los porcentajes de C, Sn y O presentes en la muestra, (c) Difracción de Rayos X para las fases y a través de Raman se hicieron los cálculos del tamaño de cristal de las nanopartículas. El equipo de MEB es Hitachi modelo SU3500, trabaja máximo a 30 kV, con filamento de tungsteno y tiene detectores de electrones secundarios y retrodispersados. El análisis elemental se realizó con un equipo marca Oxford, modelo Inca, la DRX utilizó un equipo Bruker, modelo D8 Advance, los resultados se analizaron con el software Match y en Raman se empleó DXR Thermo Scientific, laser 780 nm (14 mW-power) Photobleaching tima 2 min, objective 10x/0.25 BD, Scans 100, and Grating 144 lines/mm). Es importante mencionar que las muestras no requirieron de una preparación especial para su medición.

**Estas páginas fueron eliminadas debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021, y con el Artículo 116 de la Ley General de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021.**

## 9. Conclusiones

El agua residual de la industria aeronáutica con gran carga orgánica puede ser tratada mediante sistemas bioelectroquímicos en una celda de electrólisis microbiana, utilizando un consorcio de microorganismos proveniente del humus de lombriz. Con los resultados obtenidos se concluye:

- a. El pretratamiento de los electrodos de fieltro de grafito mejora las propiedades del electrodo al incrementar el área electroactiva un 156.5%, disminuir su resistencia a la transferencia de electrones un 98.6% y modificar su PCA al hacerlo 17.59% más negativo.
- b. Los microorganismos presentes en el lixiviado presentan características electrogénicas cuando se les añade como sustrato materia orgánica, pues disminuye la DQO y las resistencias del sistema debido a la formación de una biopelícula activa. Se descarta la contribución electroquímica debido a que es casi nula en el sistema.
- c. Las nanopartículas de SnO<sub>2</sub> soportadas sobre FG obtenidas por electrodeposición tienen adherencia a las fibras del FG y biocompatibilidad con los microorganismos del humus de lombriz al presentar actividad catalítica en la CEM.
- d. La difracción de rayos x no mostró picos bien definidos referidos al SnO<sub>2</sub>, no obstante, el análisis químico elemental cuantifica la presencia de Sn y O<sub>2</sub>. Y con el análisis Raman se comprobó la presencia de SnO<sub>2</sub> en el material obtenido.
- e. Las pruebas electroquímicas del FGt y SnO<sub>2</sub>/FG en el tratamiento del agua residual industrial mostraron poca remoción de la DQO: 63.1% y 38.9%, respectivamente. Mientras que el SnO<sub>2</sub>/FG en el sistema biótico obtuvo un 86.2±2.1% de remoción de la DQO y el FG sólo el 71.9±3.0%.
- f. La cuantificación de los elementos en los electrodos después de haber sido empleados en el tratamiento del agua residual en una CEM muestra que hay elementos quimi-sorbidos en la superficie del electrodo en cantidades atómicas menores al 6%.
- g. Se logró el objetivo general del proyecto. No obstante, el agua residual tratada aún no cumple con la normatividad para verterla al alcantarillado o en un río, y mucho menos para ser reutilizada en el proceso industrial ni para regar áreas verdes.

---

PERSPECTIVAS Y  
TRABAJO  
FUTURO

---

## 10. Perspectivas y Trabajo futuro

Considerando lo concluido en el presente proyecto, se deberán llevar a cabo las siguientes modificaciones para mejorar el sistema:

- a. Diseñar una tapa para la celda en donde los electrodos se encuentren fijos y estables a una distancia de 2 cm.
- b. Acondicionar los microorganismos a las condiciones del agua residual previo a su inoculación a la celda.
- c. Optimizar el proceso de síntesis de nanopartículas de SnO<sub>2</sub>.
- d. Analizar con cromatografía líquida de alta eficiencia acoplada a masa el agua después del tratamiento para cuantificar los contaminantes remanentes.
- e. Realizar pruebas con diferentes óxidos metálicos de menor costo.
- f. Acoplar otros sistemas electroquímicos al tratamiento del agua para degradar los contaminantes completamente.

---

# REFERENCIAS

---

## REFERENCIAS

---

- Airbus S.A.S. (2021). Airbus. Retrieved from <https://www.airbus.com/aircraft/how-is-an-aircraftbuilt.html>
- ASTM. (1998). Standard Practice for Liquid Penetrant Examination. In *Journal of Human Lactation* (Vol. 14, p. 147). <https://doi.org/10.1177/089033449801400218>
- Azzarello, E., Masi, E., & Mancuso, S. (2012). Electrochemical impedance spectroscopy. *Plant Electrophysiology: Methods and Cell Electrophysiology*, 205–223. [https://doi.org/10.1007/9783-642-29119-7\\_9](https://doi.org/10.1007/9783-642-29119-7_9)
- Bard, A., Inzelt, G., & Scholz, F. (2008). *Electrochemical Dictionary*. Springer.
- Barhoum, A., Shalan, A. E., El-hout, S. I., Ali, G. A. M., Abdelbasir, S. M., Samy, E., ... Pal, K. (2020). Handbook of Nanofibers. *Handbook of Nanofibers*, 8–10. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42789-8>
- Bi, L., Ci, S., Cai, P., Li, H., & Wen, Z. (2018). One-step pyrolysis route to three-dimensional nitrogen doped porous carbon as anode materials for microbial fuel cells. *Applied Surface Science*, 427, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.030>
- Bi, Q., Zhang, Z., Sun, Y., Jiang, S., Wang, Z., Li, Y., & Xue, J. (2021). Preparation and performance of highly active and long-life mesopore Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb electrodes for electrochemical degradation of phenol. *Journal of Alloys and Compounds* 889, 161657.
- Bielicka-Daszkiwicz, K., Krawczyk, P., & Nowick, K. (2012). Examination of benzoquinone electrooxidation pathway as crucial step of phenol degradation process. *Electrochimica Acta* 80, 22-26.
- Cai, H., Wang, J., Bu, Y., & Zhong, Q. (2013). Treatment of carbon cloth anodes for improving power generation in a dual-chamber microbial fuel cell. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 88(4), 623–628. <https://doi.org/10.1002/jctb.3875>
- Cercado, B., Byrne, N., Bertrand, M., Pocaznoi, D., Rimboud, M., Achouak, W., & Bergel, A. (2013). Garden compost inoculum leads to microbial bioanodes with potential-independent characteristics. *Bioresource Technology*, 134, 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.123>

- Chang, R., & Goldsby, K. A. (2013). *Química* (11th ed.). México: Mc Graw Grill Companies.
- Chen, D., Shen, J., Jiang, X., Mu, Y., Ma, D., Han, W., & Wang, L. (2017). Fabrication of polypyrrole/bMnO<sub>2</sub> modified graphite felt anode for enhancing recalcitrant phenol degradation in a bioelectrochemical system. *Electrochimica Acta* 244, 119-128.
- Chen, J.-Y., Chueh, C.-C., Zhu, Z., Chen, W.-C., & Jen., A. K.-Y. (2017). Low-temperature electrodeposited crystalline SnO<sub>2</sub> as an efficient electron-transporting layer for conventional perovskite solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 164, 47-55.
- Chen, W., Westerhoff, P., Leenheer, J., & Booksh, K. (2003). Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter. *Environ. Sci. Technol*, 57015710.
- Chen, X., Liang, J., Zhou, Z., Duan, H., Li, B., & Yang, Q. (2010). The preparation of SnO<sub>2</sub> film by electrodeposition. *Materials Research Bulletin*, 45(12), 2006–2011. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2010.07.029>
- Choudhury, P., Ray, R. N., Bandyopadhyay, T. K., Basak, B., Muthuraj, M., & Bhunia, B. (2021). Process engineering for stable power recovery from dairy wastewater using microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(4), 3171–3182. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.152>
- de Bruyn, W., Chang, D., Bui, T., Hok, S., & Clark, C. (2018). Photochemical degradation of oil products in seawater monitored by 3D excitation emission matrix (EEM) fluorescence spectroscopy: implications for colored dissolved organic matter (CDOM) studies. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 34777–34787.
- Duan, T., Chen, Y., Wen, Q., Yin, J., & Wang, Y. (2016). Three-dimensional macroporous CNT-SnO<sub>2</sub> composite monolith for electricity generation and energy storage in microbial fuel cells. *RSC Advances*, 6(64), 59610–59618. <https://doi.org/10.1039/c6ra11869k>
- Ferretto, N., Tedetti, M., Guigue, C., Mounier, S., Redon, R., & Goutx, M. (2014). Identification and quantification of known polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides in complex mixtures using fluorescence excitation–emission matrices and

parallel factor analysis. *Chemosphere*, 107, 344-353. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.087>

Figueroa Hernandez, E. (2023). Tratamiento bio-electroquímico del agua residual alcalina del proceso de reparaciones de la industria aeronáutica. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.

Flimban, S.G.A., Ismail, I.M.I., Kim, T., Oh, S.-E. (2019). Review Overview of Recent Advancements in the Microbial Fuel Cell from Fundamentals to Applications: *Energies*, 12(339), 1–20.

Füeg, M., Borjas, Z., Estevez-Canales, M., Esteve-Núñez, A., Pobelov, I. V., Broekmann, P., & Kuzume, A. (2019). Interfacial electron transfer between *Geobacter sulfurreducens* and gold electrodes via carboxylate-alkanethiol linkers: Effects of the linker length. *Bioelectrochemistry*, 126, 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2018.11.013>

Gnana Kumar, G., Kirubaharan, C. J., Udhayakumar, S., Ramachandran, K., Karthikeyan, C., Renganathan, R., & Nahm, K. S. (2014). Synthesis, structural, and morphological characterizations of reduced graphene oxide-supported polypyrrole anode catalysts for improved microbial fuel cell performances. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2(10), 2283–2290. <https://doi.org/10.1021/sc500244f>

Groot, D. R., & Van Der Linde, J. A. N. (2009). The processing of eWaste. Part 2. The electrochemical leaching behaviour of a metallic alloy derived from waste printed circuit boards. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 109(12), 701–707.

Haipeng Zhou, Yi Shen, Jingyu Xi, Xinping Qiu, Liquan Chen. (2016). ZrO<sub>2</sub>-Nanoparticle-Modified Graphite Felt: Bifunctional Effects on Vanadium Flow Batteries. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, 15369-15378.

Heidrich, E. S., Dol, J., Wade, M. J., Sloan, W. T., Quince, C., & Curtis, T. P. (2018). Bioelectrochemistry Temperature, inocula and substrate: Contrasting electroactive consortia , diversity and performance in microbial fuel cells, 119, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2017.07.006>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2021). Actualización de la NOM 001 SEMARNAT 2021: hacia una mejor calidad en los cuerpos de agua.

- Karthick, S., & Haribabu, K. (2020). Bioelectricity generation in a microbial fuel cell using polypyrrole-molybdenum oxide composite as an effective cathode catalyst. *Fuel*, 275(October 2019), 117994. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117994>
- Khan, N., Anwer, A. H., Ahmad, A., Sabir, S., & Khan, M. Z. (2020). Investigating microbial fuel cell aided bio-remediation of mixed phenolic contaminants under oxic and anoxic environments. *Biochemical Engineering Journal*, 155, 107485. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107485>
- Kissinger, P. T., & Heineman, W. R. (1996). *Laboratory Techniques in Electroanalytical Chemistry* (2nd ed.). New York: Marcel Dekker, Inc.
- Ko, Y., Kim, Y. R., Jang, H., Lee, C., Kang, M. G., & Jun, Y. (2017). Electrodeposition of SnO<sub>2</sub> on FTO and its Application in Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells as an Electron Transport Layer. *Nanoscale Research Letters*, 12:498. DOI 10.1186/s11671-017-2247-x
- Koch, C., Aulenta, F., Schröder, U., & Harnisch, F. (2016). Microbial electrochemical technologies: Industrial and environmental biotechnologies based on interactions of microorganisms with electrodes. In *Comprehensive Biotechnology* (Third Edit, Vol. 6, pp. 545–563). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09699-8>
- Kolahalam, L. A., Kasi Viswanath, I. V., Diwakar, B. S., Govindh, B., Reddy, V., & Murthy, Y. L. N. (2019). Review on nanomaterials: Synthesis and applications. *Materials Today: Proceedings*, 18, 2182–2190. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.371>
- Kracke, F., Vassilev, I., & Krömer, J. O. (2015). Microbial electron transport and energy conservation - The foundation for optimizing bioelectrochemical systems. *Frontiers in Microbiology*, 6(JUN), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00575>
- Krawczyk, P., Rozmanowski, T., Gurzęda, B., & Osińska, M. (2016). Process of phenol electrooxidation on the expanded graphite electrode accompanied by the in-situ anodic regeneration. *Journal of Electroanalytical Chemistry* (Lausanne, Switzerland), 775, 228–234.
- Kruse, P. (2018). Review on water quality sensors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51.
- Lehr, J. H., & Keeley, J. (2005). Domestic, Municipal, and Industrial Water Supply and Waste Disposal. *Water Encyclopedia*. Retrieved from

[http://www.eng.auth.gr/~pmavros/pubs/pdf\\_books/2005\\_mavros\\_book\\_mixing\\_water\\_encyclopedia.pdf](http://www.eng.auth.gr/~pmavros/pubs/pdf_books/2005_mavros_book_mixing_water_encyclopedia.pdf)

Li, Z., Chang, T., Yun, G., & Jia, Y. (2012). Coating single walled carbon nanotube with SnO<sub>2</sub> and its electrochemical properties. *Powder Technology*, 306-310.

MacDermid Envio Solutions. (2019). YouTube. Retrieved from Aerospace Wastewater Treatment System.DMP Corporation: [https://www.youtube.com/watch?v=UvAzPtyvZK4&ab\\_channel=MacDermidEnvioSolutions](https://www.youtube.com/watch?v=UvAzPtyvZK4&ab_channel=MacDermidEnvioSolutions)

MacDermid Envio Solutions. (2021). MacDermid Envio. Retrieved from <https://www.macdermidenvio.com/industries/aerospace-defense-manufacturing>

Madigan, M., Martinko, J., Dunlap, P., & Clark, D. (2009)a. Brock. *Biología de los microorganismos (duodécima)*. Madrid, España: Pearson Education S.A.

Mehdinia, A., Ziaei, E., & Jabbari, A. (2014). Facile microwave-assisted synthesized reduced graphene oxide/tin oxide nanocomposite and using as anode material of microbial fuel cell to improve power generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(20), 10724–10730. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.008>

Mehdinia, A., Ziaei, E., & Jabbari, A. (2014)b. Multi-walled carbon nanotube/SnO<sub>2</sub> nanocomposite: A novel anode material for microbial fuel cells. *Electrochimica Acta*, 130, 512–518. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.03.011>

Mittal, A. K., Chisti, Y., & Banerjee, U. C. (2013). Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. *Biotechnology Advances*, 31(2), 346–356. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.01.003>

Mostofa, K., Liu, C., Yoshioka, T., Vione, D., Zhang, Y., & Sakugawa, H. (2013). Fluorescent Dissolved Organic Matter in Natural Waters, in: Mostofa, K.M.G., Yoshioka, T., Mottaleb, A., Vione, D. (Eds.). *Photobiogeochemistry of Organic Matter: Principles and Practices in Water Environments*, 190, 429-559. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32223-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32223-5_6)

Nagarani, S., Sasikala, G., Satheesh, K., Yuvaraj, M., & Jayavel., R. (2018). Synthesis and characterization of binary transition metal oxide/reduced graphene oxide

- nanocomposites and its enhanced electrochemical properties for supercapacitor applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29:11738–11748.
- NMX-AA-008-SCFI-2016. (2016). Análisis de Agua- Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. *Diario Oficial de La Federación*, 1–21.
- NMX-AA-030/1-SCFI-2012. (2012). ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS. - MÉTODO DE PRUEBA - PARTE 1 - MÉTODO DE REFLUJO ABIERTO - (CANCELA A LA NMX-AA-030-SCFI-2001). *Diario Oficial de La Federación*.
- NMX-AA-034-SCIFI-2015. (2015). NMX-AA-034-SCIFI-2015 Análisis De Agua - Medición De Sólidos Y Sales Disueltas En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas – Método De Prueba. *Diario Oficial de La Federación*, 16. Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
- Pérez, A. (2019). Ingeniería básica de una planta de depuración de aguas residuales en la industria aeronáutica. Universidad de Sevilla.
- Perkampus, H. H., Grinter, H. C., & Threlfall, T. L. (2013). *UV-VIS Spectroscopy and Its Applications*. Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=6ejwCAAQBAJ>
- Peralta, J., Mejia, S., Godínez, L., & Meas-Vong, Y. (2005). Fenton and electrochemical approaches for water purification technologies. *Application of Analytical Chemistry in Environmental Research*, 101-130.
- Qing-Chun Jiang, Jin Li, Yu-Jie Yang, Yu-Jie Ren, Lei Dai, Jia-Yi Gao, Ling Wang, Jia-Ye Ye, Zhang-Xing He. (2023). Ultrafine SnO<sub>2</sub> *in situ* modified graphite felt derived from metal-organic framework as a superior electrode for vanadium redox flow battery. *Rare Met.* 42(4):1214-1226
- Qiu, R., Zhang, B., Li, J., Lv, Q., Wang, S., & Gu, Q. (2017). Enhanced vanadium (V) reduction and bioelectricity generation in microbial fuel cells with biocathode. *Journal of Power Sources*, 359, 379–383. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.05.099>
- Sadale, S., & Patil, P. (2004). Nucleation and growth of bismuth thin films onto fluorine-doped tin oxide-coated conducting glass substrates from nitrate solutions. *Solid State Ionics*, 167(3-4), 273-283.

- Saleh, T. A. (2020). Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicities. *Environmental Technology and Innovation*, 20, 101067.  
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101067>
- Sánchez, C. M., Bustos, E. B., & González, A. S. (2022). Chapter 28. Innovations in Environmental Biotechnology. Springer Nature.
- Sandoval-González, A; Bustos, E. & Martínez-Sánchez C. (2022). Basic and advanced considerations of energy devices. Springer Nature Switzerland, 63-80.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-03098021-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-03098021-4_4)
- Sandoval-González, A.; & Cercado, B. (2023). "Synthesis and application of nanocomposite material for microbial fuel cells", *Advanced Nanomaterials and nanocomposites for bioelectrochemical systems. Micro & Nano Technologies Series Elsevier. Cap 4* 81-108.
- Sarmin, S., Ethiraj, B., Islam, M. A., Ideris, A., Yee, C. S., & Khan, M. M. R. (2019). Bio-electrochemical power generation in petrochemical wastewater fed microbial fuel cell. *Science of the Total Environment*, 695, 133820.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133820>
- Sekar, A. D., Jayabalan, T., Muthukumar, H., Chandrasekaran, N. I., Mohamed, S. N., & Matheswaran, M. (2019). Enhancing power generation and treatment of dairy waste water in microbial fuel cell using Cu-doped iron oxide nanoparticles decorated anode. *Energy*, 172, 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.102>
- Sharma, M., Bajracharya, S., Gildemyn, S., Patil, S.A., Alvarez-Gallego, Y., Pant, Rabaey, K., Dominguez Benetton, X. (2014). A critical revisit of the key parameters used to describe microbial electrochemical systems. *Electrochimica Acta*, 140, 191–208.  
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.02.111>
- Sheeraz Mehboob, Ghulam Ali, Hyun-Jin Shin, Jinyeon Hwang, Saleem Abbas, Kyung Yoon Chung, Heung Yong Ha. (2018). Enhancing the performance of all-vanadium redox flow batteries by decorating carbon felt electrodes with SnO<sub>2</sub> nanoparticles. *Applied Energy*. 229. 910-921
- Simin Tazikeh, Amir Akbari, Amin Talebi, Emad Talebi. (2014). Synthesis and characterization of tin oxide nanoparticles via the Co-precipitation method. *Materials Science-Poland*, 32(1), 98-101.

- Song, J., Sasaki, D., Sasaki, K., Kato, S., Kondo, A., Hashimoto, K., & Nakanishi, S. (2016). Comprehensive metabolomic analyses of anode-respiring *Geobacter sulfurreducens* cells: The impact of anode-respiration activity on intracellular metabolite levels. *Process Biochemistry*, 51(1), 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2015.11.012>
- Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento. (2007). Operación y mantenimiento de plantas de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (Vol. 46).
- Sun, C., Sun, J., Qiu, F., Li, W., Chang, Z., & Zhang., L. (2018). The fluorescent property of 3-[(2-hydroxy-1-naphthyl) methylideneamino]benzoic acid and its application as fluorescent chemosensor for Hg<sup>2+</sup> and Al<sup>3+</sup> ions. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 188, 1-7.
- Tiwari, A. K., Jain, S., Mungray, A. A., & Mungray, A. K. (2020). SnO<sub>2</sub>:PANI modified cathode for performance enhancement of air-cathode microbial fuel cell. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 103590. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103590>
- Uskova, I. K., & Bulgakova, O. N. (2014). Cyclic Voltammetry of Phenol. *Journal of Analytical Chemistry*, 69(6), 542–547.
- Wang, X., Qin, Y., Qin, J., Yang, Y., Qi, T., Chen, R., . . . Xiao., K. (2021). The interaction laws of atmospheric heavy metal ions and water-soluble organic compounds in PM<sub>2.5</sub> based on the excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123497.
- Wang, Y., Wen, Q., Chen, Y., & Yin, J. (2016). Enhanced Performance of a Microbial Fuel Cell with a Capacitive Bioanode and Removal of Cr (VI) Using the Intermittent Operation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, (VI). <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2173-x>
- Xinyu Li, Chengde Huang. (2020). A new modification method for graphite felt electrodes in a MV/4HO-TEMPO flow battery. *RSC Adv.*, 10, 6333-6341

- Yang Su, Hai-lin Ren, Shuai Zhao, Na Chen, Xiao-min Wang, Yu-xing Zhao, Yu Bai, Cheng-wei Li. (2023). Improved performance of iron-chromium flow batteries using SnO<sub>2</sub>-coated graphite felt electrodes. *Ceramics International* 49(5) 7761-7767.
- Yaqoob, A. A., Nasir, M., Ibrahim, M., & Rafatullah, M. (2020). Recent Advances in Anodes for Microbial Fuel Cells: An Overview, 1–28. <https://doi.org/10.3390/ma13092078>
- Zhang, B., Zhao, H., Shi, C., Zhou, S., & Ni, J. (2009). Simultaneous removal of sulfide and organics with vanadium(V) reduction in microbial fuel cells. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84(12), 1780–1786. <https://doi.org/10.1002/jctb.2244>
- Zhang, L., Shao, Z.-G., Wang, X., Yu, H., Liu, S., Yi, B. (2013). The characterization of graphite felt electrode with Surface modification for H<sub>2</sub>/Br<sub>2</sub> fuel cell. *J Power Sources*. 242 15-22.
- Zhu, X., Gupta, K., Bersani, M., Darr, J. A., Shearing, P. R., & Brett, D. J. L. (2018). Electrochemical reduction of carbon dioxide on copper-based nanocatalysts using the rotating ring-disc electrode. *Electrochimica Acta*, 283, 1037–1044. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.07.025>
- Zou, L., Qiao, Y., Wu, X. S., Ma, C. X., Li, X., & Li, C. M. (2015). Synergistic effect of titanium dioxide nanocrystal/reduced graphene oxide hybrid on enhancement of microbial electrocatalysis. *Journal of Power Sources*, 276, 208–214. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.127>

---

# ANEXOS

---

# ANEXOS

## Anexo 1. Tablas de límites permisibles en el agua según la NOM-001-SEMARNAT-2021.

### Límites Permisibles

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifica)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
										P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Grasas y Aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21
Sólidos Suspendedos Totales	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28
Demanda Química de Oxígeno	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84
Carbono Orgánico Total*	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21
Nitrógeno Total	25	30	35	15	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30
Fósforo Total	15	18	21	5	10	15	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15
Huevos de Helmintos (huevos/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1								
Escherichia coli, (NMP/100 ml)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200
Enterococos fecales* (NMP/100 ml)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200
pH (UpH)	6-9																	
Color verdadero	Longitud de onda									Coeficiente de absorción espectral máximo								
	436 nm									7,0 m <sup>-1</sup>								
	525 nm									5,0 m <sup>-1</sup>								
	620 nm									3,0 m <sup>-1</sup>								
Toxicidad aguda (UT)	2 a los 15 minutos de exposición																	
<p>N.A: No Aplica                      P.M: Promedio Mensual                      P.D: Promedio Diario                      V.I: Valor Instantáneo                      NMP: Número más probable                      UpH: Unidades de pH                      UT: Unidades de Toxicidad                      * Si Cloruros es menor a 1000 mg/L se analiza y reporta DQO.                      * Si Cloruros es mayor o igual a 1000 mg/L se analiza y reporta COT.                      * Si la conductividad eléctrica menor a 3500 µS/cm se analiza y reporta E. coli.                      * Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 µS/cm se analiza y reporta Enterococos fecales.                      Las determinaciones de Conductividad eléctrica y de Cloruros no requieren la acreditación y aprobación de la entidad correspondiente.</p>																		

### Límites Permisibles para Metales y Cianuros

Parámetros (miligramos por litro)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
										P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
Arsénico	0,2	0,3	0,4	0,1	0,15	0,2	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
Cadmio	0,2	0,3	0,4	0,1	0,15	0,2	0,2	0,3	0,4	0,05	0,075	0,1	0,1	0,15	0,2	0,05	0,075	0,1
Cianuro	1	2	3	1	1,5	2	2	2,50	3	2	2,5	3	1	1,50	2	1	1,5	2
Cobre	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
Cromo	1	1,25	1,5	0,5	0,75	1	1	1,25	1,5	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1
Mercurio	0,01	0,015	0,02	0,005	0,008	0,01	0,01	0,015	0,02	0,005	0,008	0,01	0,005	0,008	0,01	0,005	0,008	0,01
Níquel	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Plomo	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4
Zinc	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Parámetros medidos de manera total	P.M: Promedio Mensual P.D: Promedio Diario V.I: Valor Instantáneo																	

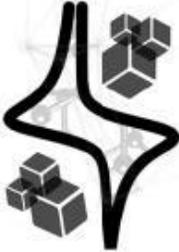
**Anexo 2.** Tablas de límites permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal según la NOM-002-ECOL-1996

<b>LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES</b>			
<b>PARÁMETROS</b> (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	<b>Promedio Mensual</b>	<b>Promedio Diario</b>	<b>Instantáneo</b>
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1.0	1.5	2.0
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

---

# CONSTANCIAS

---



Capítulo estudiantil  
SMMater – CIDETEQ

OTORGA LA PRESENTE

# CONSTANCIA

A

## Nadia Alexandra López García

---

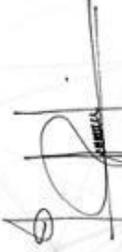
Por su participación como **ASISTENTE** en el 2do Simposio Anual de Materiales  
**“Energía, Industria y Medio Ambiente”**  
Celebrado los días 27 y 28 de mayo del 2021, en modalidad remota en la plataforma Zoom.



**Dra. Julieta Torres González**  
Directora General de CIDETEQ.



**Dr. J. Manuel Mora Hernández**  
Coordinador de Capítulos Estudiantiles de la SMMater.



**M. en E.Q. Jesús A. Pérez García**  
Presidente del Capítulo Estudiantil SMMater – CIDETEQ.



**CONACYT**  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



**CIDETEQ**  
cideteq



Sociedad Mexicana  
de Materiales A.C.



Capítulo estudiantil  
SMMater – CIDETEQ

Medellín, 29 de octubre de 2021

A QUIEN INTERESE

Informamos que la estudiante NADIA ALEXANDRA LÓPEZ GARCÍA identificada con Cédula profesional N°11815195, asistió y participo de la capacitación PRESENTACIÓN ORAL DE DATOS CIENTÍFICOS, realizada los días 30 de septiembre, 5, 7, 12, 14, 19, 21 y 26 de octubre, para el segundo semestre de 2021, con una duración de 16 horas.

Atentamente,



MARIO VICTOR VÁZQUEZ CEBALLOS  
Docente

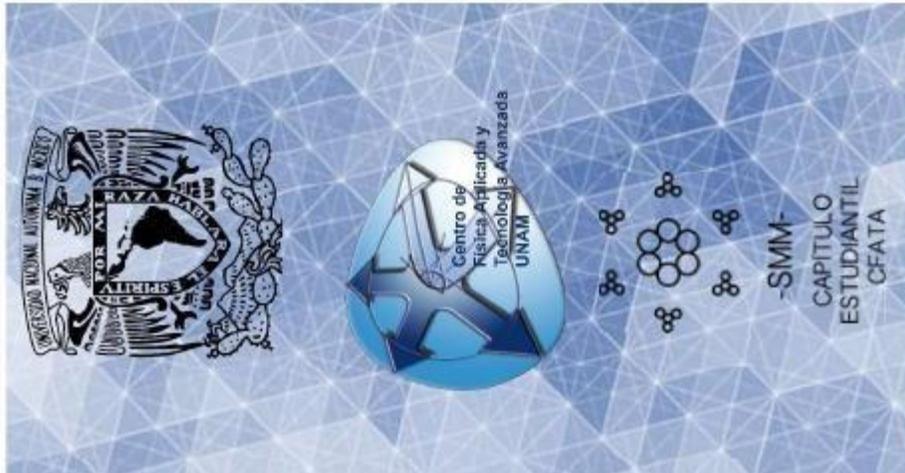


LUIS FELIPE GONZÁLEZ OSSA  
Coordinador de Extensión y  
Proyectos Especiales de Innovación

Programa de Educación no formal que pertenece a la Universidad de Antioquia aprobada por el Decreto 1297 del 30 mayo de 1964. Código ICFES 1201. Registro de Alta Calidad. Re acreditación Institucional del Ministerio de Educación Nacional Resolución 16516 del 14 de diciembre de 2012. NIT UdeA 890980040-8.

**Centro de Extensión - Semilleros**

Ciudad Universitaria: Calle 67 N.º 53-108 Bloque 6 oficina 109 • Recepción de correspondencia: Calle 70 N.º 52-21 Conmutador: 219 83 32 • Teléfonos: 219 56 48 • Fax: 219 56 47 • Apartado: 1226  
• Correo electrónico: semilleroscen@udea.edu.co • Medellín, Colombia



# Capitulo Estudiantil CFATA UNAM de la Sociedad Mexicana de Materiales

Otorga la siguiente constancia a:

**Nadia Alexandra López García**

Por completar el curso:

**“ Síntesis de Nanomateriales”**

Realizado del día 25 de octubre al 19 de noviembre del 2021

CURSO MODALIDAD VIRTUAL

**Dr. Jose Luis Aragon Vera**

Director del Centro de Física Aplicada  
y Tecnología Avanzada (CFATA)

**Bruno Renato Flores Hernandez**

Presidente del Capitulo estudiantil  
SMM CFATA UNAM Juriquilla

El Capítulo Estudiantil  
**CFATA UNAM**

Otorga la Presente  
Constancia a:

"*Nadia Alexandra López García*"

Por haber completado el curso:

**"SÍNTESIS DE NANOMATERIALES POR SOL-GEL,  
ELECTRODÉPOSITO, SPUTTERING Y ABLACIÓN LÁSER"**

Del 25 de Octubre al 19 de Noviembre 2021

  
**MTRO. BRUNO RENATO  
FLORES HERNÁNDEZ**

Presidente del capítulo  
estudiantil CFATA



  
**EMMERT  
JAVIER GONZALEZ**

Vicepresidente del capítulo  
estudiantil CFATA





La Secretaría de Educación del Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro,  
a través de su Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro  
CONCYTEQ

Otorgan la presente

# Constancia

**A: Nadia Alexandra López García**

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica

Por su valiosa participación como ponente el día **martes 7 de diciembre de 2021** con la actividad llamada "**Generación Inalámbrica de luz**" en la 34ª Exposición de Ciencia y Tecnología en el estado de Querétaro (**EXPOCYTEQ 2021**) llevada a cabo del 20 de septiembre al 10 de diciembre de manera virtual.

**Dr. Enrique Rabell García**

Director del CONCYTEQ



La Secretaría de Educación del Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro,  
a través de su Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro  
CONCYTEQ

Otorgan la presente

# Constancia

**A: Nadia Alexandra López García**

**Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ)**

Por su valiosa participación como ponente el día **lunes 6 de diciembre de 2021** con la actividad llamada **"Generación inalámbrica de luz"** en la 34ª Exposición de Ciencia y Tecnología en el estado de Querétaro (**EXPOCYTEQ 2021**) llevada a cabo del 20 de septiembre al 10 de diciembre de manera virtual.

**Dr. Enrique Rabell García**

Director del CONCYTEQ



La Secretaría de Educación del Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro,  
a través de su Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro  
CONCYTEQ

Otorgan la presente

# Constancia

**A: Nadia Alexandra López García**

**Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ)**

Por su valiosa participación como ponente el día **miércoles 1 de diciembre de 2021** con la actividad llamada **"Generación inalámbrica de luz"** en la 34ª Exposición de Ciencia y Tecnología en el estado de Querétaro (**EXPOCYTEQ 2021**) llevada a cabo del 20 de septiembre al 10 de diciembre de manera virtual.

**Dr. Enrique Rabell García**  
Director del CONCYTEQ



## CONSTANCIA DE ASISTENCIA A:

# Nadia Alexandra López García

Por su valiosa asistencia al segundo seminario virtual de nanotecnología "**ProyectoNano 2021**", organizado por estudiantes y docentes de la **Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos**, llevado a cabo los días 2 y 3 de diciembre de 2021.



## LA SOCIEDAD MEXICANA DE MATERIALES

Otorga la presente

### CONSTANCIA

**A: Nadia Alexandra López García**

Por su destacada participación como **Miembro** del Capítulo Estudiantil del **Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica** de la Sociedad Mexicana de Materiales durante el periodo 2021



Dra. Patricia Sambrano Robledo  
Presidenta



Dr. J. Manuel Mora Hernández  
Coordinador de capítulos estudiantiles



*Se otorga la presente*

**CONSTANCIA**

**a: Nadia Alexandra López García**

*Por formar parte del comité organizador del "1er Congreso Estatal  
Queretano de Materiales 2022"*

*Santiago de Querétaro, Qro., 25 al 29 de abril de 2022*



*Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo  
Presidenta de la SMMater*



CONACYT  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Sociedad Mexicana  
de Materiales A.C.



C F A T A



**El comité organizador de 1er Congreso Estatal Queretano de Materiales 2022  
otorga la presente**

# CONSTANCIA

**a: Nadia Alexandra López García**

Por su asistencia al **Curso titulado**

**"Principios y Aplicaciones de la Microscopía Electroquímica de Barrido (SECM)"**

**Santiago de Querétaro, Qro., 25 al 29 de abril de 2022**



M. C. José Alberto Elizalde Mata  
Presidente del Capítulo Estudiantil CFATA



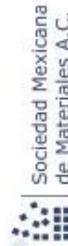
Brenda Alejandra Hernández Rodríguez  
Presidente del Capítulo Estudiantil UTEQ



M. C. Arnold Hernández Palomares  
Presidente del Capítulo Estudiantil CIDETEQ



CONACYT  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Sociedad Mexicana  
de Materiales A.C.



CFATA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA



INSTITUTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS DE MATERIALES



CENTRO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE QUERÉTARO  
UTEQ  
SMMater  
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

**El comité organizador de 1er Congreso Estatal Queretano de Materiales 2022  
otorga la presente**

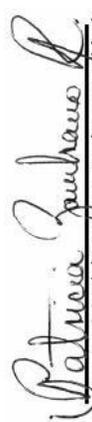
## **CONSTANCIA**

**a: Nadia Alexandra López García**

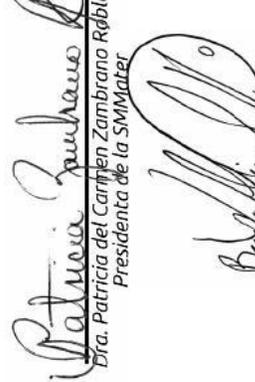
Por su participación con el póster titulado

**"SnO2-Modified graphite felt used as anode in a microbial electrolysis cell (MEC)  
for organic matter degradation"**

Santiago de Querétaro, Qro., 25 al 29 de abril de 2022

  
Dra. Patricia del Carmen Zambrano Roldo  
Presidenta de la SMMater

  
M. C. Arnold Hernández Palomares  
Presidente del Capítulo Estudiantil CIDETEQ

  
Brenda Alejandra Hernández Rodríguez  
Presidente del Capítulo Estudiantil UTEQ

  
M. C. José Alberto Elizalde Mata  
Presidente del Capítulo Estudiantil CFATA



CONACYT  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Sociedad Mexicana  
de Materiales A.C.



C F A T A



**El comité organizador de 1er Congreso Estatal Queretano de Materiales 2022  
otorga el presente**

## **RECONOCIMIENTO**

**a: Nadia Alexandra López García**

*Por haber obtenido el 1° lugar en el concurso de pósters  
del "Simposio de Síntesis y Caracterización Electroquímica de  
Materiales" con el póster titulado: "SnO<sub>2</sub>-Modified graphite felt used as anode in a  
microbial electrolysis cell (MEC) for organic matter degradation"  
Santiago de Querétaro, Qro., 25 al 29 de abril de 2022*

  
Dra. Patricia Zubizarreta R.  
Presidenta de la SMMater

  
Brenda Alejandra Hernández Rodríguez  
Presidenta del Capítulo Estudiantil UTEQ

  
M. C. Arnold Hernández Palomares  
Presidente del Capítulo Estudiantil CIDETEQ

  
M. C. José Alberto Elizalde Mata  
Presidente del Capítulo Estudiantil CFATA

  
M. C. Arnold Hernández Palomares  
Presidente del Capítulo Estudiantil CIDETEQ

  
M. C. Arnold Hernández Palomares  
Presidente del Capítulo Estudiantil CIDETEQ



**CONACYT**  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Sociedad Mexicana  
de Materiales A.C.





August 2022

**TO WHOM IT MAY CONCERN**  
P r e s e n t

This is to certify that *Nadia Alexandra López García, Jesús Cárdenas, Bibiana Cercado, Antonia Sandoval, Juan Manriquez* presented the contribution: **SnO<sub>2</sub> -MODIFIED GRAPHITE FELT USED AS ANODE IN A MICROBIAL ELECTROLYSIS CELL (MEC) FOR ORGANIC MATTER DEGRADATION** as **Oral** modality, in the *C1. Emerging Materials for Clean Energy and Environmental Remediation Applications Symposium* at the **XXX International Materials Research Congress and International Conference on Advanced Materials** held in Cancun, Mexico from August 14th to 19th, 2022.

Sincerely,

**Patricia del Carmen Zambrano Robledo**  
*President*





The Organizing Committee  
Acknowledges the Participation of

# Nadia Alexandra López García

in the

**XXX International Materials Research Congress  
& International Conference on Advanced Materials**

held in Cancun, Mexico  
from August 14th to 19th, 2022

**Patricia del C. Zambrano Robledo**  
SMMater President



Sociedad Mexicana  
de Metalúrgicos A.C.  
MATERIALS RESEARCH SOCIETY  
MRS