



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO  
EN ELECTROQUIMICA



**“Tratamiento bio-electroquímico del agua residual  
alcalina del proceso de reparaciones de la  
industria aeronáutica.”**

TESIS PRESENTADA POR:

**(I. T. A.) ELIZABETH FIGUEROA HERNÁNDEZ**

DIRIGIDA POR:

**DRA. ANTONIA SANDOVAL GONZÁLEZ**

**CO-ASESOR: JORGE MORALES HERNÁNDEZ**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRÍA EN ELECTROQUÍMICA**

**DICIEMBRE, 2023**

# Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica

REALIZADO POR:

DIRIGIDA POR

## SINODALES

Presidenta: Dra. Erika Bustos Bustos, CIDETEQ

---

Firma

Secretario: Dra. Bibiana Cercado Quezada, CIDETEQ

---

Firma

Vocal: Dr. Carlos Antonio Pineda Arellano, CIO

---

Firma

Vocal: M.C. José Mojica Gómez, CIDETEQ

---

Firma

Suplente: Dr. José Andrés Alanís Navarro, UPEGro

---

Firma

## RESUMEN

---

La presente tesis de maestría se centra en la investigación de la aplicación de tecnologías avanzadas para el tratamiento de aguas residuales (TAR) en la industria aeronáutica. Específicamente, se aborda el uso de celdas de electrólisis microbianas, donde se exploran y evalúan diversas variables clave, incluyendo los tipos de electrodos, el pH y los enfoques de tratamiento biológico y electroquímico.

El estudio se divide en tres componentes principales: primero, se investigan los procesos electroquímicos y bioelectroquímicos de manera independiente; segundo, se analiza la integración de estos procesos con las variables de pH y la elección de electrodos, ya sean de fieltro de grafito (FG) o fieltro de grafito recubiertos con NiO (NiO/FG). Esta tesis comienza con una exposición de los antecedentes y los fundamentos esenciales de las celdas de electrólisis microbianas, así como las técnicas utilizadas para su análisis y caracterización, esto sienta las bases necesarias para comprender en profundidad la investigación realizada en este trabajo. La evaluación de los experimentos se llevó a cabo utilizando técnicas de voltamperometría cíclica y cronoamperometría. Además, para determinar la eficiencia en la remoción de contaminantes y la materia orgánica en los experimentos, se llevaron a cabo mediciones de diversos parámetros relacionados con la calidad del agua residual de la industria aeronáutica. Asimismo, se realizó una caracterización exhaustiva de los electrodos propuestos para su utilización en los experimentos, empleando técnicas como espectroscopia Raman, difracción de rayos X (DRX), microscopia electrónica de barrido (MEB) y análisis elemental EDS. Esta investigación representa un importante avance en el campo del TAR, específicamente en el contexto de la industria aeronáutica. La aplicación de celdas de electrólisis microbianas y la evaluación de las variables mencionadas prometen contribuir significativamente a la comprensión y la mejora de los procesos de tratamiento de aguas residuales en esta industria.

## ABSTRACT

---

This master's thesis focuses on the investigation of advanced technologies for the treatment of wastewater in the aerospace industry. Specifically, it addresses the use of microbial electrolysis cells, where various key variables are explored and evaluated, including electrode types, pH levels, and biological and electrochemical treatment approaches. The study is divided into three main components: first, the electrochemical and bioelectrochemical processes are investigated independently; second, the integration of these processes with pH variables and the choice of electrodes, whether graphite felt or graphite felt coated with NiO, is analyzed. This thesis begins with an exposition of the background and essential fundamentals of microbial electrolysis cells, as well as the techniques used for their analysis and characterization. This lays the necessary foundation for a comprehensive understanding of the research conducted in this work. The evaluation of experiments was carried out using cyclic voltammetry and chronoamperometry techniques. Furthermore, to determine the efficiency in the removal of contaminants and organic matter in the experiments, measurements of various parameters related to the quality of wastewater from the aerospace industry were conducted. Additionally, a thorough characterization of the proposed electrodes for use in the experiments was performed, employing techniques such as Raman spectroscopy, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). This research represents a significant advancement in the field of industrial wastewater treatment, specifically within the context of the aerospace industry. The application of microbial electrolysis cells and the evaluation of the mentioned variables promise to contribute significantly to the understanding and improvement of wastewater treatment processes in this industry.

## IMPACTO SOCIAL DEL PROYECTO DE TESIS

---

Esta tesis de maestría, centrada en la aplicación de tecnologías avanzadas para el tratamiento de aguas residuales en la industria aeronáutica, tiene un impacto social significativo al abordar de manera directa los desafíos ambientales y de sostenibilidad asociados con esta industria específica.

En primer lugar, al proponer el uso de celdas de electrólisis microbianas y al evaluar variables cruciales como el pH y la elección de electrodos, la investigación contribuye a la optimización de los procesos de tratamiento de aguas residuales en la industria aeronáutica. Esta optimización no solo tiene beneficios ambientales al reducir la contaminación del agua, sino que también implica una mejora en la eficiencia de los recursos, lo que puede traducirse en un menor impacto ambiental global de la actividad aeronáutica. Además, la aplicación de estas tecnologías avanzadas en la industria aeronáutica establece un precedente importante en el camino hacia prácticas más sostenibles en un sector que tradicionalmente ha enfrentado desafíos ambientales significativos. Al proponer soluciones innovadoras y eficientes, la tesis apunta a inspirar cambios positivos en las prácticas de tratamiento de aguas residuales en otras áreas industriales, promoviendo así un impacto social más amplio en la gestión sostenible de recursos hídricos. Asimismo, la investigación fomenta el desarrollo de tecnologías más respetuosas con el medio ambiente, lo que puede tener un impacto a largo plazo en la percepción y aceptación social de la industria aeronáutica. Al demostrar un compromiso con la responsabilidad ambiental, la industria puede ganar la confianza y el apoyo de la sociedad, contribuyendo a una imagen positiva y a una mayor legitimidad social.



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

**Dra. Antonia Sandoval González**

## AGRADECIMIENTOS

En el recorrido de esta travesía académica, mi corazón se llena de gratitud hacia aquellos que han sido faros de luz en este camino, permitiéndome expresar mi sincero agradecimiento:

A Dios, fuente inagotable de sabiduría: Agradezco a Dios por su inquebrantable presencia en mi vida, por guiarme, fortalecerme, darme de conocimiento, perseverancia en cada paso de este viaje académico y por iluminar mi camino.

Mis Padres, Verónica y Jaime, Pilares Incansables: A mis amados padres, Verónica y Jaime, les debo un agradecimiento eterno, su apoyo económico, amor incondicional y único ha sido el viento bajo mis alas. Su dedicación y amor han sido mi mayor inspiración.

La Dra. Antonia, guía, segunda mamá y maestra: Agradezco a la Dra. Antonia, mi incansable asesora, sus conocimientos, paciencia, amor, responsabilidad y apoyo constante han sido fundamentales en la realización de esta tesis y crecimiento personal. Su guía iluminó mi camino.

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ): Al CIDETEQ, mi hogar académico, le agradezco por permitirme continuar con mis estudios de doctorado. Aquí encontré un espacio para crecer intelectualmente.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Patrocinador de Mis Sueños: Al CONACYT, agradezco la beca otorgada, que hizo posible la realización de este posgrado. Su respaldo financiero fue fundamental.

Mi Comité Tutorial y Jurado de Examen, guardianes del rigor científico: Agradezco profundamente a mi comité tutorial y jurado de examen. Sus consejos y observaciones expertas enriquecieron la calidad de esta tesis, guiándome hacia la excelencia académica.

Mi Querido Novio, Damián (oso), Mi sol :le agradezco su apoyo emocional constante, tus consejos, amor incondicional, los momentos de ocio, aventuras y demás compartidos fueron mi refugio en los momentos de mayor dificultad, gracias por estar.

Amigos y Compañeros de CIDETEQ, Compañeros de Aventura: A Elías, Ángel y Nadia, mis amigos y los compañeros de CIDETEQ, les agradezco por hacer más ameno el trabajo en el laboratorio, por su compañía, conversaciones y asesorías hicieron que cada día fuera especial.

## Índice

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Introducción .....	13
1.2 Marco teórico.....	15
1.2.1 Tratamiento de aguas residuales .....	15
1.2.2 Celdas de electrólisis microbianas .....	16
1.2.3 Consorcios bacterianos usados en el tratamiento de aguas residuales .....	21
1.2.4 Microorganismos obtenidos en el humus de lombriz.....	21
1.3 Antecedentes del proyecto .....	23
1.3.1 El agua residual a nivel mundial .....	24
1.3.2 El agua residual en México .....	24
1.3.3 Agua residual de la industria aeronáutica .....	26
1.3.4 Proceso de limpieza y reparaciones de piezas de motores de la industria aeronáutica según la norma ASTM E - 1417 - 99.....	28
1.3.5 Normatividad mexicana aplicable.....	30
1.3.6 Tratamiento del agua residual de la industria aeronáutica .....	32
1.3.7 Celdas de electrólisis microbianas .....	35
1.3.8 Importancia del electrodo anódico en el tratamiento de aguas residuales.....	36
1.4 Justificación .....	42
1.5 Hipótesis.....	43
1.6 Objetivo general.....	43
1.7 Objetivos específicos.....	43
1.8 Metodología de la investigación.....	44
Capítulo 2. RESULTADOS .....	50
2.1 Resultados .....	50
2.2 Caracterización de los efluentes (agua residual a pH 7, agua residual a pH 9 y lixiviado).....	50
2.3 Caracterización de los electrodos de FG y NiO/FG .....	57
2.4 Cálculo del área electroactiva .....	69
2.5 Prueba biocompatibilidad con el lixiviado .....	71
Capítulo 3. Resultados de los diferentes tratamientos aplicados al ARA.....	84
3.1 Tratamiento biológico del agua residual de la industria aeronáutica .....	85



3.2 Tratamiento electroquímico y bioelectroquímico del agua residual de la industria aeronáutica a diferentes pH 7 y 9 con electrodos de FG.....	89
3.2.1 Resultados del monitoreo por técnicas electroquímicas de los experimentos electroquímicos y bioelectroquímicos utilizando electrodos de fieltro de grafito en agua residual aeronáutica a diferentes pH 7 y 9.....	102
3.4 Tratamiento electroquímico y bioelectroquímico del agua residual de la industria aeronáutica a diferentes pH 7 y 9 con electrodos de NiO/FG.....	105
3.4.1 Resultados de la caracterización de los electrodos de NiO/FG después del tratamiento del agua residual a diferentes pH 7 y 9. ....	111
3.4.2 Resultados del monitoreo por técnicas electroquímicas de los experimentos electroquímicos y bioelectroquímicos utilizando electrodos de NiO/FG en agua residual aeronáutica a diferentes pH 7 y 9.....	119
Conclusiones generales .....	123
Referencias .....	125
Anexos .....	161
Anexo A. Técnicas electroquímicas .....	161
Voltamperometría cíclica .....	161
Cronoamperometría .....	163
Espectroscopia de impedancia electroquímica .....	164
Potencial a circuito abierto .....	165
Anexo B. Técnicas espectroscópicas .....	165
Absorbancia UV-VIS .....	165
Espectroscopia de fluorescencia.....	167
Espectroscopia Raman.....	169
Anexo C. Técnicas microscópicas .....	170
Microscopia Electrónica de barrido (MEB).....	170
Espectroscopia de energía dispersa (EDS O EDX).....	171
Difracción de rayos X (XRD).....	171
Anexo D. Medición de otros parámetros .....	173
Demanda química de oxígeno.....	173
Carbono orgánico total.....	173
Potencial de hidrógeno (pH) .....	174
Conductividad eléctrica.....	174
Potencial de reducción de oxígeno (ORP).....	175
Anexo E. Obtención de lixiviado de composta (microorganismos).....	175

Anexo F. Tratamiento de los electrodos.....	176
Anexo G. Cálculo del área a través de la ecuación de Randles Sevcik .....	177
Anexo H. Diseño y construcción de la celda de electrólisis microbianas .....	178
Anexo I. Medición de parámetros fisicoquímicos.....	178
Medición de DQO .....	178
Medición de pH.....	179
Medición de COT.....	180

## Índice de figuras

Figura 1. Representación de una celda de electrólisis microbiana, en donde los electrones y protones de hidrógeno se transportan por diferentes rutas para degradar los contaminantes. Fuente de elaboración: Propia.....	17
Figura 2. Humus de lombriz y sus componentes.....	22
Figura 3. Etapas del examen por líquidos penetrantes. Fuente elaboración propia con datos de ADEMINSAC, 2011.....	28
Figura 4. Tratamiento superficial de las piezas de motores en la industria aeronáutica. Modificado de Pérez 2019. ....	33
Figura 5. Representación gráfica de la celda de electrólisis microbiana.....	46
Figura 6. Resumen de la metodología. ....	47
Figura 7. Espectros de absorbancia del agua aeronáutica a pH 7, pH 9 y lixiviado. ....	52
Figura 8. Picos de matriz de excitación-emisión de fluorescencia (EEM) para, A) ARA pH 9, B) ARA pH 7, y C) lixiviado.....	56
Figura 9. Espectros Raman de A) fieltro de grafito sin tratamiento, B) fieltro de grafito tratado químicamente, C) fieltro de grafito con recubrimiento de NiO a 1.5 h y D) fieltro de grafito con recubrimiento de NiO a 2 h. ....	58
Figura 10. Espectros de difracción de rayos X. A) muestra de fieltro de grafito de fábrica, B) muestra de fieltro de grafito tratado químicamente, C) muestra de fieltro de grafito depositado con NiO a 1.5 horas, y D) muestra de fieltro de grafito depositado con NiO a 2 horas. ....	60
Figura 11. FG de fábrica, sin tratamiento .....	64

Figura 12. Análisis elemental de FG de fábrica .....	64
Figura 13. FG con tratamiento químico H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	65
Figura 14. Análisis elemental de FG después del tratamiento químico .....	66
Figura 15. Electrodo de NiO/FG, antes de ser utilizado en experimentación.....	67
Figura 16. Análisis elemental de electrodo de NiO/FG, antes de su uso. ....	68
Figura 17. Gráficas del cálculo del área electroactiva para el fieltro de grafito. Donde: A) Cálculo de la pendiente y B) voltamperogramas cíclicos del ferrocianuro-ferricianuro. ....	70
Figura 18. Gráficas del cálculo del área electroactiva para el NiO/FG. Donde: A) Cálculo de la pendiente y B) voltamperogramas cíclicos del ferrocianuro- ferricianuro. ....	71
Figura 19. Voltamperometría cíclica de los experimentos de fieltro de grafito y fieltro de grafito con NiO en lixiviado como electrolito. ....	72
Figura 20. Cronoamperometría de los experimentos de biocompatibilidad con los electodos de fieltro de grafito con área electroquímica de (552.06 cm <sup>-2</sup> ) y fieltro de grafito con NiO con área electroquímica de (790.37 cm <sup>-2</sup> ).....	73
Figura 21. Espectros Raman de fieltro de grafito y NiO/FG, ambos después de haber sido utilizados en la prueba de biocompatibilidad.....	78
Figura 22. Espectros de difracción de rayos X. A) muestra de fieltro de grafito con lixiviado y B) muestra de NiO/FG en lixiviado.....	79
Figura 23. Electrodo de FG después de haber sido utilizado en lixiviado .....	80
Figura 24. análisis elemental del electrodo de FG después de haber estado en el experimento con lixiviado .....	81
Figura 25. Electrodo de NiO/FG después de haber sido utilizado en el lixiviado ..	82
Figura 26. análisis elemental del electrodo NiO/FG después de haber sido utilizado en el experimento de lixiviado .....	82
Figura 27. Absorbancia de muestras de biodegradación del agua residual de la industria aeronáutica a pH 7 y pH 9. ....	87
Figura 28. Picos de matriz de excitación-emisión de fluorescencia (EEM) para el tratamiento biológico, donde: A) biológico a pH 9 y B) biológico a pH 7.....	88

Figura 29. Espectros de absorbancia de los efluentes después de ser sometidos a procesos de tratamiento electroquímico y bioelectroquímico. ....	91
Figura 30. Picos de matriz de excitación-emisión de fluorescencia (EEM) para: A) FG-EQ pH 9, B) FG-EQ pH 7, C) FG-BEQ pH 9, D) FG-BEQ pH 7.....	93
Figura 31. Electrodo de FG después del tratamiento electroquímico a pH 9 .....	96
Figura 32. análisis elemental del electrodo de FG después del tratamiento electroquímico a pH 9 .....	97
Figura 33. Micrografía de electrodos de FG después de haber sido sometido al tratamiento de ARA a pH 9 .....	97
Figura 34. Análisis elemental de FG después de haber sido sometido en ARA a pH 9.....	98
Figura 35. Espectros de difracción de rayos X. A) fieltro de grafito en experimento electroquímico a pH 7, B) fieltro de grafito en experimento electroquímico a pH 9, C) fieltro de grafito en experimento bioelectroquímico a pH 7 y D) fieltro de grafito en experimento bioelectroquímico a pH 9. ....	99
Figura 36. Espectroscopía Raman. A) fieltro de grafito en experimento electroquímico a pH 7, B) fieltro de grafito en experimento electroquímico a pH 9 y C) fieltro de grafito en experimentos bioelectroquímicos a pH 7 y pH 9. ....	101
Figura 37. Voltamperometría cíclica de experimentos bioelectroquímicos y electroquímicos con electrodos de fieltro de grafito, en diferentes pH 7 y 9. ....	102
Figura 38. Cronoamperometría de experimentos bioelectroquímicos y electroquímicos con electrodos a diferentes pH 7 y 9. ....	104
Figura 39. Espectros de absorbancia de experimentos BEQ y EQ para electrodos recubiertos de NiO en pH 7 y pH 9.....	108
Figura 40. Picos de matriz de excitación-emisión de fluorescencia (EEM) para: A) NiO/FG-EQ pH 9, B) FG-EQ pH 7, C) FG-BEQ pH 9, D) FG-BEQ pH 7.....	110
Figura 41. Electrodo de NiO/FG después de haber sido sometido al tratamiento electroquímico de ARA a pH 9 .....	111
Figura 42. análisis elemental del electrodo de NiO/FG después de haber sido sometido al tratamiento electroquímico de ARA a pH 9 .....	112

Figura 43. Micrografías de los electrodos de NiO/FG después del tratamiento bioelectroquímico en ARA a pH 9. ....	113
Figura 44. Electrodos de NiO/FG después del tratamiento bioelectroquímico en ARA a pH 9.....	114
Figura 45. Difracción de rayos X. A) experimento electroquímico con electrodos de NiO/FG a pH 7, B) experimento electroquímico con electrodos de NiO/FG a pH 9, C) experimento bioelectroquímico con electrodos de NiO/FG a pH 7 y D) experimento bioelectroquímico con electrodos de NiO/FG a pH 9. ....	115
Figura 46. Espectroscopía Raman. NiO/FG en tratamiento bioelectroquímico y experimentos electroquímicos en diferentes pH 7 y 9 .....	118
Figura 47. Voltamperometría cíclica de experimentos bioelectroquímicos y electroquímicos con electrodos de fieltro de grafito y película de NiO, en diferentes pH 7 y 9. ....	120
Figura 48. Cronoamperometría de experimentos bioelectroquímicos y electroquímicos con electrodos recubiertos con película de NiO a diferentes pH 7 y 9.....	122
Figura 49. Sistema para la obtención de datos. ....	162
Figura 50. Circuito simple. Donde R1 es una resistencia a la solución, Q2 un elemento de fase constante y R2 una segunda resistencia a la carga por interfaz electrodo - electrolito. Fuente: elaboración propia.....	165
Figura 51. Seguimiento de la medición de absorbancia. Se muestra la fuente de luz utilizada para medir la longitud de onda de la muestra a través del equipo para después analizar los datos. Fuente: elaboración propia con ayuda del programa Biorender. ....	167
Figura 52. Medición de espectroscopia de fluorescencia .....	168
Figura 53. Espectroscopia Raman y efectos de dispersión .....	169
Figura 54. Difracción de rayos X. Fuente de elaboración: Propia con ayuda del software Biorender.....	172
Figura 55. . Tapaderas con diseño de distribución de electrodos .....	178

## Índice de tablas

Tabla 1. Contaminantes presentes en el agua residual de la industria aeronáutica. .....	27
Tabla 2. Normatividad mexicana aplicable en este estudio. ....	31
Tabla 3. Electrodo modificado con óxidos metálicos para mineralizar contaminantes a través de CEM. ....	39
Tabla 4. Matriz experimental para el tratamiento de ARA en celdas de electrólisis microbiana. ....	45
Tabla 5. Parámetros para determinar la calidad del agua. ....	48
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos de diversos efluentes. ....	51
Tabla 7. Zonas de excitación y emisión en diversas regiones aplicables a fluorescencia. ....	53
Tabla 8. Valores obtenidos por el programa de Origin 9 de espectroscopía Raman. .....	59
Tabla 9. Cálculos aplicando la Ley de Bragg y la Ley de Scherrer. ....	61
Tabla 10. Porcentajes de composición de los electrodos. ....	63
Tabla 12. Cálculo del área electroquímica por Randles Sevcik para electrodos de FG.....	69
Tabla 13. Cálculo del área electroquímica por Randles Sevcik para electrodos de NiO/FG.....	70
Tabla 14. Información teórica de bacterias presentes del lixiviado reportado en (cercado <i>et al.</i> , 2013). ....	76
Tabla 15. Parámetros fisicoquímicos después de la experimentación.....	77
Tabla 16. Porcentajes de composición de los electrodos. ....	80
Tabla 18. Parámetros fisicoquímicos. ....	85
Tabla 19. Parámetros de calidad del agua después de la experimentación con los electrodos de FG. ....	90
Tabla 21. Parámetros de calidad del agua después del tratamiento con electrodos de NiO/FG.....	106
Tabla 23. Cálculos aplicando la Ley de Bragg y la Ley de Scherrer. ....	116
Tabla 24. Porcentajes de composición de los electrodos. ....	117

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

El agua es uno de los recursos más importantes para la supervivencia de los seres vivos en el planeta, sin embargo, su calidad y cantidad están siendo amenazadas a nivel mundial debido al uso inapropiado y a la falta de procesos de tratamiento adecuados debido a la complejidad de los desechos. México es un ejemplo de esta situación, ya que la contaminación del recurso hídrico es una amenaza común provocada en su mayoría por las industrias que utilizan el agua en diversos procesos y no cuentan con tratamientos suficientes para eliminar los contaminantes. Este problema ha afectado la salud y los ecosistemas durante décadas, lo que ha llevado a la necesidad de abordarlo desde una perspectiva interdisciplinaria y buscar soluciones sostenibles para garantizar el acceso al agua potable de calidad para las generaciones futuras. El consumo de agua potable en México, representa  $451.585 \text{ hm}^3$  y por habitante se cuentan con  $3.656 \times 10^{-6} \text{ hm}^3\text{-año}$  de disponibilidad, según (CONAGUA, 2018) de la cual, el volumen de agua destinado a la industria del autoabastecimiento representó el 4.4% del total. En cuanto al consumo de agua per cápita, es importante considerar que las cifras varían entre países y regiones, debido a factores como el acceso al agua potable, el nivel de desarrollo, los patrones de consumo y las prácticas de conservación. Sin embargo, se estima que a nivel global, una persona promedio consume alrededor de 80 a 100 L de agua por día para uso doméstico, lo cual incluye actividades como beber, cocinar, limpiar, lavar ropa y aseo personal. Es importante destacar que estas cifras son solo aproximaciones y pueden variar considerablemente según el contexto.

En contraste, el consumo de agua per cápita en la industria es generalmente mucho mayor debido a las necesidades de producción y procesamiento. El sector industrial utiliza agua en una amplia gama de actividades, como la manufactura, la generación de energía y el riego agrícola. Los volúmenes de agua utilizados en la industria varían según el tipo de sector y la tecnología utilizada. Por ejemplo, las industrias que utilizan bastante agua, como la agricultura, la minería y la producción de papel,

tienden a utilizar grandes cantidades de agua. Sin embargo, los avances tecnológicos y las prácticas de gestión sostenible han mejorado la eficiencia del uso del agua en muchas industrias (Viola, 2020; Van der Bruggen, 2021; UN-WATER, 2021).

A nivel nacional existe un gran desarrollo de la industria aeronáutica, en la cual se llevan a cabo diversos procedimientos, principalmente el proceso de inspección y reparación de piezas en el que se requiere una gran cantidad de agua, de tal manera que el agua residual producto de estos procesos está contaminada por hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales (Vieira y Loures, 2016; Vázquez Ruiz, M. Á., & Bocanegra, 2018; Jara-Olmedo *et al.*, 2023).

En esta investigación se busca realizar diferentes pruebas de degradación aplicadas al agua alcalina, la cual, pertenece a uno de los tres tipos de efluentes generados por esta: i) agua alcalina, ii) agua ácida y iii) agua neutra) (Guan *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2013). Entre las diferentes tecnologías emergentes para el tratamiento de diferentes contaminantes, la remediación microbiana ha atraído la atención por parte de los científicos, ofreciendo grandes ventajas como el bajo costo y el cuidado al medio ambiente (Guo y Kim *et al.*, 2019; Liping *et al.*, 2022; Jiawei *et al.*, 2023). La técnica propuesta para abordar esta problemática es la utilización de celdas de electrólisis microbianas (CEM), las cuales permiten la biodegradación electroquímica de los contaminantes de la industria aeronáutica como hidrocarburos aromáticos policíclicos, compuestos orgánicos e inorgánicos. Las tecnologías de biodegradación electroquímica resultan ser muy atractivas, aun cuando se presentan algunas consideraciones como el tipo de material en los electrodos, donde se debe tomar en cuenta: la biocompatibilidad, actividad catalítica, costos del material, accesibilidad, etc. A favor de ello, los materiales carbonosos parecen ser la mejor opción. En contraste, con el uso de óxidos metálicos es posible aumentar la superficie de los electrodos, mejorar sus propiedades de adsorción e hidrofobicidad, promoviendo así la adsorción de contaminantes (An *et al.*, 2019; Saruhan *et al.*, 2021). Por ello, se decidió comparar el rendimiento en función de la degradación de contaminantes con un electrodo de fieltro de grafito y un electrodo



de fieltro de grafito recubierto a través del proceso de depósito física de vapor (PVD), por sus siglas en inglés, para lograr una película delgada de **NiO** en un sistema bioelectroquímico aplicado al tratamiento del efluente (agua alcalina). Para asegurar la eficacia y degradación de los contaminantes del agua residual, se han establecido normas como la norma oficial mexicana 001, 2021, la norma oficial mexicana 165, 2013 y el reglamento de la Ley federal para la prevención y gestión integral de residuos., en las cuales es primordial el analizar y controlar diversos parámetros acordes al tratamiento de aguas residuales tales como la medición de la demanda química de oxígeno (DQO), del carbono orgánico total (COT), del pH y de la conductividad eléctrica.

## 1.2 Marco teórico

### 1.2.1 Tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales son aquellas que resultan del uso doméstico, agrícola, industrial, pluvial y como consecuencia son contaminadas con materia orgánica y sustancias tóxicas de las diferentes actividades humanas (Méndez 2019). El tratamiento de aguas residuales es un proceso que consiste en la separación de la carga orgánica que contienen las aguas residuales, eliminando al máximo la cantidad de residuos y contaminantes, cumpliendo con las normas oficiales mexicanas establecidas.

Existen diversos tipos de tratamiento de aguas residuales, (a) preliminar o primario, (b) secundario y (c) terciario. Entre los principales objetivos del tratamiento preliminar o primario incluyen la eliminación de partículas gruesas y finas mediante cribado, filtración, sedimentación, y flotación (Dipper, 2022). El tratamiento secundario consiste en un tratamiento biológico, es decir, aerobios, anaerobios y reactores especializados. El tratamiento terciario implica procesos químicos para purificar las aguas residuales. En el futuro, a medida que la población mundial continúe creciendo, tales prioridades de investigación serán cada vez más importantes. En la actualidad se puede observar un cambio en las prioridades de

investigación y se están aplicando nuevas tecnologías que cumplan con los requerimientos del desarrollo sustentable y el enfoque multidisciplinario (Qayoom, *et al.*, 2022). Las celdas de electrólisis microbianas han atraído una atención considerable en todo el mundo como posibles dispositivos de recuperación de energía, tratamiento de aguas residuales e investigación en la ciencia básica y aplicada.

### 1.2.2 Celdas de electrólisis microbianas

Son una tecnología bioelectroquímica emergente, reciente, novedosa para la degradación de contaminantes y diversa materia orgánica, las cuales son para la formación y síntesis de productos como hidrógeno, metano, compuestos orgánicos. Los sustratos más utilizados en CEM son: acetato, glicerol, glucosa y celulosa (Debarshi *et al.*, 2022). Existen diversos tipos entre las cuales se encuentran, (a) celdas de electrólisis microbianas de cámara única, (b) celdas de electrólisis microbianas de dos cámaras, (c) Celdas de electrólisis microbianas de flujo continuo, y (d) celdas de electrólisis microbianas de membrana de intercambio de protones.

#### 1.2.2.1 Celdas de electrólisis microbianas de cámara única

Son el tipo más simple de CEM y consisten en una cámara única en la que los microorganismos oxidan los contaminantes orgánicos y transfieren electrones a un electrodo, produciendo corriente eléctrica. Estas celdas se caracterizan por su facilidad de construcción y operación, además, tienen un bajo costo de mantenimiento. Sin embargo, tienen una baja eficiencia debido a la falta de control de las condiciones de reacción de cada electrodo y la baja densidad de microorganismos en la cámara (Jian *et al.*, 2016). La operación general de las CEM consiste en la aplicación de un voltaje externo a un sistema electroquímico para el

proceso de electrólisis y en la degradación de contaminantes, como se muestra en la figura 1.

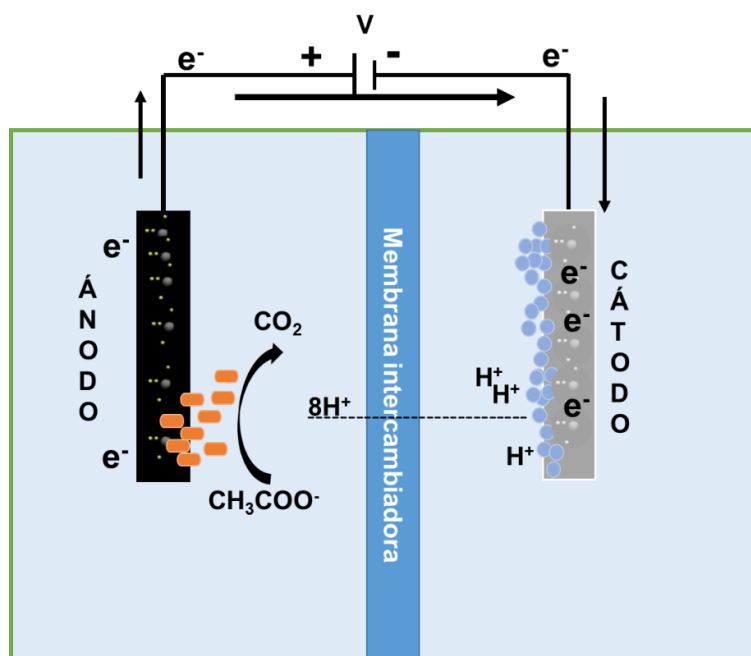
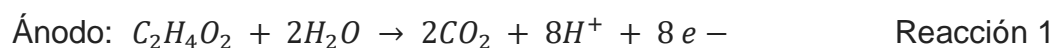


Figura 1. Representación de una celda de electrólisis microbiana, en donde los electrones y protones de hidrógeno se transportan por diferentes rutas para degradar los contaminantes. Fuente de elaboración: Propia.

El funcionamiento de la CEM comienza con la ayuda de microorganismos se lleva a cabo la reacción de oxidación de la materia orgánica presente en el sustrato, ver figura 1, durante la oxidación se producen electrones ( $e^-$ ), protones ( $H^+$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Los protones pasan del ánodo al cátodo a través de un separador, que por lo regular es una membrana de intercambio protónico, mientras que los electrones son transferidos de los microorganismos al electrodo, y una vez estando en el electrodo estos viajan a través de un circuito externo hasta llegar al cátodo, donde reaccionan con los protones en el cátodo para formar,  $H_2$  o  $CH_4$ , este mecanismo se representa mediante la figura 4.

Cabe resaltar que los microorganismos forman una biopelícula en la superficie del ánodo que puede convertir la energía química presente en las sustancias orgánicas, a energía eléctrica, que luego se puede utilizar para crear otros productos valiosos

como H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en el cátodo (Pantalón *et al.*, 2011) (Kadier *et al.*, 2016), ver las reacciones (1) y (2).



Al aplicar técnicas electroquímicas mientras el sistema está en funcionamiento, el ánodo queda cargado eléctricamente, es decir, se polariza, lo cual puede ayudar a la formación de la biopelícula, lo que se traduce en la producción de reacciones redox que a su vez ayudan a oxidar la materia orgánica, la cual se convierte en fuente de energía para los microorganismos. Por otro lado, las bacterias en su actividad metabólica transforman los compuestos químicos del agua en CO<sub>2</sub>, liberando H<sup>+</sup> y e<sup>-</sup>. De igual importancia, los materiales del cátodo deben tener un alto potencial redox y capturar fácilmente los protones. El platino, el cobre, y el acero inoxidable son los materiales más usados como cátodos en una CEM (Jayabalan *et al.*, 2020). En este trabajo se utilizaron electrodos de fieltro de grafito recubiertos con NiO mediante deposición física de vapor.

Diferencias entre una celda electroquímica y una celda bioelectroquímica:

Las celdas electroquímicas y las celdas bioelectroquímicas son sistemas esenciales en el campo de la electroquímica, cada uno con características distintivas que influyen en sus aplicaciones y funcionalidades. Ambos tipos de celdas involucran reacciones redox, en las cuales ocurre una transferencia de electrones, pero estas se diferencian en términos de origen de las reacciones, aplicaciones, complejidad y sostenibilidad (Zhang *et al.*, 2005; Sharma y Bhattacharjee 2021).

Origen de las reacciones:

Celdas Electroquímicas: En el caso de las celdas electroquímicas convencionales, las reacciones redox son impulsadas por especies químicas inorgánicas o compuestos electroactivos. En otras palabras, utilizan sustancias no biológicas, como metales, iones o moléculas orgánicas, para desencadenar reacciones químicas que generan energía, la energía se produce a partir de la variación en los potenciales redox de estas sustancias (Katz y Bollella 2021; Hassan *et al.*, 2021).

Celdas bioelectroquímicas: Por el contrario, las celdas bioelectroquímicas emplean componentes biológicos, como enzimas, microorganismos o materiales biológicos, para catalizar reacciones redox. Aquí, la actividad biológica es esencial para la transferencia de electrones. Este enfoque abre la puerta a aplicaciones únicas en biotecnología y medio ambiente, ya que permite aprovechar la capacidad de los sistemas biológicos para llevar a cabo reacciones redox específicas (Hernandez y Osma 2020; Lawrence *et al.*, 2022).

Aplicaciones y campos de estudio:

Celdas Electroquímicas: Las celdas electroquímicas tienen aplicaciones predominantes en la industria. Se utilizan en procesos como la galvanización, la producción de energía a través de pilas de combustible y la electrólisis del agua para obtener hidrógeno y oxígeno. Además, se emplean en la síntesis de productos químicos y en la creación de sensores electroquímicos (Gul y Ahmad 2019).

Celdas Bioelectroquímicas: Las celdas bioelectroquímicas son especialmente relevantes en la investigación y el desarrollo de tecnologías sostenibles y medioambientales. Pueden utilizarse para generar energía a partir de residuos orgánicos en celdas de combustible microbianas, detectar biomoléculas mediante biosensores y contribuir a la remediación de contaminantes gracias a la actividad microbiana. Su potencial radica en su capacidad para abordar desafíos relacionados con la sostenibilidad y la conservación del medio ambiente (Logan *et al.*, 2019).

### Complejidad y regulación:

**Celdas Electroquímicas:** Las celdas electroquímicas tienden a ser sistemas más simples en términos de diseño y operación, ya que se basan en reacciones químicas bien definidas y controlables. La regulación se logra principalmente mediante ajustes en los parámetros físicos y químicos del sistema (Jian y Li 2022; Hou *et al.*, 2023).

**Celdas Bioelectroquímicas:** En cambio, las celdas bioelectroquímicas son inherentemente más complejas debido a la presencia de componentes biológicos. La actividad enzimática o microbiana debe mantenerse en condiciones óptimas para un rendimiento eficiente, lo que puede requerir un control más riguroso de las condiciones ambientales y del medio de cultivo esto añade un nivel adicional de desafío técnico (Idris *et al.*, 2022).

### Sostenibilidad y aplicaciones medioambientales:

**Celdas Electroquímicas:** Aunque las celdas electroquímicas son cruciales en muchas aplicaciones industriales, su dependencia de compuestos químicos a menudo limita su contribución a soluciones medioambientales directas (Mitchell *et al.*, 2021).

**Celdas Bioelectroquímicas:** Las celdas bioelectroquímicas se destacan en la búsqueda de soluciones sostenibles, al utilizar materiales biodegradables y aprovechar la capacidad inherente de los microorganismos para descomponer contaminantes Gul y Ahmad 2019. Estas celdas se convierten en una herramienta valiosa en la biorremediación y la producción de energía a partir de desechos orgánicos, contribuyen significativamente a la causa de la sostenibilidad y la preservación del medio ambiente (Verma *et al.*, 2021).

### 1.2.3 Consorcios bacterianos usados en el tratamiento de aguas residuales

Los microorganismos son ambiental y económicamente muy importantes, se están explotando puesto que generan una amplia gama de productos, es decir, enzimas, probióticos, biocombustibles como bioetanol, hidrógeno gaseoso, etc. Actualmente, a escala industrial, estos microbios están desempeñando un papel valioso en la degradación de contaminantes. En las CEM, los microorganismos juegan un papel crucial en el tratamiento de aguas residuales, ya que son capaces de descomponer y eliminar una amplia variedad de contaminantes, permitiendo que una vez tratada el agua pueda ser liberada al medio ambiente.

Las interacciones entre microorganismos pueden tener las siguientes ventajas: (1) sinergia metabólica, lo que mejora el tratamiento, convirtiéndolo en una biodegradación efectiva, (2) aumento de la absorción general de nutrientes; (3) resistencia a contaminantes y depredadores mediante la inducción de la producción de aleloquímicos; y (4) el desarrollo de un sistema sedimentable (combinando microorganismos unicelulares con floculantes), evitando así los requisitos de un método de cosecha y reduciendo los costos de recuperación de biomasa (Nath *et al.*, 2017).

### 1.2.4 Microorganismos obtenidos en el humus de lombriz

Los microorganismos se pueden extraer de diversos lugares, pero en la búsqueda de obtener estos, muchas veces suelen encarecer el proceso, aumentan la dificultad de manipulación además que su adquisición es costosa. La composta del humus de lombriz es una fuente confiable para extraer los microorganismos, por su disposición, fácil extracción y rentabilidad; ver figura 2.



### COMPONENTES DEL HUMUS DE LOMBRIZ

Nutrientes (N,P,K,Ca)	Bacterias aerobias
Lactobacilus plantarum	Bacterias anaerobias
Streptococcus	Basillus sp
L. Casei	Actynomicetos

Figura 2. Humus de lombriz y sus componentes

En la figura 2, se muestra el humus de lombriz utilizado en el estudio, algunos de los microorganismos más abundantes en este sustrato son: bacterias de ácido láctico (*Lactobacilus plantarum*, *L. casei* y *Streptococcus lactis*), bacterias fotosintéticas (*Rhodopseudomonas palustris* y *Rodobacter Spaeroides*), levaduras (*saccharomyces cerevisiae* y *Candida utilis*), actinomicetos (*Streptomyces albus* y *Streptomyces griseus*) y hongos de fermentación (*Aspergillus oryzae*, *Penicillium sp* y *Mucor hemalis*) según lo reportado por Pantoja en 2018 y Cercado en 2013.

El humus de lombriz se ha utilizado en diferentes investigaciones, por ejemplo, en Rodríguez *et al.*, 2018 estudiaron la degradación de hidrocarburos presentes en suelo contaminado, obteniendo el 86.74% de degradación, empleando una relación del humus de lombriz con respecto al suelo contaminado de 1:10. Chunga & Cieza en 2017, encontraron dos microorganismos (*Bacillus spp* y *Clostridium spp*) en el humus de lombriz, que degradaron 0.8% de poliestireno en 3 meses. Durante un proceso de vermicompostaje se evaluó la degradación de compuestos bifenilospoliclorados (alcanos, cetonas, aldehídos y ésteres), obteniendo una eficiencia de remoción máxima del 60% (Vila, 2013). Asimismo, con el vermicompostaje del humus de lombriz se evaluó la degradación del Pentaclorofenol mostrando una remoción del 14% a 71.9%, esta degradación se atribuye a microorganismos de la familia *Pseudomonadaceae*, *Sphingobacteriaceae* y *Xanthomonadaceae* y la familia de hongos *Trichocomaceae* (Lin *et al.*, 2016).

El humus de lombriz contiene microorganismos capaces de degradar contaminantes orgánicos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales pesados como el cadmio y cromo. Se han realizado estudios sobre la degradación de



químicos sobre el suelo, empleando el humus, sin embargo, en las CEM resulta ser escasa la información encontrada, por lo cual es una excelente opción para investigar el efecto que estos microorganismos tendrán en contacto con el sistema bioelectroquímico en el tratamiento de agua residual alcalina de la industria aeronáutica.

### 1.3 Antecedentes del proyecto

Se conocen como aguas residuales a la mezcla de agua contaminada con partículas y/o sustancias que lleguen a alterar la composición, sabor, olor y propiedades del agua natural (Arriols, 2018). Existen diversos efluentes de aguas residuales, las cuales se pueden clasificar en a) domésticas, b) urbanas y c) industriales. Una de las principales fuentes que contamina al recurso hídrico es la industria; este sector tiene una gran repercusión económica y social, sin embargo, las consecuencias de la alta demanda y manufactura de diversos productos como los de la industria aeronáutica, repercuten en el medio ambiente, sobre todo en los recursos hídricos del país. Esto es porque dentro de la industria aeronáutica se llevan a cabo diversos procesos que ocasionan la generación de contaminantes, los cuales al entrar en contacto con el agua provocan que esta se contamine; el agua residual generada no debe incorporarse al medio ambiente sin un tratamiento acorde a los contaminantes agregados (Pierrat *et al.*, 2021). Después de darle un tratamiento a las aguas residuales es necesario utilizar diversos parámetros para determinar su calidad a través de la medición, gestión y regulación de estos parámetros, con el fin de no sobrecargar y/o contaminar al medio ambiente (Kesari *et al.*, 2021; Nathanson y Ambulkar, 2023).

### 1.3.1 El agua residual a nivel mundial

La calidad del agua es un aspecto sumamente importante para todos los seres vivos, en lo que respecta a la salud, el medio ambiente y la economía. Sin embargo, a medida que incrementa el número de personas en el mundo, trae consigo diferentes problemas hacia este sector, como la escasez del recurso, la contaminación y la mala distribución de éste. En ese sentido, se estima que unos 2100 millones de personas no tienen acceso a agua potable, aproximadamente 4500 millones de personas carecen de servicios de saneamiento salubres (OMS, 2017; UNICEF, 2017), y la escasez de agua afecta al 40% de los habitantes del planeta (OMS, 2016). Aunado a que se estima que a nivel mundial entre el 80 y 95% del agua residual se descarga directamente a los ríos, lagos y océanos sin recibir tratamiento previo (Conagua, 2017). Por esta razón, resulta cada vez más difícil asegurar que existan suministros hídricos seguros, suficientes y de buena calidad. Por ello, se deben buscar soluciones a la generación de la contaminación y al tratamiento de aguas residuales.

En cuanto a la generación de aguas residuales provenientes de la industria, se tiene que el 80% de éstas, regresan al ecosistema sin ser tratadas ocasionando que millones de personas hagan uso de agua contaminada con un alto riesgo de adquirir enfermedades (UN water 2021). México no está exento de la problemática asociada a la distribución y administración del recurso hídrico, por lo que es de interés el encontrar soluciones alternativas y sostenibles.

### 1.3.2 El agua residual en México

El rápido crecimiento demográfico y urbano en México ha llevado a un aumento significativo en la generación de aguas residuales. Las ciudades en expansión y las áreas urbanas densamente pobladas generan grandes volúmenes de aguas residuales que superan la capacidad de los sistemas de alcantarillado existentes. Esto ocasiona en desbordamientos de aguas residuales sin tratar, que contaminan

ríos, arroyos y otros cuerpos de agua cercanos. Además, la falta de infraestructura adecuada de tratamiento de aguas residuales es un grave problema en muchas partes del país (CONAGUA, 2023). Otro aspecto preocupante es la calidad de las aguas residuales generadas en México, la presencia de contaminantes como materia orgánica, nutrientes, metales pesados, productos químicos tóxicos y patógenos representa una seria amenaza para la salud humana y la biodiversidad acuática. Estos contaminantes pueden persistir en el agua y acumularse a lo largo del tiempo, lo que contribuye a la degradación de los ecosistemas acuáticos y afecta la disponibilidad de agua potable segura (Bashir *et al.*, 2020). La generación de aguas residuales también está estrechamente relacionada a la falta de conciencia y prácticas inadecuadas en el manejo del agua en diferentes sectores de la sociedad. La industria, la agricultura y los hogares a menudo generan aguas residuales con altas concentraciones de contaminantes debido a la falta de tecnologías apropiadas y prácticas sostenibles. Las aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias contienen elementos y sustancias químicas disueltas, así como sólidos suspendidos, en concentración variable, que cuando son vertidas sin tratamiento causan la contaminación de los cuerpos de agua superficiales (CONAGUA, 2017).

De acuerdo con el último Inventario Nacional elaborado por Conagua (CONAGUA, 2020), se cuenta con 2786 plantas en operación para el tratamiento de aguas residuales, con una capacidad instalada de  $196.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y un caudal tratado de  $144.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , en el caso de las aguas residuales municipales. Por otro lado, el sector industrial cuenta con 3397 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales; de ellas, 3375 se encuentran en operación y generan un caudal de tratamiento de  $71638 \text{ L s}^{-1}$ , que equivale al 63.1% de la capacidad instalada (CONAGUA, 2021). Sin embargo, la problemática recae en el tratamiento de aguas residuales, ya que es insuficiente, puesto que aún hay muchas zonas que no cuentan con programas de saneamiento adecuados.

En el marco legal mexicano aplicable a los límites máximos permisibles de cada contaminante que conforman a los diversos tipos de agua residual, esta

problemática ha disminuido con la implementación de reformas al artículo 4 (párrafos 5 y 6), 27 y 73 XXIX-G de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que dieron fundamento a la creación de un marco legal en materia ecológica. Esto a su vez dio origen a la promulgación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (CONAGUA, 2021).

### 1.3.3 Agua residual de la industria aeronáutica

La concentración de contaminantes, el pH, la temperatura, los coloides, los sólidos suspendidos, la materia coloreada (Chaparinia *et al.*, 2022), posiblemente microorganismos patógenos (Gautam *et al.*, 2021), y compuestos disueltos (minerales y orgánicos) (Sulej *et al.*, 2011) presentes en el agua, son el resultado del proceso de lavado de piezas para la detección y reparación de fallas en los componentes de la industria aeronáutica (Pérez 2019). Esta agua puede contener una amplia gama de contaminantes, como productos químicos, metales pesados, aceites y grasas, y otros materiales peligrosos; que se generan a partir de una variedad de procesos, los cuales son: (a) limpieza, (b) remoción del líquido penetrante, (c) inmersión, (d) enjuague, (e) post – enjuague, entre otros. Como resultante del proceso de limpieza e inspección se obtienen tres efluentes denominados; agua alcalina, agua ácida y agua neutra (ver figura 1), de los cuales el efluente de interés es el de agua alcalina (Pérez 2019).

En la tabla 1 se muestra la amplia gama de contaminantes presentes en el agua residual de industria aeronáutica.

**Tabla 1. Contaminantes presentes en el agua residual de la industria aeronáutica.**

Compuestos orgánicos volátiles	Estireno	Pentaclorofenol
Metales pesados	Clorobenceno	Resinas epóxicas
Compuestos orgánicos persistentes	Epiclorhidrina	Fenoles
Benceno	Butadieno	Antraceno
Bromoclorodifluorometano	Naftaleno	Fluoranos
Bromoformo	Tiocianato	Ciclohexanos
Bromotrifluorometano	Xileno	Tolueno
Bromuro de metileno	Pireno	Pentanonas
Sulfuro de polifenileno	Peróxidos	Siloxanos
Cianuro	Dieltrina	Polvos fibrogénicos
Hidrocarburos aromáticos	Endrina	Bencenoacetaldehído
Ésteres de ácido ftálico	Dimetilanilina	Aldehídos
Dodecanos	Dibutilftalato	Aceites

Fuente: Elaboración propia con datos de Mackulak *et al.*, 2016; Güven, *et al.*, 2017; Bandela, *et al.*, 2019.

Resulta imposible dar valores fijos a su composición, un parámetro importante que indica la disminución de la materia orgánica, es la medición de la DQO y del COT. Las aguas residuales industriales llegan a tener valores de DQO que, generalmente, presentan una resistencia orgánica  $> 1000 \text{ mg L}^{-1}$  de DQO (Asri *et al.*, 2019), (Buck 2000).

Ahora bien, aplicar un tratamiento al agua residual proveniente de cualquier industria no es una tarea sencilla, debido a la combinación de todos los contaminantes, su concentración y persistencia. En este sentido, varios investigadores han realizado estudios donde analizan el comportamiento de contaminantes de efluentes industriales del sector aeronáutico.

### 1.3.4 Proceso de limpieza y reparaciones de piezas de motores de la industria aeronáutica según la norma ASTM E - 1417 - 99

En esta norma se establecen los principales procesos para efectuar la limpieza y reparación de piezas en general de la industria aeronáutica, los cuales incluyen un examen a través de líquidos penetrantes que permiten detectar las fracturas, grietas y defectos de las piezas. En estos procesos se llegan a utilizar grandes cantidades de agua, algunas con diferentes temperaturas, otras a alta presión que al final de cada etapa se llevan consigo diversos compuestos que se derivan de los tratamientos que se realizan a las piezas. Estos contaminantes pueden ser aceites emulsificados, hidrocarburos aromáticos policíclicos y trazas de metales. La figura 3 muestra las diferentes etapas del proceso de inspección por líquidos penetrantes que se realiza en el sector aeronáutico.

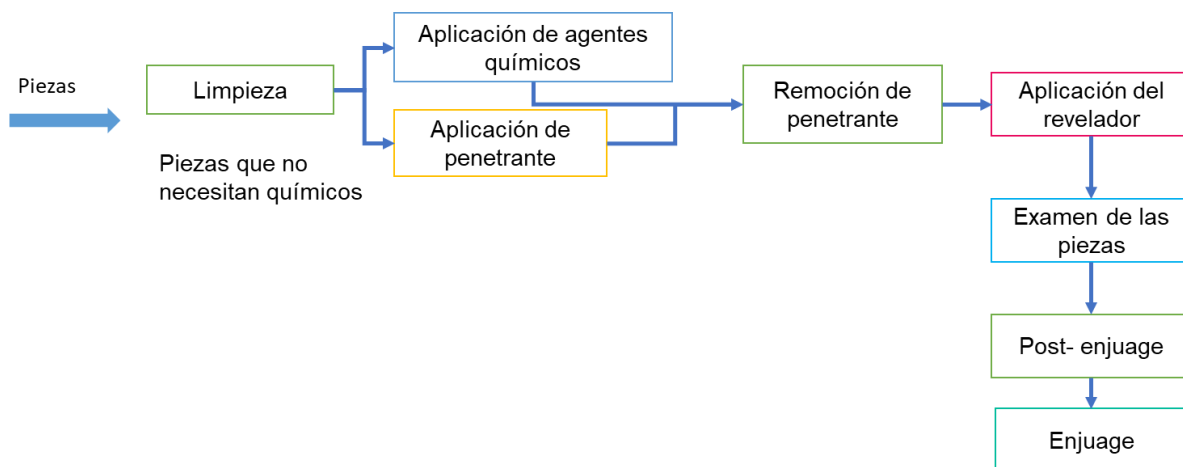


Figura 3. Etapas del examen por líquidos penetrantes. Fuente elaboración propia con datos de ADEMINSAC, 2011.

#### 1.3.4.1 Procedimiento resumido de las etapas del proceso:

- Limpieza: todas las piezas a inspeccionar deben estar limpias de grasa, corrosión, pintura, recubrimientos, polvo, residuos químicos, etc. Para remover todas estas impurezas se realiza una limpieza (a) con solventes, (b) ultrasónica, (c) mecánica y (d) química.

- Aplicación de agentes químicos: se realiza cuando existe evidencia de que, en la limpieza previa, el tratamiento superficial, o el uso en servicio ha producido una condición superficial que altere la interpretación con líquidos penetrantes.
- Aplicación de penetrante: A menos que se especifique otra cosa, la superficie de los componentes debe cubrirse completamente con el penetrante. Los componentes grandes pueden ser inspeccionados en secciones. Los penetrantes se aplican por atomizado, inmersión, brocha u otro método que provea la cobertura requerida. La temperatura del líquido penetrante debe de estar en el intervalo de 4 a 52 °C (40 a 125 °F) con un tiempo de exposición de 10 a 20 min, a menos que se especifique otra condición.
- Remoción de penetrante: los penetrantes son removidos de forma manual o automática con un atomizado de agua, remoción manual con tela (trapeado manual) o un lavado por inmersión y agitación con aire. La presión adecuada del agua para remover el penetrante debe ser usado de tal manera que no debe exceder de 40 PSI (275 kPa). La temperatura del agua debe estar entre 10 a 38 °C (50 a 100 °F). Cuando se emplean pistolas hidroneumáticas, la presión del aire no excederá los 25 PSI (172 kPa) y se debe usar un atomizado grueso a una distancia mínima de 30 cm (12 in) entre la pistola y la pieza.
- Aplicación de revelador: aplicar el líquido revelador y esperar a que se marquen las piezas donde se encuentren los defectos. Los componentes deben estar secos antes que el revelador sea aplicado.
- Examen de las piezas: examinar la presencia de fisuras y/o fracturas de las piezas.
- Pos-enjuague y enjuague: si se utiliza un enjuague de inmersión agitado, el tiempo de emulsificación, debe ser el mínimo requerido para remover el penetrante emulsificado. Examine los componentes bajo una iluminación apropiada después del enjuague. Limpie y reprocese aquellos componentes con excesivo fondo. Después del enjuague, drene el agua de los componentes y

utilice un reposicionador de succión, o el repaso de la superficie con materiales absorbentes limpios o chorro de aire filtrado a menos de 25 PSI (172 kPa).

El uso de grandes cantidades de agua, así como la contaminación de esta, es inevitable para el cumplimiento de esta norma de limpieza en el proceso de reparación de piezas, de ahí que se derivan a otras normas para regular los límites máximos permisibles de las descargas de agua.

### 1.3.5 Normatividad mexicana aplicable

En México, al igual que en muchos otros países, la normatividad relacionada con el tratamiento de aguas residuales ha evolucionado a lo largo de los años con el propósito de regular los procedimientos necesarios para el tratamiento adecuado de estas aguas. Esta normatividad abarca una variedad de leyes, reglamentos y normas oficiales mexicanas, como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley de Aguas Nacionales y el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de Aguas Residuales, entre otros. Además, se destacan normas específicas aplicables al tratamiento de aguas residuales en la industria aeronáutica (tabla 2).



**Tabla 2. Normatividad mexicana aplicable en este estudio.**

<b>Norma</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Contaminantes que regula</b>
NORMA OFICIAL MEXICANA-001-SEMARNAT-2021.	Regular las concentraciones en los cuerpos de agua, garantizando la calidad y los usos adecuados a este recurso.	Tiene por objeto establecer los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, con el fin de proteger, conservar y mejorar la calidad de las aguas y bienes nacionales, además de incluir la medición de contaminantes básicos como las grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, DQO, nitrógeno total, pH, COT, y temperatura.
NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-165-SEMARNAT 2013.	Regular las concentraciones en los cuerpos de agua, garantizando la calidad y los usos adecuados a este recurso, respecto a 200 sustancias que son de interés prioritario.	Contiene una lista de 200 sustancias en el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes Reactivos, Tóxicos, y Explosivos que son de competencia federal, indicando las clasificaciones de efectos que pueden provocar en el ambiente con base a las concentraciones.
Reglamento de la ley federal para la prevención y gestión integral de residuos.	Para el manejo adecuado de los residuos peligrosos como los hidrocarburos, para su tratamiento, reciclaje, reutilización, co-procesamiento o disposición final.	Hidrocarburos aromáticos policíclicos, contaminantes orgánicos, residuos peligrosos.

Asimismo, la normatividad mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residual, los cuales varían dependiendo de la zona geográfica y el uso del agua. Estos límites están basados en estudios científicos y técnicos, cuyo objetivo es proteger la calidad del agua y evitar daños a la salud humana y al medio ambiente.

Cabe destacar que la normatividad mexicana establece sanciones y medidas correctivas en caso de incumplimiento de las regulaciones para las descargas de agua residual. Estas sanciones pueden incluir desde sanciones económicas hasta la suspensión o clausura de las instalaciones que generen las descargas, dependiendo de la gravedad y frecuencia de las violaciones.

### 1.3.6 Tratamiento del agua residual de la industria aeronáutica

La industria aeronáutica tiene una gran influencia en diferentes lugares del mundo, por esta razón, diferentes autores y empresas han desarrollado técnicas, trenes de tratamiento y proyectos que ayudan a disminuir la concentración de los contaminantes; entre ellos se encuentra: a la empresa J. Huesa 2021 *water technology*, que está ubicada en España y quienes proponen dar un pretratamiento mediante un sistema de filtración en bicapa, con un caudal de trabajo de  $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  en el que quedan retenidos los sólidos suspendidos y después se prosigue al tratamiento por ósmosis inversa, posteriormente pasa por un sistema de intercambio iónico compuesto por un equipo desmineralizador del tipo catión – anión con un caudal de  $40 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Previo a este paso, el agua pasa por un filtro de carbón activado y por último se separan los componentes mediante evaporización a presión y los contaminantes que quedan en los lodos, que finalmente, reciben un tratamiento adecuado para quitar los contaminantes.

Pérez en 2019, estudió la ingeniería básica de una planta depuradora de este tipo de aguas, donde expone que existen dos tipos de procesos; los baños alcalinos y los baños ácidos, ver figura 4.



En España se encuentra otra empresa llamada SIEBEC GROUP, se dedican al tratamiento de aguas residuales que contienen aceites emulsificados. El tratamiento se hace a través de filtros por coalescencia o separación de las partículas a través de una serie de filtrado. Algunas ventajas que cabe destacar es que se puede recuperar algunas partículas de producto inicial y reutilizarlas, las desventajas son que, al separar los contaminantes del agua, se obtiene un precipitado que se convierte en un lodo tóxico al cual se le debe dar otro tratamiento, aunado al elevado costo de los filtros. En 2010 Meas *et al.*, añadieron el proceso de electrocoagulación al proceso convencional de tratamiento de aguas de la industria aeronáutica, donde se logró remover el 95% de la DQO, el 99% del color y el 99% de la turbidez en el agua residual descargada. Tuvieron que ajustar ciertos parámetros como el pH, para poder alcanzar estos porcentajes de degradación. Otro estudio reportado es el de Xu *et al.*, 2013 donde los autores presentan una evaluación de los tratamientos aplicados en una planta tratadora del aeropuerto internacional de Longjía China, que consistieron en eliminar los residuos líquidos a través de un tratamiento desinfectante; después a los residuos se les dio un tratamiento por lodos activados con ajuste de pH. Para hacer el análisis de la eficiencia de degradación, se dividieron los contaminantes en dos categorías, los de primera clase que incluían metales pesados como el níquel, arsénico, mercurio, cadmio, cromo, benzo(a) pireno y los de segunda clase que adjuntan compuestos fenólicos volátiles, nitrobenzenos, nitrógeno amoniacal entre otros. Demostraron que los de la primera categoría podían degradarse y cumplir con la normatividad, sin embargo, con los de la segunda categoría no se podían degradar en su totalidad. Por otro lado, en Perú, Salas en 2018 dio tratamiento por fotocatalisis heterogénea a aguas residuales contaminadas con aceite de motores que resultan del lavado de estas piezas. Se obtuvo una remoción de DQO del 80% en presencia de luz solar y 60% en días nublados. López *et al.*, (2018) dieron tratamiento a los tres tipos de aguas (ácida, neutra y alcalina) a través de la electrocoagulación a nivel laboratorio. Mostraron que, si el agua se trata directamente al salir del proceso, es decir, que no se le dé ningún tratamiento previo, no es posible disminuir la concentración de los contaminantes, el color, ni la turbidez; en resumen la electrocoagulación no es un

método para limpiar el agua residual aeronáutica, debido al pH y a la conductividad eléctrica que presenta al finalizar el proceso. Posteriormente, realizaron un ajuste de pH a cada muestra de agua, aplicaron el mismo proceso de limpieza y observaron que el porcentaje de remoción de materia orgánica y de color disminuyeron significativamente cuando los experimentos duraban 20 min de tratamiento, a mayor tiempo la DQO aumentaba.

Como se ha observado en los antecedentes del tratamiento de aguas residuales de industria aeronáutica, no solo los altos costos del proceso pueden ser una limitante para determinar el uso de cierta tecnología, ya que la generación de subproductos con un alto impacto ambiental, independientemente de su cantidad, será otro factor que limite su aplicación. Por ello, la comunidad científica está buscando la aplicación de tecnologías que incluyen la incorporación de microorganismos, como los sistemas bioelectroquímicos, en específico, las celdas de combustible microbianas (CCM), celdas de electrólisis microbianas (CEM), reactores biológicos (RB), etc. Se ha demostrado en dichos estudios que el uso de electrodos promueve el crecimiento de los microorganismos, permite el monitoreo del comportamiento del sistema y la medición de parámetros que ayudan a interpretar lo que sucede en cuestiones de generación de energía eléctrica, crecimiento microbiano, determinación de área electroactiva de los microorganismos y eficiencias de energía y de degradación. Sin embargo, hasta la fecha no hay estudios reportados que utilicen CEM y el comportamiento de microorganismos para la degradación de efluentes de la industria aeronáutica; solo se encuentra la degradación de algunos contaminantes por separado o diversos trenes de tratamiento (García *et al.*, 2019; Mohammadi *et al.*, 2020; Castanares 2021).

### 1.3.7 Celdas de electrólisis microbianas

Las celdas de electrólisis microbianas son tecnologías que utilizan microorganismos para generar electricidad a partir de la oxidación de la materia orgánica disuelta en las aguas residuales. La tecnología se basa en una interacción simbiótica entre

microorganismos que oxidan la materia orgánica y producen electrones que son transferidos al electrodo y generan una corriente eléctrica (Gautama *et al.*, 2023). Tienen muchas ventajas sobre las tecnologías tradicionales de tratamiento de agua, por un lado, la tecnología se puede utilizar para generar electricidad, que puede ser una fuente de ingresos para las plantas de tratamiento de aguas residuales. Además, la tecnología no utiliza productos químicos, lo que la hace respetuosa con el medio ambiente y reduce los costes operativos. Adicionalmente, el tratamiento se puede dar de manera simultánea en los contaminantes, es decir, que se pueden tratar varios contaminantes en la misma celda, además, hay menor generación de lodos, y existe la posibilidad de recuperar metales, biomasa, productos de valor agregado etc (Alonso *et al.*, 2008; Pozo-Antonio *et al.*, 2017).

#### 1.3.8 Importancia del electrodo anódico en el tratamiento de aguas residuales

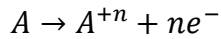
Existen diferentes tipos de materiales usados como electrodos en CEM, los que presentan mayor eficiencia de degradación, conductividad eléctrica son el platino, oro, paladio, plata (Hussain *et al.*, 2022). En la búsqueda de nuevos materiales se encuentran otros materiales como el aluminio, el hierro, el rodio, cobre, níquel y acero inoxidable estos electrodos suelen ser un poco más baratos, pero cuando son empleados por un periodo largo presentan corrosión, además, de que algunos como el cobre suelen ser tóxicos para los microorganismos (Simoska *et al.*, 2021). En este sentido, la comunidad científica ha sugerido y utilizado otros materiales basados en carbono como el grafito, tela de carbón, papel carbón, fieltro de carbón, fieltro de grafito, entre otros y que han permitido tener una buena interacción con los microorganismos, permiten la transferencia de electrones, el desarrollo de una biopelícula, son abundantes, algunos son económicos, y son fáciles de adquirir, (Rao y bashambu 2021; Kumari *et al.*, 2022).

Al hacer una comparación de estos materiales de electrodos, los que resultan ser una mejor opción para aplicarlos a la mineralización de contaminantes son los fieltros de carbono. La tela de carbono y el papel de carbón resultan ser costosos

(\$1300 por 1 m en tela de carbono y \$6400 por 1 m de tela de papel carbón), en datos de Amazon y mercado libre, lo cual limita al sistema, ya que el costo es proporcional a la cantidad de efluente a tratar. Ahora bien, el grafito cuando se utiliza en procesos que involucran agentes químicos o físicos, puede ayudar a que se den reacciones electroquímicas que ocurren en la superficie del grafito, el cual genera radicales libres y otros compuestos oxidantes que pueden degradar contaminantes orgánicos presentes en el agua, pero no hay muchos estudios relacionados con los contaminantes de interés, además de que existen tipos de grafito (grafito natural, artificial, expandido, pirolítico, turbostráctico y de alta pureza) (Zhang *et al.*, 2021). Es importante mencionar que los materiales a base de carbono se utilizan generalmente en ánodos para las CEM porque poseen estabilidad química, porosidad y conductividad electrónica (Li *et al.*, 2017). Desafortunadamente, los materiales a base de carbono puro tienen poca actividad electrocatalítica hacia las reacciones redox en bacterias (You *et al.*, 2017; Zhong *et al.*, 2019). Comparativamente, muchos óxidos o carburos de metales de transición, como RuO<sub>2</sub>, CoO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub>, Mo<sub>2</sub>C, y NiO, exhiben una mejor actividad electrocatalítica y se han empleado para modificar los ánodos basados en carbono mejorando la densidad de potencia de salida de las CEM, a la vez que disminuye la materia orgánica disuelta en el agua residual (Lv *et al.*, 2012; Zhong *et al.*, 2018a).

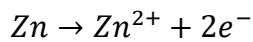
### **Función del Ánodo y Reacciones Moleculares Asociadas**

El ánodo desempeña un papel fundamental en sistemas electroquímicos, donde su función principal reside en actuar como el sitio donde se llevan a cabo las reacciones de oxidación, contribuyendo así a la generación de corriente eléctrica. Estas reacciones poseen un carácter intrínseco para el adecuado funcionamiento de dispositivos electroquímicos, tales como baterías y celdas de combustible, y su naturaleza a nivel molecular reviste una importancia significativa. En el ánodo, se manifiesta la reacción de oxidación, que implica la cesión de electrones por parte de una especie química. Una reacción general que ejemplifica este proceso se expresa como sigue:



Reacción 3

Donde "A" representa la sustancia química presente en el ánodo, "A<sup>+n</sup>" denota los iones resultantes de la oxidación de "A", y "ne<sup>-</sup>" representa los electrones liberados en el proceso. Un ejemplo concreto podría ser la reacción de oxidación del zinc en una batería de zinc-carbón:



Reacción 4

Esta transformación molecular es esencial, ya que crea una diferencia de potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo, lo que permite la generación de un flujo de electrones a través de un circuito eléctrico externo, produciendo así una corriente eléctrica utilizable. Para cumplir eficientemente su cometido, el ánodo debe exhibir propiedades moleculares específicas. Debe ser capaz de facilitar la transferencia de electrones de manera expedita y, al mismo tiempo, mantener una resistencia a la corrosión adecuada.

Ahora bien, en algunos microorganismos, como las bacterias exoelectrogénicas, las reacciones redox ocurren principalmente fuera de las células microbianas, estos microorganismos secretan moléculas orgánicas o compuestos redox mediadores que facilitan la transferencia de electrones desde la célula hacia el ánodo de la CEM. Este proceso, denominado transferencia de electrones extracelulares (EET), es ejemplificado por bacterias como *Geobacter sulfurreducens*, que utilizan citocromos y flavinas para mediar en la transferencia de electrones hacia el ánodo, en este caso, las reacciones redox transcurren en una interfaz extracelular, lo que demuestra la capacidad única de las bacterias exoelectrogénicas para interactuar directamente con los electrodos. Por otro lado, existen microorganismos, como las llamadas bacterias conductivas, que poseen nanocables microbianos, estructuras proteicas que funcionan como auténticos "cables biológicos", estos nanocables permiten que los electrones generados en el metabolismo intracelular fluyan directamente desde el interior de la célula hasta el ánodo de la CEM. En este caso, las reacciones redox tienen lugar intracelularmente, ya que los electrones son transferidos desde las rutas metabólicas hacia el ánodo a través de estos nanocables biológicos, sin necesidad de mediadores extracelulares.



La selección cuidadosa de materiales anódicos y, en ocasiones, la aplicación de recubrimientos protectores, contribuyen a garantizar estas características moleculares deseables. En la tabla 3 se presentan algunos ejemplos de electrodos de carbono modificados con óxidos metálicos de transición.

<b>Tabla 3. Electrodos modificados con óxidos metálicos para mineralizar contaminantes a través de CEM.</b>					
<b>Material del electrodo</b>	<b>% de degradación DQO</b>	<b>Tipo de contaminante o agua residual tratada.</b>	<b>Densidad de potencia (W m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Referencia</b>	
NiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> soportado en grafito	56	DQO de aguas residuales industriales	0.439	Ortiz <i>et al.</i> , 2019	
Óxido de grafeno soportado en ZnO	91.07	Pb <sup>+2</sup>	0.135	Yaqoob <i>et al.</i> , 2021d	
Nanoescamas de Co, soportado en papel carbón	16.20	DQO de aguas residuales de la industria alimentaria.	0.133	Mohamed <i>et al.</i> , 2017	
Co soportado en papel de carbón	57.8 – 100	DQO de aguas residuales de una planta de tratamiento de corea del sur.	0.165	Mohamed <i>et al.</i> , 2018a	
Fe soportado en papel carbón	40 – 90		0.117		
Fe/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en fieltro de carbono	88.50	DQO de aguas residuales de contaminantes orgánicos	0.97	Mohamed <i>et al.</i> , 2018b	
Fe/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en grafito	76.60		0.36		
Fe/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en tela de carbono	65.50		0.2		
Oxido de grafeno en varilla de grafito	91.07	Plomo	0.0135	Yaqoob <i>et al.</i> , 2021b	
Fieltro de grafito soportado en nanopartículas de Co-CoO	88.90% COT y 70% de degradación de colorante		-	Sun <i>et al.</i> , 2019	

MnO <sub>2</sub> en fieltro de carbono	36	Alcanos de petróleo crudo	0.047	Nandy <i>et al.</i> , 2020
ZnO/GO en varillas de grafito	98 y 99	Cromo y níquel	0.000912	Yaqoob <i>et al.</i> , 2021c
Carbono mesoporoso ordenado cobalto y nitrógeno (Co - N-OMC)	81	DQO de aguas residuales	0.389 ± 24	Zhuang <i>et al.</i> , 2020
Ni/MnO <sub>2</sub> en fieltro de carbón	58.2 y 92.5	DQO y tinte (naranja de metilo)	0.628	Zhong <i>et al.</i> , 2018 <sup>a</sup>
Fieltro de carbón soportado en Co - N - C	71.5	DQO aguas residuales	0.578	Li <i>et al.</i> , 2019
NiO/polianilina en fieltro de carbón	64.24 y 95.94	DQO y tinte (rojo brillante)	1.078	Zhong <i>et al.</i> , 2018b

El níquel en diferente composición (hidróxido, óxido, sulfuro) ha sido empleado como electrodo y/o catalizador en el tratamiento de aguas residuales, gracias a que puede eliminar metales pesados, compuestos orgánicos y otros contaminantes. En un estudio reciente, el hidróxido de níquel se utilizó para descomponer colorantes a través de la adsorción (Jinhua *et al.*, 2021), donde se llegó a una remoción de hasta el 78%. En el estudio de Aćimović *et al.*, 2017 se utilizaron placas de Ni como electrodos para tratar hidrocarburos aromáticos policíclicos, en donde se logró una tasa de eliminación de DQO del 25% a 30% para el fenantreno, fluoreno, pireno, benzo (a) pireno y benzo (a) antraceno en los primeros 10 min de oxidación electroquímica, y después de 60 min se obtuvo una degradación de 50% a 70%.

Por otro lado, el níquel es una alternativa sostenible a los métodos convencionales de producción de electricidad, presenta alta resistencia a la corrosión, tiene buena conductividad tanto eléctrica como térmica, es estable en medios alcalinos y es biocompatible con los microorganismos, lo cual permite aprovechar las fuentes renovables de compuestos orgánicos sin producir emisiones contaminantes (Rituja *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019). El níquel se ha empleado para generar energía eléctrica y dar tratamiento a aguas residuales de desechos agrícolas y residuos industriales (Aćimović *et al.*, 2017; Yunjin 2018; Kumar *et al.*, 2022). Esto lo convierte en una opción atractiva para la producción de energía renovable y

sostenible. Sin embargo, es importante considerar que al utilizar níquel en CEM requiere un conocimiento profundo de la electroquímica, ya que es necesario controlar cuidadosamente las condiciones del sistema para maximizar su eficiencia. Esto incluye el control de la composición del níquel y la corriente eléctrica, así como la selección de microorganismos adecuados para el tratamiento (Nourbakhsh *et al.*, 2017; Kather *et al.*, 2022). En estudios recientes, se ha demostrado que el níquel puede ser utilizado en combinación con otros materiales catalíticos para mejorar aún más la eficiencia de remoción y la capacidad de generación de electricidad en CEM (Włodarczyk, P. & Włodarczyk B. 2019; Geetanjali & Kundo 2022). En un estudio se utilizó un método de crecimiento sin plantilla para crear una película de NiO altamente porosa. El volumen mesoporo, la gran área de superficie, así como el pequeño tamaño de cristal de la película anódica de NiO promueven la cinética de reacción, la adsorción, y la penetración de electrolitos (Zhang *et al.*, 2016).

Existen varios métodos para depositar metales en la superficie del electrodo, sin embargo, se busca adherir una película de micropartículas de Ni, para ello se pueden realizar varios métodos, donde; una de las técnicas más comunes es la deposición electroquímica, donde se utiliza una solución electroquímica que contiene iones de Ni, y mediante la aplicación de una corriente eléctrica controlada, se induce la deposición del metal sobre el electrodo. Otra opción es la deposición química en fase vapor (CVD), por sus siglas en inglés que implica la reacción de un precursor gaseoso que contiene Ni con el sustrato a altas temperaturas, formando una película en la superficie del electrodo. Otro método utilizado es la deposición por inmersión, donde el electrodo se sumerge en una solución que contiene iones de Ni y, mediante la difusión de los iones hacia el electrodo, se forma una capa superficial de Ni. La deposición por pulverización catódica es otra técnica ampliamente empleada, en la cual se bombardea un blanco de Ni con iones para liberar átomos de Ni que se depositan sobre el electrodo (Rausch *et al.*, 2020).

También está la deposición física de vapor (PVD), este método se utiliza para formar películas de metales en los electrodos, consiste en la evaporación de un material de partida sólido, en este caso, Ni, mediante la aplicación de calor o el bombardeo

de iones sobre el blanco de Ni. Los átomos de Ni evaporados se condensan y se depositan sobre el electrodo, formando una película delgada y uniforme. La deposición física de vapor ofrece varias ventajas sobre otros métodos, como tener alta pureza de la película, uniformidad del material con el depósito, bajo nivel de contaminación del material, una buena adherencia al sustrato, poca generación de residuos en comparación con otras técnicas, así como la capacidad de controlar con precisión el espesor de la película mediante la regulación del tiempo de deposición. Por estas ventajas, es que se decidió trabajar con esta técnica, ya que tiene una alta capacidad para producir películas de calidad, con propiedades uniformes y una excelente adherencia al sustrato (Guo *et al.*, 2018).

#### 1.4 Justificación

Uno de los problemas ambientales más preocupantes en los últimos tiempos, tiene que ver con la calidad y disponibilidad del agua potable, la cual ha ido disminuyendo debido a las diversas actividades antropogénicas. Dentro del ámbito de la industria aeronáutica, se llevan a cabo procesos altamente especializados que abarcan desde la fabricación de componentes hasta la detección y corrección de imperfecciones, especialmente cuando los motores han alcanzado su límite de horas de vuelo. En este contexto, se realiza un proceso de rectificación y reparación para evaluar y mejorar la condición actual de dichos motores, abordando el desgaste acumulado, el cual genera agua residual con alta carga orgánica, que requiere de tratamientos especiales para poder disponer de ella en un segundo uso. Entre los tipos de agua residual de reparaciones generada por la industria aeronáutica está el agua alcalina, la cual tiene alta carga de materia orgánica, grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, y metales pesados, los cuales de ser vertidos de manera indiscriminada a los diferentes cuerpos de agua, podrían generar un impacto ambiental que a lo largo del tiempo afectaría la sobrevivencia de la humanidad y también se tendría un alto impacto en la biodiversidad y ecosistemas. Una manera de mitigar esta problemática es aplicar un tratamiento adecuado a este tipo particular de agua, por lo que en el presente trabajo se propone

un sistema de tratamiento utilizando celdas de electrólisis microbianas. Con las CEM se busca eliminar de manera parcial o total la carga orgánica presente en el agua residual de la industria aeronáutica. Asimismo, cabe mencionar que para mejorar la eficiencia de degradación en las CEM se utilizarán electrodos de fieltro de grafito con una película metálica de óxidos de níquel (NiO). Además, se ha encontrado que los electrodos de fieltro de grafito con NiO son una excelente opción en virtud de que presentan una mayor resistencia a la corrosión y una mayor estabilidad mecánica y térmica, lo que les confiere una mayor durabilidad y eficiencia en la eliminación de contaminantes orgánicos presentes en el agua residual (Zeng *et al.*, 2018; Ortiz-Martínez *et al.*, 2019).

### 1.5 Hipótesis

El uso de electrodos de fieltro de grafito recubiertos con NiO en el ánodo de una celda de electrólisis microbiana, puede contribuir a la degradación de contaminantes orgánicos presentes en el agua residual alcalina de la industria aeronáutica.

### 1.6 Objetivo general

Caracterizar el funcionamiento de las celdas de electrólisis microbianas, empleando electrodos flexibles de fieltro de grafito recubiertos de NiO, en el tratamiento bio-electroquímico del agua residual alcalina proveniente de las reparaciones en la industria aeronáutica.

### 1.7 Objetivos específicos

1. Depositar el recubrimiento de NiO a través de la técnica de PVD y caracterizar los electrodos de fieltro de grafito, mediante técnicas de caracterización (difracción de rayos X (DRX), difracción de espectroscopía

Raman, y microscopia electrónica de barrido (MEB) para ver su estabilidad física y estructural antes y después de ser expuestos al agua residual.

2. Definir las condiciones óptimas de operación para el tratamiento del agua residual alcalina de la industria aeronáutica mediante CEM.
3. Realizar un tratamiento al agua residual alcalina incorporando electrodos de fieltro de grafito modificados con una película de NiO a las CEM, y evaluar la eficiencia de remoción de compuestos orgánicos a través de la reducción del DQO, COT, pH y conductividad eléctrica en un periodo de tiempo de 10 días.
4. Analizar el sistema a través de voltamperometría cíclica, espectroscopía de impedancia electroquímica, cronoamperometría para observar el comportamiento de los microorganismos en presencia de los contaminantes.

## 1.8 Metodología de la investigación

En este apartado de la investigación, se realizó la revisión bibliográfica constante respecto a cada uno de los procesos incluidos para lograr los objetivos planteados. Todos los experimentos se repitieron tres veces para obtener valores promedio. La metodología de la investigación se desarrolló en diferentes etapas:

### **Etapa 1. Preparar el electrodo de trabajo de FG y NiO/FG**

Antes de utilizar el fieltro de grafito (FG) se le dio un tratamiento oxidativo para reducir su capacidad hidrofóbica y mejorar su actividad electroquímica. El tratamiento consistió en cortar los electrodos de FG de 4 cm<sup>2</sup>, se realizó un lavado con acetona y etanol en el baño ultrasónico durante 15 min cada uno. Posteriormente, se introdujeron en una solución de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 98%, Orión Productos Industriales, S.A. de C.V.) 0.5 M durante 3 h, se lavó con agua desionizada y el exceso de agua se dejó secar a temperatura ambiente para posteriormente secarlos a 90 °C por tres días en un horno marca ZJMZYM y modelo DZF-6020A.

Después del tratamiento oxidativo del FG se depositó a realizar una deposición de níquel en forma de película con el reactor de DFV con marca INTERCOVAMEX y

modelo 2000 donde se aplicó una presión de  $1 \times 10^{-3}$  torr, con 200 W de potencia en el cátodo, en atmósfera de nitrógeno de pureza 99.99%, marca infra, modelo 8.5 durante 2 h, obteniendo el electrodo NiO/FG.

## **Etapa 2. Tratamientos aplicados al agua residual alcalina**

Se evaluó la actividad catalítica de los microorganismos de la composta del humus de lombriz en el consumo del acetato de sodio con pureza de 99.6 % y marca J. T. Baker en presencia del FG y del NiO/FG. El consumo del sustrato se siguió a través de la DQO y el COT.

La extracción de microorganismos del lixiviado de composta (marca Hortaflo) se realizó de acuerdo con lo reportado por Cercado *et al.*, (2013), la celda en estudio consistió en 50 mL de acetato 0.01 M y 6 mL de lixiviado de composta.

**Etapa 3. Evaluar la actividad catalítica del FG y del NiO/FG en presencia del agua residual alcalina de industria aeronáutica (ARA).** Los microorganismos y electrodos se obtuvieron de acuerdo con la etapa 1 y 2 antes mencionadas. En esta etapa se desarrolló la matriz experimental que se muestra en la tabla 4.

<b>Tabla 4. Matriz experimental para el tratamiento de ARA en celdas de electrólisis microbiana.</b>			
Tratamiento	Electrodo	Microorganismos	pH
Biodegradabilidad	No aplica	Si	7
			9
Electroquímico	FG	No	7
			9
	NiO/FG		7
			9
Bioelectroquímico	FG	Si	7
			9
	NiO/FG		7
			9

## Celda de electrólisis microbiana

El electrodo de trabajo, dependiendo del experimento fue FG o NiO/FG, como contraelectrodo se empleó una malla de acero inoxidable (Marca: aceros continentales, con una abertura de 0.27 mm y 12 x 64 fibras de acero) y el electrodo de referencia de Ag/AgCl con KCl saturado, ver figura 5. La celda en estudio consistió en 50 mL de agua residual alcalina de industria aeronáutica y 3 mL de lixiviado de composta. Los experimentos se realizaron a temperatura controlada (27 °C) mediante el uso de calentadores de agua que fueron sumergidos en una tina con agua, donde se colocaron las celdas (tipo baño maría) durante 10 días, los experimentos realizados a pH 7 fueron ajustados con 0.5 mL de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>, 98%, J. T. Baker).

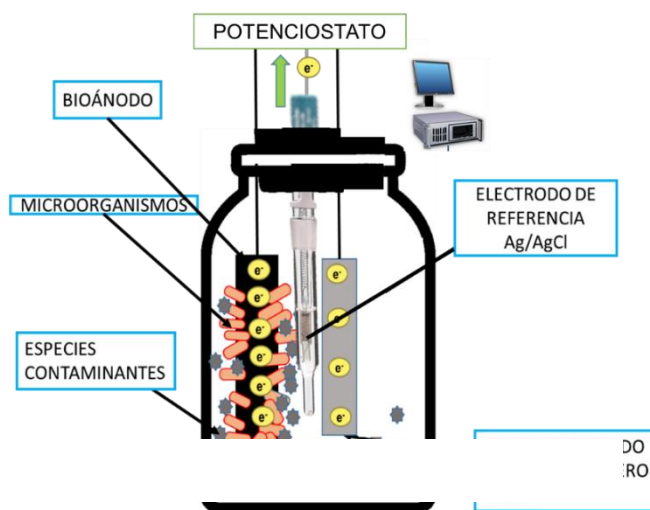


Figura 5. Representación gráfica de la celda de electrólisis microbiana.

En la figura 5, se muestra la representación de una celda de electrólisis microbiana, tal como se instalaron en la experimentación de esta investigación. El comportamiento de las celdas electroquímicas y bioelectroquímicas fue monitoreado a través de diversas técnicas electroquímicas, aplicadas con un potencióstato marca Biologic, modelo VSP-300 utilizando el programa de cómputo



EC-Lab. Se midió el potencial a circuito abierto (PCA) para determinar el potencial de equilibrio ( $E_{eq}$ ) que se aplicará para iniciar la VC. La VC se realizó de -0.7 a 0.7 V vs. Ag/AgCl KCl sat y -0.6 a 0.6 V vs. Ag/AgCl KCl sat a una velocidad de barrido de 5 mV/s. La CA se realizó a 0.2 V vs. Ag/AgCl KCl sat durante los 10 días de experimento. La EIE se midió en una frecuencia de 10 KHz a 100 mHz, en una amplitud de 10 mV, la medición se realizó durante 30 min. El PCA, la VC y la EIE se realizaron al iniciar y terminar los experimentos. A través de la VC con la ecuación de Randless Sevcik en presencia del sistema:  $(Fe(CN)_6^{3-} + 1e^- \rightarrow Fe(CN)_6^{4-})$  ferrocianuro  $\rightarrow$  ferricianuro en una concentración de 10 mM, como lo han hecho varios autores (Queiroz *et al.*, 2018), ver anexo G, se calculó el área electroactiva del FG y del NiO/FG para normalizar la corriente. En la figura 13 se muestra todo el desarrollo experimental.



Figura 6. Resumen de la metodología.

En la figura 6, se encuentra un resumen de las etapas de la metodología, de las cuales, la primera etapa es ilustrativa para la deposición física de vapor, donde se prepara el electrodo de trabajo, antes de ser utilizado, seguido de la siguiente etapa donde se obtiene el lixiviado y se hace la instalación de las celdas biológicas,

electroquímicas y bioelectroquímicas para el tratamiento correspondiente del agua residual, después, se lleva a la siguiente etapa del monitoreo de los experimentos a través de técnicas electroquímicas, caracterización de los electrodos por técnicas cristalográficas y por último, la medición de parámetros fisicoquímicos, para determinar la eficiencia de los procesos de degradación a los que fue sometida el agua residual.

Asimismo, en la tabla 5 se mencionan los métodos, equipos y parámetros utilizados para determinar la presencia de la materia orgánica en el agua residual alcalina de la industria aeronáutica.

<b>Determinación</b>	<b>Método</b>	<b>Condiciones</b>	<b>Equipo</b>	<b>Norma</b>
DQO	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
COT	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 T	Electrométrico con potenciómetro	NA	Medidor multiparamétrico OAKTON PCD650. Potenciómetro marca Conductonic modelo PH140	NMX-AA-008-SCFI-2016. NMX-AA-007-SCFI-2013
Conductividad	Conductimétrico	NA	Medidor de conductividad HACH Pocket Pro (HR)	NMX-AA-093-SCFI-2018
Espectroscopía de fluorescencia	Espectrofotométrico	$\lambda_{\text{excitación}}= 500 - 200 \text{ nm}$ slit= 5 nm, $\lambda_{\text{emisión}}=250 - 600 \text{ nm}$	Espectrofotómetro de fluorescencia Agilent technologies modelo Cary Eclipse	
Espectroscopía UV-VIS	Espectrofotométrico	$\lambda= 190 - 700 \text{ nm}$	Espectrofotómetro UV-VIS HACH modelo DR-6000	

Fuente de elaboración: propia.

El agua residual de la industria aeronáutica empleada no recibió pretratamiento fisicoquímico, ni biológico, se utilizó en las condiciones y características de la fuente original. Sin embargo, el agua se conservó en recipientes de vidrio en refrigeración.

### **Conclusiones parciales del capítulo 1.**

Se muestra una perspectiva general de los antecedentes aplicables al funcionamiento de las tecnologías bioelectroquímicas para el tratamiento de diferentes tipos de agua residual, aunado a la investigación con diversos materiales, como lo es el NiO. Se abordaron los conceptos básicos de los componentes de las celdas de electrolisis microbianas con las cuales se tratará al efluente, además de describir el proceso de obtención del ARA, que se obtiene mediante el proceso de limpieza y detección de las piezas de los aviones. Para concluir, se plantea la hipótesis por comprobar y los objetivos que se desarrollaron durante la investigación de maestría. También, se muestra de forma general la metodología experimental, la cual explica con mayor detalle cada uno de los capítulos del trabajo.

**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.**

## Referencias

- Aćimović, D., Karić, S., Nikolić, Z., Brdarić, T., Tasić, G., Kaninski, M., Nikolić, V. (2017). Electrochemical oxidation of the polycyclic aromatic hydrocarbons in polluted concrete of the residential buildings. *Environmental Pollution*. Volume 220, Part A. Pages 393-399. ISSN 0269-7491. DOI: <https://doi.org/cideteq.biblio.remotexs.co/10.1016/j.envpol.2016.09.075>
- ADEMINSAC. (2011). Práctica Normalizada para EL EXAMEN POR LÍQUIDOS PENETRANTES ASTM E 1417 – 99. Obtenido de: [https://www.academia.edu/19790593/ESPA%C3%91OL\\_ASTM\\_E1417\\_99](https://www.academia.edu/19790593/ESPA%C3%91OL_ASTM_E1417_99)
- Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (2017) Medición de campo del potencial de reducción de oxidación (ORP). SESDPROC-113-R2.
- Akash, M.S.H., Rehman, K. (2020). Ultraviolet-Visible (UV-VIS) Spectroscopy. In: *Essentials of Pharmaceutical Analysis*. Springer, Singapore. [https://doi.org/cideteq.biblio.remotexs.co/10.1007/978-981-15-1547-7\\_3](https://doi.org/cideteq.biblio.remotexs.co/10.1007/978-981-15-1547-7_3)
- Alonso, F., Ramírez, S., Ancheyta, J., & Mavil, M. (2008). Alternativas para la recuperación de metales a partir de catalizadores gastados del hidrotratamiento de hidrocarburos pesados: un caso de estudio. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 24(2), 55–69. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992008000200002](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992008000200002)
- An, C., Zhang, Y., Guo, H., & Wang, Y. (2019). Metal oxide-based supercapacitors: progress and prospectives. *Nanoscale Advances*, 1(12), 4644–4658. <https://doi.org/10.1039/c9na00543a>
- Anand, G. T., Nithiyavathi, R., Ramesh, R., John Sundaram, S., & Kaviyarasu, K. (2020). Structural and optical properties of nickel oxide nanoparticles: Investigation of antimicrobial applications. *Surfaces and Interfaces*, 18(100460), 100460. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100460>

- APHA, (2018). 5310 TOTAL ORGANIC CARBON (TOC), in: Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association. DOI: <https://doi.org/doi:10.2105/SMWW.2882.104>
- Aranganathan, L., Radhika Rajasree, S. R., Govindaraju, K., Sivarathna kumar, S., Gayathri, S., Remya, R. R., & Suman, T. Y. (2020). Spectral and microscopic analysis of fulvic acids isolated from marine fish waste and sugarcane bagasse co-compost. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 29(101762), 101762. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101762>
- Arriols. (2018). Qué son las aguas residuales y como se clasifican. Ecología verde. Obtenido de: <https://www.ecologiaverde.com/que-son-las-aguas-residuales-y-como-se-clasifican-1436.html>
- Asri, M., Elabed, S., Ibsouda Koraichi, S., El Ghachtouli N. (2019). Biofilm-Based Systems for Industrial Wastewater Treatment. en: Hussain C. (eds) Handbook of Environmental Materials Management. Springer, Cham doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73645-7\\_137](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73645-7_137)
- Atlas Scientific. (2022). How do ions increase conductivity? (2022, enero 27). Atlas Scientific. <https://atlas-scientific.com/blog/how-do-ions-increase-conductivity/>
- Ávila, E. (2019, 27 mayo). Tips - La quimiomodulación del potencial de oxidoreducción (por) en la conservación de alimentos. Engormix. <https://www.engormix.com/balanceados/articulos/tips-quimiomodulacion-potencial-oxido-t43701.htm>
- Bashir, I., Lone, F. A., Bhat, R. A., Mir, S. A., Dar, Z. A., & Dar, S. A. (2020). Concerns and Threats of Contamination on Aquatic Ecosystems. *Bioremediation and Biotechnology: Sustainable Approaches to Pollution Degradation*, 1–26. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35691-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35691-0_1)
- Belkheiri, D., Fourcade, F., Geneste, F., Floner, D., Aït-Amar, H., & Amrane, A. (2015). Combined process for removal of tetracycline antibiotic – Coupling

pre-treatment with a nickel-modified graphite felt electrode and a biological treatment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 103, 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.02.032>

Bi L., Ci, S., Cai, P., Li, H., Wen, Z. (2018). One-Step pyrolysis path to three-dimensional porous carbon doped with nitrogen as anodic materials for microbial fuel cells. *Appl. Surf. Sci., Volumen 427*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.030>

Bora, A., Mohanrasu, K., Angelin Swetha, T., Ananthi, V., Raveendran S., Nguyen T., Lan C., Arivalagan P., Arun, A., Mathimani T. (2022). Microbial electrolysis cell (MEC): Reactor configurations, recent advances, and strategies in biohydrogen production. *Fuel*. Volume 328. 125269. ISSN 0016-2361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125269>.

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 coloured dissolved organic matter (CDOM) studies. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 34777–34787. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3190-9>

Buck, C. (2000). Construcción y mantenimiento aeroespacial: La industria aeroespacial. *Industrias del transporte*, 90.2-90.4. Obtenido de: <https://www.insst.es/documents/94886/161971/Cap%C3ADtulo+90.+Construcci%C3%B3n+y+mantenimiento+aeroespacial>

Cabau-Peinado, O., Straathof, AJJ y Jourdin, L. (2021). Un modelo general para la electrosíntesis microbiana de carboxilatos a partir de CO<sub>2</sub> impulsada por biopelículas. *Fronteras en microbiología*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.669218>

Camacho, Á. M. (2018). Estudio de la producción de productos microbiológicos solubles (SMP) en un cultivo de microalgas bajo condiciones operacionales de estrés. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/114372/MEMORIA\\_MAR%C3](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/114372/MEMORIA_MAR%C3)

%8DN\_CAMACHO\_%C3%81LVARO.pdf?sequence=1.

<https://cidta.usal.es/cursos/bioindicacion/bibliografia/u1d3.pdf>

Castanares, L. (2021, noviembre 15). Tratamiento de aguas residuales en la industria de petróleo y gas. Sigmadaf. <https://sigmadafclarifiers.com/tratamiento-aguas-residuales-industria-petroleo-gas/>

Castañeda, L. F., Walsh, F. C., Nava, J. L., & Ponce de León, C. (2017). Graphite felt as a versatile electrode material: Properties, reaction environment, performance and applications. *Electrochimica Acta*, 258, 1115–1139. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.11.165>

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>

Chaparinia, F., Darvishi R., Soltani, C., Safari, M., Godini, H., Khataee, A. (2022). Treatment of aquatic medium containing common and emerging contaminants using an aero-electrochemical process based on graphite cathode and three metal oxides alloy as anode: Central composite design and photo/sono-enhancement. *Chemosphere*. Volume 297. 134129. ISSN 0045-6535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134129>

Chen, S., Patil, S. A., Schröder, U. (2018). High performance rotary graphite fiber brush air cathode for microbial fuel cells. *Appl. Energy*. Volumen 211, 1089-1094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.013>

Christensen, J. Nørgaard, L., Bro, R., & Engelsen, S. B. (2006). *Chem. Rev.* 2006, 106, 6, 1979–1994. Publication Date: May 5, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr050019q>

CHUNGA C. L. & CIEZA Mtz. C. A. (2017). *Biodegradación de poliestireno utilizando microorganismos presentes en el humus de lombriz*. (tesis de licenciatura). Universidad de Lambayeque Facultad de Ciencias de Ingeniería escuela



profesional de ingeniería ambiental, Chiclayo. Recuperado de:  
[https://repositorio.udl.edu.pe/bitstream/UDL/83/3/TESIS\\_BIODEGRADACION.pdf](https://repositorio.udl.edu.pe/bitstream/UDL/83/3/TESIS_BIODEGRADACION.pdf)

CONAGUA (2018). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro46.pdf>

CONAGUA (2020). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Obtenido de:  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/611037/Inventario\\_2019.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/611037/Inventario_2019.pdf)

CONAGUA (2021). Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, edición 2021. Obtenido de:  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/702445/SGAPDS-2-21-a\\_compressed.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/702445/SGAPDS-2-21-a_compressed.pdf)

CONAGUA. (2017). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Obtenido de:  
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap6.html>

CONAGUA. (2023). Calidad del agua en México. gob.mx. Recuperado el 21 de agosto de 2023, de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>

CONAGUA. Estadísticas del agua en México. (2017). Gob.mx. Recuperado el 21 de mayo de 2023, de [https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2017.pdf](https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf)

Debarshi M., Sharmi D., Anamika K., Himangshu S. B., Rakesh N., & Rajib B. (2022). Chapter 4 - Emerging commercial opportunities for conversion of waste to energy: aspect of gasification technology. Editor(s): Chaudhery Mustansar Hussain, Sunpreet Singh, Lalit Goswami. Waste-to-Energy Approaches Towards Zero Waste. Elsevier. Pages 105-127. ISBN 9780323853873. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85387-3.00012-4>

Dengjie Z., Xinrong L., Yaqi L., Nianbing Z., Yunlan X (2018). Enhanced electricity generation performance and dye wastewater degradation of microbial fuel cell

by using a petaline NiO@ polyaniline-carbon felt anode. *Bioresource Technology*. Volume 258. Pages 125-134. ISSN 0960-8524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.117>

Dharmalingam, S., Kugarajah, V. y Elumalai, V. (2022). Chapter 2 - Proton exchange membrane for microbial fuel cells. Editor(s): Gurbinder Kaur, PEM Fuel Cells. Elsevier, Pages 25-53. ISBN 9780128237083. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823708-3.00011-0>

Diffey, B. L. (2002). Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*, 28(1), 4-13. [https://doi.org/10.1016/S1046-2023\(02\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S1046-2023(02)00204-9)

Dipper, F. (2022). Chapter 9 - Human impacts 2: problems, mitigation and conservation, Editor(s): Frances Dipper. *Elements of Marine Ecology (Fifth Edition)*. Butterworth-Heinemann, Pages 459-511. ISBN 9780081028261. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102826-1.00013-2>

Duraisamy, N., Kandiah, K., Rajendran, R. *et al.* (2018). Electrochemical and photocatalytic investigation of nickel oxide for energy storage and wastewater treatment. *Res Chem Intermed* 44, 5653–5667 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11164-018-3446-5>

Equipo editorial. (13 de octubre de 2020). ¿Qué son el ánodo y el cátodo? Lifeder. Recuperado de: <https://www.lifeder.com/anodo-y-catodo/>

Farahmandian, M., Saidi, M., & Fazlinejad, S. (2022). Synthesis and characterization of nickel–cobalt spin coatings reinforced with carbon nanotubes: microstructural properties, microhardness, and corrosion resistance. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5(2), 1490–1507. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00220-5>

Fernández, G. (2023 febrero). Espectros vis-UV de compuestos aromáticos. <https://www.quimicaorganica.org/espectroscopia-visible-ultravioleta/740-espectros-uv-en-compuestos-aromaticos.html>.

- Ferrari A. C. y Robertson, J. (2001) Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon. Department of Engineering, University of Cambridge. DOI: 10.1103/PhysRevB.64.075414
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.087>
- Fox, B. G., Thorn, R.M.S. Anesio, A. M., & Reynolds, D. M. (2017). The in situ bacterial production of fluorescent organic matter; an investigation at a species level, *Water Research*. Volume 125. Pages 350-359. ISSN 0043-1354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.08.040>
- Fu, Y., Lu, Y., You, T., Wu, J., Cao, W., (2019). Study on multistage anodization for high-modulus carbon fiber. *Surf. Interface Anal.* 51, 798–808.
- Fuentes Rivas, R. M., Ramos Leal, J. A., Jiménez Moleón, M. del C., & Esparza Soto, M. (2015). Caracterización de la materia orgánica disuelta en agua subterránea del Valle de Toluca mediante espectrofotometría de fluorescencia 3D. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 31(3), 253–264. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992015000300005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992015000300005)
- Garcia, C., & Agosto, L. (2019). Capacidad fitorremediadora de *Amaranthus blitum* para remover plomo de relaves mineros de la provincia de Oyon, 2019. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/39895>
- García, J., Peñafiel Heredia, D., & Rodríguez, R. (2019). Bioremediation of hydrocarbons in wastewater with mixed culture of microorganisms: case car washers Puyango. *Enfoque UTE*, 10(1), pp. 185 - 196. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v10n1.312>

- Gautam, A., Kushwaha, A., y Rani, A. (2021). Chapter 20 - Microbial remediation of hexavalent chromium: An eco-friendly strategy for the remediation of chromium-contaminated wastewater, Editor(s): Maulin Shah, Susana Rodriguez-Couto, Kavita Mehta. *The Future of Effluent Treatment Plants*. Elsevier. Pages 361-384, ISBN 9780128229569. DOI: [https://doi-org.cideteq.biblio.remotexs.co/10.1016/B978-0-12-822956-9.00020-9](https://doi.org/cideteq.biblio.remotexs.co/10.1016/B978-0-12-822956-9.00020-9)
- Gautam, R., Nayak, J., Ressa, N., Wilckens, R., Ghosh, U. (2023). Bio-hydrogen production through microbial electrolysis cell: Structural components and influencing factors. *Chemical Engineering Journal*. Volume 455. 140535, ISSN 1385-8947. DOI: <https://doi-org.cideteq.biblio.remotexs.co/10.1016/j.cej.2022.140535>
- Goel, R., Jha, R., & Ravikant, C. (2020). Investigating the structural, electrochemical, and optical properties of p-type spherical nickel oxide (NiO) nanoparticles. *The Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 144(109488), 109488. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2020.109488>
- Gomaa, M. M., Boshta, M., Farag, B. S., & Osman, M. B. S. (2016). Structural and optical properties of nickel oxide thin films prepared by chemical bath deposition and by spray pyrolysis techniques. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(1), 711–717. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3807-4>
- Gómez, M. A., Esteve, J., & Lousa, A. (2007). CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA DE RECUBRIMIENTOS DE NÍQUEL QUÍMICO-TEFLÓN OBTENIDOS EN UN BAÑO CON DIFERENTES PERÍODOS DE ENVEJECIMIENTO. *Revista EIA*, 8, 49–55. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-12372007000200005](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000200005)
- Gu, B., & Schmitt, J. (1999). Influence of pH on Chemical Oxidation of Organic Contaminants in Water with Fenton's Reagent. *Journal of Environmental*

Quality, 28(3), 762-767.  
<https://doi.org/10.2134/jeq1999.00472425002800030020x>

Guan, X. Hou, S., Meng, Y., Liu, W. (2019). Estudio sobre la cuantificación de la compensación ecológica en una cuenca hidrográfica considerando diferentes industrias basadas en el valor de pérdida de contaminación del agua. *Ciencias Ambientales e Investigación de la Contaminación. Volumen 26*, pp. 30954 - 30966. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06215-6>

Gul, M. M., & Ahmad, K. S. (2019). Bioelectrochemical systems: Sustainable bio-energy powerhouses. *Biosensors & Bioelectronics*, 142(111576), 111576. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111576>

Guo, H., Kim, Y. (2019). Stacked multi-electrode design of microbial electrolysis cells for rapid and low-sludge treatment of municipal wastewater. *Biotechnol Biofuels* 12, 23 (2019). [https://doi-org.cideteq.biblio.remotexs.co/10.1186/s13068-019-1368-0](https://doi.org/cideteq.biblio.remotexs.co/10.1186/s13068-019-1368-0)

Guo, Q., Guo, Z., Shi, J., Sang, L., Gao, B., Chen, Q., Wang, X., & Liu, Z. (2018). Fabrication of nickel and nickel carbide thin films by pulsed chemical vapor deposition. *MRS Communications*, 8(1), 88–94. <https://doi.org/10.1557/mrc.2018.21>

Hajam, T. A., Saleem, H., Syed Ali Padhusa, M., & Mohammed Ameen, K. K. (2022). Quantum mechanical study, spectroscopic (FT-IR, FT-Raman and UV-Vis) study, NBO, NLO analysis and molecular docking studies of 2-ethoxy-4-(pyridine-2yliminomethyl)-phenol. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 42(7), 4819–4842. <https://doi.org/10.1080/10406638.2021.1896561>

Halim, Md & Rahman, Md & Ibrahim, Md & Kundu, Rituparna & Biswas, Biplob. (2021). Study of The Effect of pH on The Performance of Microbial Fuel Cell for Generation of Bioelectricity. 10.21203/rs.3.rs-151072/v1.

- Hassan, R. Y. A., Febbraio, F., & Andreescu, S. (2021). Microbial electrochemical systems: Principles, construction and biosensing applications. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(4), 1279. <https://doi.org/10.3390/s21041279>
- Hernández, A. (2011). Ácidos húmicos y fúlvicos en la producción hidropónica de chile manzano (*capsicum pubescens*) en invernadero. Tesis, México.
- Hernandez, C. A., & Osma, J. F. (2020). Microbial electrochemical systems: Deriving future trends from historical perspectives and characterization strategies. *Frontiers in environmental science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00044>
- Higgins P. (2013). ORP Management in Wastewater as an Indicator of Process Efficiency. Fecha de consulta: 03 noviembre 2022. Obtenido de: <https://www.ysi.com/ysi-blog/water-blogged-blog/2013/08/orp-management-in-wastewater-as-an-indicator-of-process-efficiency>.
- Hou, M., Zhu, F., Liu, Y., & Chen, Y. (2023). A high-performance fuel electrode-supported tubular protonic ceramic electrochemical cell. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(14), 6200–6207. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.06.020>
- Huang, S.-J., Dwivedi, KA, Kumar, S., Wang, C.-T. y Yadav, AK (2023). Ánodos a base de carbono recubiertos de NiO/MnO<sub>2</sub> sin aglutinantes para la eliminación simultánea de norfloxacin, el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía en una celda de combustible microbiana de doble cámara. *Contaminación ambiental (Barking, Essex: 1987)* , 317 (120578), 120578. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120578>
- Huibin Yu a , Yonghui Song a,† , Xiang Tu a , Erdeng Du b , Ruixia Liu a,† , Jianfeng Peng. (2013). Assessing removal efficiency of dissolved organic matter in wastewater treatment using fluorescence excitation emission matrices with parallel factor analysis and second derivative synchronous fluorescence. *Bioresource Technology* 144 595–601.

- Hussain, R.T., Umar, K., Ahmad, A., Bhawani, S.A., Alshammari, M.B. (2022). Conventional Electrode Materials for Microbial Fuel Cells. In: Ahmad, A., Mohamad Ibrahim, M.N., Yaqoob, A.A., Mohd Setapar, S.H. (eds) Microbial Fuel Cells for Environmental Remediation. Sustainable Materials and Technology. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2681-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2681-5_6)
- Idris, M.O., Yaqoob, A.A., Ibrahim, M.N.M., Noh, N.A.M., Daud, N.N.M. (2022). Electrochemical Measurements of Microbial Fuel Cells (MFCs). In: Ahmad, A., Mohamad Ibrahim, M.N., Yaqoob, A.A., Mohd Setapar, S.H. (eds) Microbial Fuel Cells for Environmental Remediation. Sustainable Materials and Technology. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2681-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2681-5_4)
- J. Huesa (2021). 14 de enero del 2021. Solución global al tratamiento de aguas en la industria aeronáutica. Obtenido de: <https://www.iagua.es/noticias/j-huesa-water-technology/solucion-global-al-tratamiento-aguas-industria-aeronautica>
- J. Yu, K. Xiao, W. Xue, Y.-x Shen, J. Tan, S. Liang, Y. Wang, X. Huang. (2020). Excitation-emission matrix (EEM) fluorescence spectroscopy for characterization of organic matter in membrane bioreactors: Principles, methods and applications. *Front. Environ. Sci. Eng.* 14(2) 31.
- Jara-Olmedo, A., Chavez, D., Boiteux, O., Quisimalín, M. (2023). Aeronautical Industry Development in Emerging Countries: Factors—A Case Study. In: Rocha, Á., Fajardo-Toro, C.H., Riola, J.M. (eds) Developments and Advances in Defense and Security. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 328. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-7689-6\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-19-7689-6_20)
- Jayabalan, J., Matheswaran, M., Preethi, V., Naina Mohamed, S. (2020). Enhancing biohydrogen production from sugar industry wastewater using metal oxide/graphene nanocomposite catalysts in microbial electrolysis cell. *Int. J. Hydrogen Energy*, 45 (2020), pp. 7647-7655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.068>

- Jiang, S.P., Li, Q. (2022). Fuel Cell Electrochemistry . In: Introduction to Fuel Cells. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7626-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7626-8_3)
- Jiang, Y., Zhao, H., Liang, J., Yue, L., Li, T., Luo, Y., Liu, Q., Lu, S., Abdullah M., Zhengjun G., Xuping S. (2021). Anodic oxidation for the degradation of organic pollutants: Anode materials, operating conditions, and mechanisms. A mini review. *Electrochemistry Communications*. Volume 123. 106912. ISSN 1388-2481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2020.106912>
- Jiawei X., Xinyi Z., Yaofeng C., Junxiang X., He L., Min-hua C., Tian C., Chongjun C. (2023). The microbial synergy and response mechanisms of hydrolysis-acidification combined microbial electrolysis cell system with stainless-steel cathode for textile-dyeing wastewater treatment. *Science of The Total Environment*. Volume 855, 158912, ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/cideteq.biblio.remotexs.co/10.1016/j.scitotenv.2022.158912>.
- Joung, J. F., Han, M., Jeong, M., & Park, S. (2020). Experimental database of optical properties of organic compounds. *Scientific Data*, 7(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00634-8>
- Justin, T. (3 de mayo del 2022). UV-Vis Spectroscopy: Principle, Strengths and Limitations and Applications. *Technology Networks*. Obtenido de: <https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/uv-vis-spectroscopy-principle-strengths-and-limitations-and-applications-349865#:~:text=UV%2DVis%20spectroscopy-,What%20is%20UV%2DVis%20spectroscopy%3F,a%20reference%20or%20Oblank%20sample.>
- Kadier, A.; Simayi, Y.; Abdeshahian, P.; Azmán, NF; Chandrasekhar, K.; Kalil, MS. (2016). Una revisión exhaustiva de los diseños y configuraciones de reactores de celdas de electrólisis microbiana (MEC) para la producción sostenible de gas hidrógeno. *Alex. Ing. J.* 55, 427–443
- Kadier, Abudukeremu & Jiang, Yong & Lai, Bin & Rai, Pankaj Kumar & Kuppam, Chandrasekhar & Mohamed, Azah & Kalil, Mohd. (2018). *Biohydrogen*



production in microbial electrolysis cells from renewable resources. 10.1201/9781351228138-12.

Kannan, R., Solaimalai, A., Jayakumar, M., & Surendran, U. (2022). Advance molecular tools to detect plant pathogens. *Biopesticides*, 401-416. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823355-9.00008-0>

Katz, E., & Bollella, P. (2021). Fuel cells and biofuel cells: From past to perspectives. *Israel Journal of Chemistry*, 61(1–2), 68–84. <https://doi.org/10.1002/ijch.202000039>

Kausar, Z., Mansha, A., & Asim, S. (2023). Effect of chloride, sulfate, and Ferrate salts on electronic energy levels of anthracene proving it a potential candidate as an ON and ON–OFF UV–Vis sensor. *Journal of Fluorescence*. <https://doi.org/10.1007/s10895-023-03363-4>

Kesari, K.K., Soni, R., Jamal, Q.M.S. et al. Wastewater Treatment and Reuse: a Review of its Applications and Health Implications. *Water Air Soil Pollut* 232, 208 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05154-8>

Koul Y, Devda V, Varjani S, Guo W, Ngo HH, Taherzadeh MJ, Chang JS, Wong JWC, Bilal M, Kim SH, Bui XT. (2022). Parra-Saldívar R. Microbial electrolysis: a promising approach for treatment and resource recovery from industrial wastewater. *Bioengineered*. Apr;13(4):8115-8134. doi: 10.1080/21655979.2022.2051842. PMID: 35297316; PMCID: PMC9161901.

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. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2016.06.010>

Kumar, A., Chaurasia, D., Y Mondal, P. (2022). Enhancing biohydrogen production from sugar industry wastewater using Ni, Ni–Co and Ni–Co–P electrodeposits as cathodes in microbial electrolysis cells. *Chemosphere*. Volume 286, Part

3. 131728. ISSN 0045-6535. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131728>

Kumar, P., Chatterjee, P., & Ghangrekar M. M. (2017). Fouling resistant nitrogen-doped carbon powder with amino-tri-methylene-phosphate cathode for microbial fuel cell. *Mater. Renew. Sustain. Energy*, 6 (2) (2017), 10.1007/s40243-017-0093-5

Kumari, S., Rajput, V. D., Sushkova, S., & Minkina, T. (2022). Microbial electrochemical system: an emerging technology for remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil and sediments. *Environmental Geochemistry and Health*. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01356-z>

Kurzweil, P., & Shamonin, M. (2018). State-of-Charge Monitoring by Impedance Spectroscopy during Long-Term Self-Discharge of Supercapacitors and Lithium-Ion Batteries. *Batteries*, 4(3), 35. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/batteries4030035>

Kyoung, Y., Wulin, Y., y Bruce, E. (2018). Regenerable Nickel-Functionalized Activated Carbon Cathodes Enhanced by Metal Adsorption to Improve Hydrogen Production in Microbial Electrolysis Cells. *Environmental Science & Technology*. 52 (12), 7131-7137. DOI: 10.1021/acs.est.7b06005

Kyriacou, P., Budidha, K., & Abay, T. Y. (2019). Optical Techniques for Blood and Tissue Oxygenation. *Encyclopedia of Biomedical Engineering*, 461-472. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.10886-4>

Lawrence, J. M., Yin, Y., Bombelli, P., Scarampi, A., Storch, M., Wey, L. T., Climent-Catala, A., Baldwin, G. S., O'Hare, D., Howe, C. J., Zhang, J. Z., Ouldrige, T. E., Ledesma-Amaro, R., & PixCell iGEM Team. (2022). Synthetic biology and bioelectrochemical tools for electrogenetic system engineering. *Science Advances*, 8(18). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm5091>

Lee, H.-S., Xin, W., Katakojwala, R., Venkata Mohan, S., & Tabish, N. M. D. (2022). Microbial electrolysis cells for the production of biohydrogen in dark

- fermentation – A review. *Bioresource Technology*, 363(127934), 127934.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127934>
- Li, M., Park, SY, Wang, J., Zheng, D., Wostoupal, OS, Xiao, X., Yang, Z., Li, X., Diroll, BT, Marks, TJ, Zhu, K. , y Xu, T. (2023). Electrodo posterior bicapa de aleación fusible y grafito dopado con níquel para células solares de perovskita sin vacío. *Cartas de energía ACS* , 8 (7), 2940–2945.  
<https://doi.org/10.1021/acsenerylett.3c00852>
- Li, M., Zhong, K., Zhang, L., Wang, S., Zhang, H., Huang, Y., Zhang, N. (2019). Cobalt-based Catalysts Modified Cathode for Enhancing Bioelectricity Generation and Wastewater Treatment in Air-breathing Cathode Microbial Fuel Cells. *Electroanalysis*. DOI: 10.1002/elan.201900161
- Li, Q., Zhang, Y., Xie, Z., Zhen, Y., Hu, W. y Dong, H. (2022). Semiconductores orgánicos a base de hidrocarburos aromáticos policíclicos: síntesis de cierre de anillo y propiedades optoelectrónicas. *Revista de química de materiales. C, Materiales para dispositivos ópticos y electrónicos* , 10 (7), 2411–2430.  
<https://doi.org/10.1039/d1tc04866j>
- Lia, X., Zhang, J., Qin, J., Zhang, X., Zou, W., Ding, L., Zhou, M. (2022). Enhanced removal of organic contaminants by novel iron–carbon and premagnetization: Performance and enhancement Mechanism. *Chemosphere*. Volume 303, Part 2. 135060, ISSN 0045-6535, DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135060>
- Lim, S. S., Yu, E. F., Daud, W. R. W., Kim, B. H., Scott, K. (2017). Bioanode as a limiting factor to biocathode performance in microbial electrolysis cells, *Bioresour. Technol.* 238 (2017) 313e324
- Limpouchová, Z., & Procházka, K. (2016). Theoretical Principles of Fluorescence Spectroscopy. In: Procházka, K. (eds) *Fluorescence Studies of Polymer Containing Systems*. Springer Series on Fluorescence, vol 16. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26788-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26788-3_4)

- Lin, Z., Bai, J., Zhen, Z., Lao, S., Li, W., Wu, Z., Li, Y., Spiro, B., Zhang, D. (2016). Enhancing pentachlorophenol degradation by vermicomposting associated bioremediation. *Ecological Engineering*. Volume 87. Pages 288-294, ISSN 0925-8574, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.12.004>
- Liping, H., Huilin, W., Shiping, S., Deqiang, L., Gianluca, L. (2022) Complete removal of heavy metals with simultaneous efficient treatment of etching terminal wastewater using scaled-up microbial electrolysis cells. *Chemical Engineering Journal*. Volume 439. 135763, ISSN 1385-8947. Doi: [https://doi-org.cideteq.biblio.remotexs.co/10.1016/j.cej.2022.135763](https://doi.org/cideteq.biblio.remotexs.co/10.1016/j.cej.2022.135763)
- Liu, C.-G., Xue, C., Lin, Y.-H., & Bai, F.-W. (2013). Redox potential control and applications in microaerobic and anaerobic fermentations. *Biotechnology Advances*, 31(2), 257–265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.11.005>
- Liu, S., Benedetti, M. F., Han, W., & Korshin, G. V. (2020). Comparison of the properties of standard soil and aquatic fulvic and humic acids based on the data of differential absorbance and fluorescence spectroscopy. *Chemosphere*, 261, 128189. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128189>
- Logan, B. (2008). *Microbial Fuel Cells*. Pennsylvania, USA.: John Wiley and Sons, Inc Publication. ISBN: 978-0-470-23948-3
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., Rabaey, K., (2006). Microbial Fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science y Technology*, Vol. 20, pp. 5181-5192. DOI: <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Logan, B. E., Rossi, R., Ragab, A., & Saikaly, P. E. (2019). Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems. *Nature Reviews. Microbiology*, 17(5), 307–319. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0173-x>
- López, K. M., Aguilar, J., y Medel, A. (2018). Tratamiento electroquímico de aguas residuales procedentes de la industria aeronáutica. Informe de residencias profesionales, San Felipe del Progreso, Estado de México.

- Lv, Z., Xie, D., Yue, X., Feng, C., Wei, C. (2012). Ruthenium oxide-coated carbon felt electrode: A highly active anode for microbial fuel cell applications, *Journal of Power Sources*, Volume 210, Pages 26-31. ISSN 0378-7753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.109>
- Ma, X., Feng, C., Weija, Z., Yu, H. (2016). Carbon anode derived from municipal sludge with functional groups containing nitrogen and oxygen for high-performance microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, volumen 307, pp. 105-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.12.109>
- Mackuľak, T., Bodík, I., Smolinská, M. et al. Automotive industry wastewater treatment by mixture of enzymes. *Monatsh Chem* 147, 159–164 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00706-015-1579-4>
- Ma, Y., Wang, X., Dong, Z., Ni, P., Li, Z., & Liu, H. (2022). Microstructure and mechanical performance of nickel coating on copper sheet via laser shock processing. *Applied Surface Science*, 592(153366), 153366. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153366>
- Mahabadi, M., Bayat, A. y Mohammadi, A. (2021). Uso de espectrofotometría UV-Vis para la caracterización de nanoestructuras de carbono: una revisión. *Química teórica y experimental* , 57 (3), 191–198. <https://doi.org/10.1007/s11237-021-09687-1>
- Mamlouk, M. (2022). Alkaline anion exchange membrane (AEM) water electrolyzers—current/future perspectives in electrolyzers for hydrogen. En T. M. Letcher (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 473–504). Elsevier
- Martínez-Prado, A., Pérez-López Ma. E, Pinto-Espinoza, J., Gurrola-Nevárez, B., y Osorio-Rodríguez, A. L. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992011000300009](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000300009).  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992011000300009](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000300009)

- Meas, Y. Ramirez, J. A., Villalon, M. A., Chapman, T. W. (2010). Industrial wastewaters treated by electrocoagulation. *Electrochimica Acta* 55 (2010) 8165-8171.
- Méndez, G. C. (2019). Propuesta de mejora de la planta de tratamiento de aguas residuales de Arbeláez a partir del sistema de deer island wastewater treatment plant. [Tesis para obtener el grado de ingeniero industrial]. Universidad católica de Colombia facultad de ingeniería programa de ingeniería industrial visita técnica internacional Bogotá
- Mitchell, S., Qin, R., Zheng, N. y Pérez-Ramírez, J. (2021). Nanoscale engineering of catalytic materials for sustainable technologies. *Nat. Nanotechnol.* **16**, 129–139 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-00799-8>
- Mohamed, H. O., Abdelkareem, M. A., Obaid, M., Chae, S. H., Park, M., Kim, H. Y., Barakat, N. A. M. (2017). Cobalt oxides-sheathed cobalt nano flakes to improve surface properties of carbonaceous electrodes utilized in microbial fuel cells. *Chem. Eng. J.*, 326 (2017), pp. 497-506
- Mohamed, H. O., Obaid, M., Poo, K., Abdelkareem, M. A., Talas, S. S., Fadali, O. A., Kim, A. Y., Chae, K. J. (2018 b). Fe/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles as anode catalyst for exclusive power generation and degradation of organic compounds using microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*. Volume 349. Pages 800-807. ISSN 1385-8947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.138>
- Mohamed, H. O., Sayed, E. T., Obaid, M., Choi, Y-L., Park, S. G., Al-Qaradawi, S., Chae, K-L. (2018a). Transition metal nanoparticles doped carbon paper as a cost-effective anode in a microbial fuel cell powered by pure and mixed biocatalyst cultures. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 43, Issue 46. Pages 21560-21571, ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.199>
- Mohammadi, L., Rahdar, A., Bazrafshan, E., Dahmardeh, H., Susan, Md. A. B. H., & Kyzas, G. Z. (2020). Petroleum Hydrocarbon Removal from Wastewaters:

A Review. *Processes*, 8(4), 447. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/pr8040447>

- Mostofa, K.M.G., 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*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 429–559. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32223-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32223-5_6)
- Myers, D. N. (2019). Chapter 10 - Innovations in Monitoring With Water-Quality Sensors With Case Studies on Floods, Hurricanes, and Harmful Algal Blooms. Editor(s): Satinder Ahuja. *Separation Science and Technology*. Academic Press. Volume 11. Pages 219-283. ISSN 1877-1718. ISBN 9780128157305. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815730-5.00010-7>.
- N Hudson, A. Baker, D. Ward, D.M. Reynolds, C. Brunson, C. Carliell-Marquet, S. Browning. (2008). ¿Can fluorescence spectrometry be used as a surrogate for the biochemical oxygen demand (BOD) test in wastewater quality assessment? An example from South West England. *Science of The Total Environment* 391 (2008) 149-158.
- Nandy, A., Jagoš, R., Novotnik, B., Sharma, M., Stephen R., Thangadurai. R. (2020). Investigation of crude oil degradation using metal oxide anode-based microbial fuel cell. *Bioresource Technology Reports*. Volume 11. 100449. ISSN 2589-014X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100449>
- Nasrollahzadeh, M., Atarod, M., Sajjadi, M., Mohammad S., Issaabadi. (2019). Chapter 6 - Plant-Mediated Green Synthesis of Nanostructures: Mechanisms, Characterization, and Applications. Editor(s): Mahmoud Nasrollahzadeh, S. Mohammad Sajadi, Mohaddeseh Sajjadi, Zahra Issaabadi, Monireh Atarod. *Interface Science and Technology*. Elsevier, Volume 28, Pages 199-322. ISSN 1573-4285. ISBN 9780128135860. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813586-0.00006-7>

- Nath, A., Kumar, P.T., Rai AK et al (2017) Microalgal consortia differentially modulate progressive adsorption of hexavalent chromium. *Physiol Mol Biol Plants* 23:269–280
- Nathanson, J. A. and Ambulkar, . Archis (2023, August 21). wastewater treatment. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment>
- Nix, R. (2015, febrero 11). 2: Adsorption of molecules on surfaces. Chemistry LibreTexts; Libretexts. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Surface\\_Science\\_\(Nix\)/02%3A\\_Adsorption\\_of\\_Molecules\\_on\\_Surfaces](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Surface_Science_(Nix)/02%3A_Adsorption_of_Molecules_on_Surfaces)
- Obileke, K., Onyeaka, H., Meyer, E. L., & Nwokolo, N. (2021). Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. *Electrochemistry Communications*, 125(107003), 107003. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>
- Obileke, K., Onyeaka, H., Meyer, E. L., Nwokolo, N. (2021). Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. *Electrochemistry Communications*. Volume 125, 107003, ISSN 1388-2481, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>
- OMS (2016). Mapas de fuentes de agua potable. [https://www.who.int/images/default-source/maps/global\\_water\\_1990.png?sfvrsn=99bf3608\\_0](https://www.who.int/images/default-source/maps/global_water_1990.png?sfvrsn=99bf3608_0)
- OMS y UNICEF (2017) Mapas de saneamiento. [https://www.who.int/images/default-source/maps/global\\_sanitation\\_1990.png?sfvrsn=43dc8b78\\_0](https://www.who.int/images/default-source/maps/global_sanitation_1990.png?sfvrsn=43dc8b78_0)
- Ortiz, V. M., Touati, K., Salar, M. J., Hernández, F. J., de los Ríos, A. P. (2019). Mixed transition metal-manganese oxides as catalysts in MFCs for bioenergy generation from industrial wastewater. *Biochemical Engineering Journal*. Volume 151. 107310. ISSN 1369-703X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107310>



- Ortiz-Martínez, V.M., Touati, K., Salar-García, M. J., Hernández-Fernández, F. G., de los Ríos, A. P. (2019). Mixed transition metal-manganese oxides as catalysts in MFCs for bioenergy generation from industrial wastewater. *Biochemical Engineering Journal*. Volume 151. 107310. ISSN 1369-703X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107310>
- Pantalón, D.; Singh, A.; Van Bogaert, G.; Olsen, SI; Nigam, PS; Diels, L.; Vanbroekhoven, K. (2011). Sistemas bioelectroquímicos (BES) para la producción de energía sostenible y la recuperación de productos a partir de desechos orgánicos y aguas residuales industriales. *R. Soc. química Adv.*, 2, 1248–1263.
- Pantoja M. B. (2018). EFECTO DE LOS MICROORGANISMOS EFICIENTES Y RESTOS VEGETALES EN LA CALIDAD DE HUMUS DE LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA (*Eisenia foetida* Sav.) EN HUACRACHUCO. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Obtenida de: [https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1868/TS\\_BPM\\_2021\\_R2.pdf?sequence=10&isAllowed=y](https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1868/TS_BPM_2021_R2.pdf?sequence=10&isAllowed=y)
- Papavinasam, S. (2008). 3 - Electrochemical polarization techniques for corrosion monitoring. Editor(s): Lietai Yang. In *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering. Techniques for Corrosion Monitoring*. Woodhead Publishing. 2008. Pages 49-85. ISBN 9781845691875. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845694050.1.49>.
- Parashurama Salunkhe, Muhammed Ali A V and Dhananjaya Kekuda. (2020). Investigation on tailoring physical properties of Nickel Oxide thin films grown by dc magnetron sputtering. *Mater. Res. Express* 7 016427.
- Parmar, J., Vilela, D., Villa, K., Wang, J., & Sánchez, S. (2018). Micro- and nanomotors as active environmental microcleaners and sensors. *Journal of the American Chemical Society*, 140(30), 9317–9331. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b05762>

- Pérez García, A. (2019). Ingeniería básica de una planta de depuración de aguas residuales en la industria aeronáutica. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Persichetti, G., Testa, G., & Bernini, R. (2013) "High sensitivity UV fluorescence spectroscopy based on an optofluidic jet waveguide," *Opt. Express* 21, 24219-24230. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.21.024219>
- Pierrat, E., Rupcic, L., Hauschild, M. Z., & Laurent, A. (2021). Global environmental mapping of the aeronautics manufacturing sector. *Journal of Cleaner Production*, 297(126603), 126603. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126603>
- Pozo-Antonio, J. S., Universidade de Vigo, España, Puente, I., Lagüela, S., Veiga, M., Escuela Naval Militar, España, Universidad de Salamanca, España, & Universidade de Vigo, España. (2017). Tratamiento microbiano de aguas ácidas resultantes de la actividad minera: una revisión. *Tecnología y ciencias del agua*, 08(3), 75–91. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-05>
- Prados, M. B., Lescano, M., Porzionato, N., & Curutchet, G. (2021). Wiring up along electrodes for biofilm formation. *Frontiers in microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.726251>
- Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H., & Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *Npj Clean Water*, 4(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
- Qayoom, U., Bhat, S.U., Ahmad, I. et al. (2022). Assessment of potential risks of heavy metals from wastewater treatment plants of Srinagar city, Kashmir. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19, 9027–9046. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03612-8>
- Queiroz, D., Dadamos, T., Machado, S., & Martines, M. (2018). Electrochemical Determination of Norepinephrine by Means of Modified Glassy Carbon Electrodes with Carbon Nanotubes and Magnetic Nanoparticles of Cobalt

Ferrite. *Sensors*, 18(4), 1223. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/s18041223>

Quejigo, J., Tejedor-Sanz, S., Schroll, R., & Esteve-Núñez, A. (2019). Electrodes boost microbial metabolism to mineralize antibiotics in manure. *Bioelectrochemistry* (Amsterdam, Netherlands), 128, 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.04.008>

Quiroga, A. (2019, Mayo 10). Cyclic Voltammetry. Obtenido de Chemistry libre text: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical\\_Chemistry/Supplemental\\_Modules\\_\(Analytical\\_Chemistry\)/Instrumental\\_Analysis/Cyclic\\_Voltammetry](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_(Analytical_Chemistry)/Instrumental_Analysis/Cyclic_Voltammetry)

Raja P. M. V. & Barron A. R. (2022, 28 agosto). UV-Visible Spectroscopy. Libretexts. Obtenido de: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical\\_Chemistry/Physical\\_Methods\\_in\\_Chemistry\\_and\\_Nano\\_Science\\_\(Barron\)/04%3A\\_Chemical\\_Spectiation/4.04%3A\\_UV-Visible\\_Spectroscopy](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Physical_Methods_in_Chemistry_and_Nano_Science_(Barron)/04%3A_Chemical_Spectiation/4.04%3A_UV-Visible_Spectroscopy)

Ramadan, R., Abdel-Aal, SK Síntesis fácil de grafeno basado en ZnO-rGO nanoestructurado y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales. *J Mater Sci: Mater Electron* 32, 19667–19675 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06489-y>

Rao, N., Singh, R., & Bashambu, L. (2021). Carbon-based nanomaterials: Synthesis and prospective applications. *Materials Today: Proceedings*, 44, 608–614. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.593>

Rashvand, S., & Hojabri, A. (2017). Structural, morphological and optical properties of nanostructure nickel oxide thin films on quartz substrates grown by plasma oxidation. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 27(2), 503–509. <https://doi.org/10.1007/s10904-016-0492-6>

Rauf, A., Subhan, H., Abbasi, R., Adhikari, B., Shah, A. H., Rana, U. A., Abbas, Q., Qureshi, I. Z., Hussain, H., Mazhar, K., Badshah, A., Kraatz, H.-B., & Shah, A. (2014). Biological activity, pH dependent redox behavior and UV–Vis

spectroscopic studies of naphthalene derivatives. *Journal of Photochemistry and Photobiology. B, Biology*, 140, 173–181.  
<https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.07.010>

Rausch, M., Golizadeh, M., Kreiml, P., Cordill, M. J., Winkler, J., & Mitterer, C. (2020). Sputter deposition of NiW films from a rotatable target. *Applied Surface Science*, 511(145616), 145616.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145616>

Research, I. (2022, 16 mayo). Técnicas de microscopía para caracterización de metales. INFINITIA Industrial Consulting.  
<https://www.infinitiaresearch.com/noticias/tecnicas-de-microscopia-para-caracterizacion-de-materiales/>

Rios, Y. (2011). Espectroscopia UV-VIS. Obtenido de: <https://www.yolanda-rios.net/materiales/UVTeoria.pdf>

Rivera, I., Schröder, U. & Patil, S. (2019). Chapter 5.8 - Microbial Electrolysis for Biohydrogen Production: Technical Aspects and Scale-Up Experiences. Editor(s): S. Venkata Mohan, Sunita Varjani, Ashok Pandey. In *Biomass, Biofuels and Biochemicals. Microbial Electrochemical Technology*. Elsevier. Pages 871-898. ISBN 9780444640529. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00036-4>

Rodríguez B. P. G. (2018). *Efecto del humus de lombriz en la remediación de suelos contaminado con crudo de petróleo* (Tesis de licenciatura). Ucayali, Perú, Perú. Recuperado de: [http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4047/000003720T\\_AMBIENTAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4047/000003720T_AMBIENTAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Rompf, A., & Jahn, D. (1999). ECOLOGY OF BACTERIA AND FUNGI IN FOODS | influence of redox potential and pH. En R. K. Robinson (Ed.), *Encyclopedia of Food Microbiology* (pp. 556–563). Elsevier.

Roubaud, E., Lacroix, R., Da Silva, S., Etcheverry, L., Bergel, A., Basséguy, R., & Erable, B. (2019). Benchmarking of industrial synthetic graphite grades,

carbon felt, and carbon cloth as cost-efficient bioanode materials for domestic wastewater fed microbial electrolysis cells. *Frontiers in energy research*, 7. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00106>

Roy, D., Azaïs, A., Benkaraache, S., Drogui, P., & Tyagi, R. D. (2018). Composting leachate: characterization, treatment, and future perspectives. *Re/Views in Environmental Science and Bio/Technology*, 17(2), 323–349. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9462-5>

Salas, J. (2018). Tratamiento de aguas contaminadas con aceite de motores por fotocatalisis heterogénea. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional del Centro de Perú. Obtenido de: [https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6883/T010\\_4\\_0136897\\_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6883/T010_4_0136897_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Saruhan, B., Lontio Fomekong, R., & Nahirniak, S. (2021). Review: Influences of semiconductor metal oxide properties on gas sensing characteristics. *Frontiers in Sensors*, 2. <https://doi.org/10.3389/fsens.2021.657931>

Satar, I., Daud, W. R. W., Kim, B. H., Somalu, M. R., Ghasemi, M., Jafary, T., & Timmiati, S. N. (2018). Performance of titanium–nickel (Ti/Ni) and graphite felt-nickel (GF/Ni) electrodeposited by Ni as alternative cathodes for microbial fuel cells. *Revista del Instituto de Ingenieros Químicos de Taiwán*, 89, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.04.010>

Scholz, M. (2019). Dye wastewater treatment by vertical-flow constructed wetlands. En M. Scholz (Ed.), *Sustainable Water Treatment* (pp. 191–213). Elsevier

Sha, H., Zhao, B., Yang, Y., Zhang, Y., Zheng, P., Cao, S., Wang, Q., & Wang, G. (2023). Enhanced anaerobic digestion of corn stover using magnetized cellulase combined with Ni-graphite coating. *Energy (Oxford, England)*, 262(125532), 125532. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125532>

Shah, A. B., Wu, Y., & Joo, Y. L. (2019). Direct addition of sulfur and nitrogen functional groups to graphite felt electrodes for improving all-vanadium redox

flow battery performance. *Electrochimica Acta*, 297, 905–915.  
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.12.052>

Sharaf, M. S. (2020). Chapter 7 - Smart conductive textile. Editor(s): Shahid ul-Islam, Bhupendra Singh Butola. In *The Textile Institute Book Series. Advances in Functional and Protective Textiles*. Woodhead Publishing. Pages 141-167. ISBN 9780128202579. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820257-9.00007-2>.

Sharma, I., Bhattacharjee, S. (2021). Microbial Electrochemical Cells and Introduction to Electron Transport in Microbial Biofilm. In: Nag, M., Lahiri, D. (eds) *Analytical Methodologies for Biofilm Research*. Springer Protocols Handbooks. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1378-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1378-8_5)

Sierra, E. V., Méndez, M. A., Sarria, V. M., & Cortés, M. T. (2008). Electrooxidación de glifosato sobre electrodos de níquel y cobre. *Química Nova*, 31(2), 220-226. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422008000200006>

Sikorska, E. (2019). Fluorescence Spectroscopy and Chemometrics in Analysis of Beverages. *Control de calidad en la industria de bebidas*, 161-203. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816681-9.00005-9>

Simoska, O., Gaffney, E. M., Minter, S. D., Franzetti, A., Cristiani, P., Grattieri, M., & Santoro, C. (2021). Recent trends and advances in microbial electrochemical sensing technologies: An overview. *Current Opinion in Electrochemistry*, 30(100762), 100762. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100762>

Skoog, D.A., Holler, F.J., Crouch, S.R. (2008). *Principios de Análisis Instrumental*, 6ta ed. CENGAGE Learning, México

Sophocleous, M., & Atkinson, J. (2017). A review of screen-printed silver/silver chloride (Ag/AgCl) reference electrodes potentially suitable for environmental potentiometric sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*. Volume 267.

Pages 106-120. ISSN 0924-4247. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.10.013>

Sparks, D. (2003). Chemistry of soil organic matter. En S. Donald, Environmental soil chemistry. USA: ELSEVIER.

Su, Y., Chen, N., Ren, H.-L., Li, C.-W., Guo, L.-L., Li, Z., & Wang, X.-M. (2023). Application of modified graphite felt as electrode material: a review. *Carbon Letters*, 33(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s42823-022-00414-x>

Sulej-Suchomska, Anna & Polkowska, Żaneta & Namieśnik, Jacek. (2011). Pollutants in Airport Runoff Waters. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology - CRIT REV ENVIRON SCI TECHNOL*. 42. [10.1080/10643389.2011.569873](https://doi.org/10.1080/10643389.2011.569873).

Sun, B., & Skylas-Kazacos, M. (1992). Chemical modification of graphite electrode materials for vanadium redox flow battery application—part II. Acid treatments. *Electrochimica Acta*, 37(13), 2459–2465. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(92\)87084-d](https://doi.org/10.1016/0013-4686(92)87084-d)

Sun, M., Zhang, Y., Liu, H., Zhang, F., Zhai, L., Wang, S. (2019). Room- temperature air oxidation of organic pollutants via electrocatalysis by nanoscaled Co-CoO on graphite felt anode. *Environment International*. Volume 131, 104977, ISSN 0160-4120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104977>

Szymczyk, M. (2021). Chromophore. In: Shamey, R. (eds) *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8\\_440-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_440-1)

Taghizadeh, A., Taghizadeh, M., Jouyandeh, M., Yazdi, M. K., Zarrintaj, P., Saeb, M. R., Lima, E. C., & Gupta, V. K. (2020). Conductive polymers in water treatment: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 312(113447), 113447. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113447>

Tahir M., Quang V. L., Muhammad B. A., How Yong Ng, Zhenghua Zhang. (2020). Fate and role of fluorescence moieties in extracellular polymeric substances

during biological wastewater treatment: A review, *Science of The Total Environment*. Volume 718. 137291. ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi-org.cideteq.biblio.remotexs.co/10.1016/j.scitotenv.2020.137291>

Tamilmani, J., Manickam, M., Samsudeen, N. (2019). Biohydrogen production from sugar industry effluents using nickel based electrode materials in microbial electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 44, Issue 32, Pages 17381-17388. ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.219>

Tan, W., Yang, Z., Feng, Q., Su, H., Xu, L., & Liu, C. (2023). Effect of NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and Ni-P modified anodes on the treatment of aging landfill leachate by microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 577(233233), 233233. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233233>

Tedetti, M., Guigue, C., & Goutx, M. (2010). Utilization of a submersible UV fluorometer for monitoring anthropogenic inputs in the Mediterranean coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, 60(3), 350-362. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.10.018>

Thieme, L., Hartung, A., Tramm, K., Graf, J., Spott, R., Makarewicz, O., & Pletz, M. W. (2021). Adaptation of the Start-growth-time method for high-throughput biofilm quantification. *Frontiers in microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.631248>

Titchou, F. E., Zazou, H., Afanga, H., El Gaayda, J., Ait Akbour, R., Nidheesh, P. V., & Hamdani, M. (2021). Removal of organic pollutants from wastewater by advanced oxidation processes and its combination with membrane processes. *Genie Des Procèdes [Chemical Engineering and Processing]*, 169(108631), 108631. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108631>

Torres González, V., Ávila-Niño, J. & Elsie Araujo. (2022). Facile fabrication of tailorable Ag/AgCl reference electrodes for planar devices. *Thin Solid Films*. Volume 757. 139413. ISSN 0040-6090. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139413>



- Tuinstra, F., y Koenig, J. L. (1970). Raman Spectrum of Graphite. *The Journal of Chemical Physics*, 53(3), 1126–1130. doi:10.1063/1.1674108
- Tursun, H., Liu, R., Li, J., Abro, R., Wang, X., Gao, Y., & Li, Y. (2016). Carbon material optimized biocathode for improving microbial fuel cell performance. *Frontiers in microbiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00006>
- UN-Water (2021): Summary Progress Update 2021: SDG 6 — water and sanitation for all. <https://www.unwater.org/publications/summary-progress-update-2021-sdg-6-water-and-sanitation-for-all/>
- Van der Bruggen, B. (2021). Sustainable implementation of innovative technologies for water purification. *Nat Rev Chem* 5, 217–218 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41570-021-00264-7>
- Vatankhah, A.R., Hosseini, M.A., Malekie, S. (2019). The characterization of gamma-irradiated carbon-nanostructured materials carried out using a multi-analytical approach including Raman spectroscopy. *Appl. Surf. Sci.* 488, 671–680.
- Vázquez Ruiz, M. Á., & Bocanegra, C. (2018). La industria aeroespacial en México: características y retos en Sonora. *Problemas del desarrollo*, 49(195), 153–176. <https://doi.org/10.22201/iiiec.20078951e.2018.195.63183>
- Verma, J., Kumar, D., Singh, N., Katti, S. S., & Shah, Y. T. (2021). Electricigens and microbial fuel cells for bioremediation and bioenergy production: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 2091–2126. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01199-7>
- Vieira, D. R., & Loures, P. L. (s/f). Maintenance, repair and overhaul (MRO) fundamentals and strategies: An aeronautical industry overview. *Ijcaonline.org*. Recuperado el 21 de agosto de 2023, de <https://www.ijcaonline.org/research/volume135/number12/vieira-2016-ijca-908563.pdf>

- Vila M. Y. J. (2013). “*Evaluación de la degradación y/o remoción de bifenilos policlorados en sustrato sólido*” (Tesis de licenciatura). Tecnológico de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Recuperado de: <http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/1014/48617.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Viola, C. O. (2020, junio 15). The future of water: How innovations will advance water sustainability and resilience worldwide. World Bank Blogs. <https://blogs.worldbank.org/water/future-water-how-innovations-will-advance-water-sustainability-and-resilience-worldwide>
- W. Chen, P. Westerhoff, J.A. Leenheer, K. Booksh. (2003). Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter. *Environ. Sci. Technol.* 37 5701-5710.
- Wang, L., & Villa, K. (2021). Self-propelled micro/nanomotors for removal of insoluble water contaminants: microplastics and oil spills. *Environmental Science. Nano*, 8(12), 3440–3451. <https://doi.org/10.1039/d1en00663k>
- Wang, S., Zhang, X., & Marsili, E. (2022). Electrochemical Characteristics of *Shewanella loihica* PV-4 on Reticulated Vitreous Carbon (RVC) with Different Potentials. *Applied. Molecules*, 27(16). <https://doi.org/10.3390/molecules27165330>
- Wang, Y., Zhang, X., & Lin, H. (2022). Removal of Cr(vi) and *p*-chlorophenol and generation of electricity using constructed wetland-microbial fuel cells based on *Leersia hexandra* Swartz: *p*-chlorophenol concentration and hydraulic retention time effects. *RSC Advances*, 12(24), 15123–15132. <https://doi.org/10.1039/d2ra01828d>
- Wei E. Huang, Robert I. Griffiths, Ian P. Thompson, Mark J. Bailey, and Andrew S. Whiteley. (2004). Raman Microscopic Analysis of Single Microbial Cells. *Anal. Chem.* 76, 4452-4458
- Wheland, R. C. (1976). Correlation of electrical conductivity in charge-transfer complexes with redox potentials, steric factors, and heavy atom effects.

Journal of the American Chemical Society, 98(13), 3926–3930.  
<https://doi.org/10.1021/ja00429a031>

Wu, T., & Brant, J. A. (2020). Magnetic Field Effects on pH and Electrical Conductivity: Implications for Water and Wastewater Treatment. *Environmental Engineering Science*. doi:10.1089/ees.2020.0182

Wu, X., Shi, Z., Qiao, Y., Zou, Z., Guo, C., & Li, C. M. (2021). Macroporous spider net-like NiO nanowire on carbon nanowire to grow a biofilm with multi-layered bacterium cells toward high-power microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 506(230133), 230133.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230133>

Xian-Zhong, F., Jie, W., Jie, L., Jian, D., Shuo, C., Xue-Meng, W., Yun-Jie, W., Hou-Qi, L., Xin, D., Dong-Feng, L., Wen-Wei, L. (2023). Heavy-metal resistant bio-hybrid with biogenic ferrous sulfide nanoparticles: pH-regulated self-assembly and wastewater treatment application. *Journal of Hazardous Materials*. Volume 446. 130667, ISSN 0304-3894. DOI: <https://doi.org/cideteq.biblio.remotexs.co/10.1016/j.jhazmat.2022.130667>

Xiaobo Wang, Yuanyuan Qin, Juanjuan Qin, Yanrong Yang, Ting Qi, Rongzhi Chen, Jihua Tan, Kang Xiao. (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.

Xu, H. Guo, C. Chai, N. Li, X. Lin, W. Xu. (2022). Anodized graphite felt as an efficient cathode for in-situ hydrogen peroxide production and Electro-Fenton degradation of rhodamine B. *Chemosphere* 286, 131936.

Xu, J., Yang, J., Zhao, N. *et al.* (2013). Evaluation of efficiency of aircraft liquid waste treatment and identification of daily inspection indices: a case study in Changchun, China. *Environ Monit Assess* 185, 6063–6070.  
<https://doi.org/10.1007/s10661-012-3006-1>

- Yan, S., Zhang, N., Li, J., Wang, Y., Liu, Y., Cao, M., & Yan, Q. (2021). Characterization of humic acids from original coal and its oxidization production. *Scientific Reports*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94949-0>
- Yang, R., Zhao, N., Xiao, X., Yu, S., Liu, J., Liu, W. (2016). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons by four-way parallel factor analysis in presence of humic acid, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. Volume 152. Pages 384-390. ISSN 1386-1425. DOI; <https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.07.094>
- Yaoqing, X., Bingning, L., Jie, O., & Yanwen, Y. (2019). Rapid screening of mineral oil aromatic hydrocarbons (MOAH) in grains by fluorescence spectroscopy. *Química de Alimentos*, 294, 458-467. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.057>
- Yaqoob, A. A., Serrà, A., Nasir, M., Ibrahim, M., Suriaty A. (2021a). Self-assembled oil palm biomass-derived modified graphene oxide anode: An efficient medium for energy transportation and bioremediating Cd (II) via microbial fuel cells. *Arabian Journal of Chemistry*. Volume 14, Issue 5. 103121, ISSN 1878-5352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103121>
- Yaqoob, A. A., Serrà, A., Nasir, M., Ibrahim, M., Suriaty A. (2021b). Modified graphene oxide anode: A bioinspired waste material for bioremediation of Pb<sup>2+</sup> with energy generation through microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*. Volume 417. 128052. ISSN 1385-8947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128052>
- Yaqoob, A. A., Serrà, A., Nasir, M., Ibrahim, M., Suriaty A. (2021c). Application of oil palm lignocellulosic derived material as an efficient anode to boost the toxic metal remediation trend and energy generation through microbial fuel cells. *Journal of Cleaner Production*. Volume 314. 128062, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128062>

- Yong, J., Peng L., Changyong Z., Yanhong B., Xueliang S., Helan Z., Xufei Y., Feng Z., Xia H. (2016). Periodic polarity reversal for stabilizing the pH in two-chamber microbial electrolysis cells. *Applied Energy*. Volume 165. Pages 670-675. ISSN 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.001>
- You, S., Ma, M., Wang, W., Qi, D., Chen, X., Qu, J., Ren, N. (2016). 3D Macroporous Nitrogen-Enriched Graphitic Carbon Scaffold for Efficient Bioelectricity Generation in Microbial Fuel Cells. *Advance Science*. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201601364>
- Yu, D., Zhai, J., Liu, C., Zhang, X., Bai, L., Wang, Y., & Dong, S. (2017). Small microbial three-electrode cell based biosensor for online detection of acute water toxicity. *ACS Sensors*, 2(11), 1637–1643. <https://doi.org/10.1021/acssensors.7b00484>
- Yu, Q., Liu, R., Chen, J., & Chen, L. (2019). Electrical conductivity in rural domestic sewage: An indication for comprehensive concentrations of influent pollutants and the effectiveness of treatment facilities. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 143(104719), 104719. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104719>
- Yu, X., Wang, K., & Wang, X. (2023). Electrochemical oxidation of phenol in chloride containing electrolyte using a carbon-coated Ti4O7 anode. *Electrochimica Acta*, 449(142233), 142233. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142233>
- Zeng, L., Zhang, W., Xia, P., Wenqiang T., Changchun Y., Miao H. (2018). Porous Ni0.1Mn0.9O1.45 microellipsoids as high-performance anode electrocatalyst for microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*. Volume 102. Pages 351-356, ISSN 0956-5663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.11.046>
- Zeng, R., Mannaerts, CM y Lievens, C. (2023). Evaluación de métodos de análisis de espectros UV-VIS para cuantificar las propiedades de absorción de materia orgánica disuelta cromófora (CDOM). *Fronteras de las ciencias ambientales*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1152536>

- Zhang, D., Zhang, J., Wang, H., Cui, C., Jiao, W., Gao, J., & Liu, J. (2019). Novel Ni foam-based nickel oxalate derived porous NiO nanostructures as highly efficient electrodes for the electrooxidation of methanol/ethanol and urea. *Journal of Alloys and Compounds*. Volume 806. Pages 1419-1429. ISSN 0925-8388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.127>
- Zhang, H., Yang, Y., Ren, D., Wang, L., & He, X. (2021). Graphite as anode materials: Fundamental mechanism, recent progress and advances. *Energy Storage Materials*, 36, 147–170. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.12.027>
- Zhang, H., Zhao, L., Huang, X., Cheng, K., Wang, G., & Cao, D. (2016). Facile preparation of three-dimensional Ni(OH)<sub>2</sub>/Ni foam anode with low cost and its application in a direct urea fuel cell. *New J. Chem.*, 2016,40, 8673-8680. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6NJ01648K>
- Zhang, J., Chi, Q., Albrecht, T., Kuznetsov, A. M., Grubb, M., Hansen, A. G., Wackerbarth, H., Welinder, A. C., & Ulstrup, J. (2005). Electrochemistry and bioelectrochemistry towards the single-molecule level: Theoretical notions and systems. *Electrochimica Acta*, 50(15), 3143–3159. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.12.044>
- Zhao F., Slade, R. C., Varcoe, J. R. (2009). Techniques for the study and development of microbial fuel cells: an electrochemical perspective. *Chem. Soc.*, pp. 1926-1939. DOI: 10.1039/B819866
- Zheng, S., Yang, F., Chen, S., Liu, L., Xiong, Q., Yu, T., Zhao, F., Schröder, U., Hou, H. (2015). Binder-free carbon black/stainless steel mesh composite electrode for high-performance anode in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, volumen 284, pp. 252-257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.014>
- Zhifei, W., Qianqian S., Jinbo X., Rongfeng G., Qi L., Xuguang L., Husheng J., Yucheng W. (2020). 3D hierarchically porous NiO/NF electrode for the removal of chromium (VI) from wastewater by electrocoagulation. *Chemical*

Engineering Journal. Volume 402. 126151. ISSN 1385-8947. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126151>

Zhong, D., Liu, Y., Liao, X., Zhong, N., & Xu, Y. (2018). Facile preparation of binder-free NiO/MnO<sub>2</sub>-carbon felt anode to enhance electricity generation and dye wastewater degradation performances of microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(51), 23014–23026. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.144>

Zhong, D., Liu, Y., Liao, X., Zhong, N., Xu, Y. (2018a). Enhanced electricity generation performance and dye wastewater degradation of microbial fuel cell by using a petaline NiO@ polyaniline-carbon felt anode. *Bioresource Technology*. Volume 258. Pages 125-134. ISSN 0960-8524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.117>

Zhong, D., Liu, Y., Liao, X., Zhong, N., Xu, Y. (2018b). Facile preparation of binder-free NiO/MnO<sub>2</sub>-carbon felt anode to enhance electricity generation and dye wastewater degradation performances of microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 43, Issue 51. Pages 23014-23026. ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.144>

Zhong, Y., Pan, Z., Wang, X., Yang, J., Qiu, Y., Huan. Q., Li, W. (2019). Hierarchical Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nano-Micro Arrays Featuring Superior Activity as Cathode in a Flexible and Rechargeable Zinc–Air Battery. *Advance science*. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.201802243>

Zhou, Z., Guo, L., Osburn, C.L. (2017). Fluorescence EEMs and PARAFAC Techniques in the Analysis of Petroleum Components in the Water Column, in: McGenity, T.J., Timmis, K.N., Nogales, B. (Eds.), *Hydrocarbon and Lipid Microbiology Protocols: Petroleum, Hydrocarbon and Lipid Analysis*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 179–200. [https://doi.org/10.1007/8623\\_2015\\_137](https://doi.org/10.1007/8623_2015_137)

Zhuang, S., Shao, C., Ye, J., Li, B., Wang, X. (2020). Enhancing oxygen reduction reaction in air-cathode microbial fuel cells treating wastewater with cobalt and

nitrogen co-doped ordered mesoporous carbon as cathode catalysts. Environmental Research. Volume 191. 110195. ISSN 0013-9351. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110195>

Ziege, R., Tsigirigi, A.-M., Large, B., Serra, DO, Blank, KG, Hengge, R., Fratzl, P. y Bidan, CM (2021). Adaptación del crecimiento, la morfología y las propiedades mecánicas de la biopelícula de *Escherichia coli* al contenido de agua del sustrato. Ciencia e ingeniería de biomateriales ACS , 7 (11), 5315–5325. <https://doi.org/10.1021/acsbmaterials.1c00927>



## Anexos

### Anexo A. Técnicas electroquímicas

Las técnicas electroquímicas se caracterizan por una alta sensibilidad, su selectividad y gran precisión. El límite de detección puede ser menor de  $10^{-10}$  M. Las técnicas electroquímicas más utilizadas para el análisis de los sistemas electroquímicos usualmente son la voltamperometría cíclica (VC), la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE), y la cronoamperometría (CA). Las técnicas electroquímicas pueden ser utilizadas para analizar una variedad de parámetros en las celdas de electrólisis microbianas. Uno de los parámetros más importantes es el potencial eléctrico. El potencial eléctrico es una medida de la diferencia de voltaje entre un electrodo y el medio circundante. En una CEM, los potenciales eléctricos pueden ser utilizados para determinar si las bacterias están realizando las reacciones correctamente.

#### Voltamperometría cíclica

Es una técnica electroquímica donde se aplica un potencial eléctrico a un electrodo sumergido en una disolución y mide la intensidad de corriente que está circulando por el electrodo. Al aplicar esta técnica a la CEM se distingue si las bacterias usan mediadores redox móviles para transferir sus electrones, o pasan los electrones directamente a través de compuestos asociados a la membrana, que puede ser de nafión, ultrex o puente salino (Logan *et al.*, 2006). Es importante mencionar que es una técnica sensible a ruidos y golpes fuertes, por lo tanto, se debe tener precauciones cuando se emplee. Dentro de las complejidades de esta técnica, se ha visto que en ocasiones se pueden producir varias reacciones electroquímicas para potenciales específicos, por lo tanto, la concentración de especies alrededor del electrodo cambia durante la exploración. Por último, es importante decir que en un estudio de voltamperometría cíclica consta de una celda electroquímica, un

potenciostato, un convertidor de corriente a potencial eléctrico y un programa de cómputo para la adquisición de datos, figura 49.

#### Monitoreo del sistema

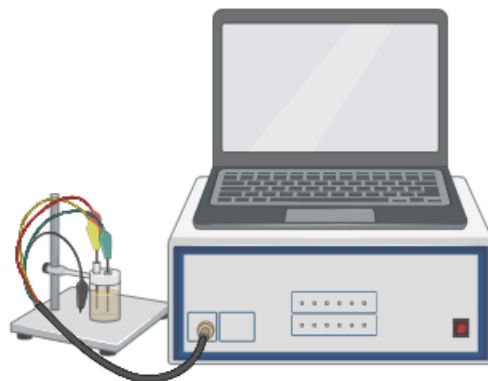


Figura 49. Sistema para la obtención de datos.

La técnica de la voltamperometría cíclica es representada por la ecuación de Randles Sěvcik, la cual diferencia a tres sistemas, (a) reversible, (b) cuasi reversible e (c) irreversible:

$$\text{Sistema reversible} \rightarrow i_p = [(2.69 \times 10^5) ((n^{\frac{3}{2}})(A))] [(D_o^{\frac{1}{2}})(C_o^*)(v^{\frac{1}{2}})] \quad \text{Ec. 1}$$

$$\text{Sistema cuasi-reversible} \rightarrow i_p = [(FAD_o^{\frac{1}{2}} C_o)] * [((\frac{F}{RT})^{\frac{1}{2}}(v^{\frac{1}{2}}) (\psi)(E))] \quad \text{Ec. 2}$$

$$\text{Sistema irreversible} \rightarrow i_p = [(2.69 \times 10^5)(A)(C_o^*)] [(\alpha^{\frac{1}{2}}) (D_o^{\frac{1}{2}}) (v^{\frac{1}{2}})] \quad \text{Ec.3}$$

Donde:

$i_p$  = corriente de pico (A).

$n$  = número de electrones transferidos (mol  $e^-$ ).

$A$  = área electroactiva ( $\text{cm}^2$ ).

$T$  = temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$R$  = constante de los gases ( $\text{L} \cdot \text{atm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

$D_o$  = coeficiente de difusión de la especie oxidada o reducida ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

$C_o$  = concentración del electrolito de interés ( $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$ ).

$v$  = velocidad de barrido ( $\text{V} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

F = constante de Faraday = 96 485 (C mol<sup>-1</sup>).

α = coeficiente de transferencia (1).

ψ (E) = coeficiente de Nicholson (1).

Con estas ecuaciones se puede conocer el tipo de sistema que se tiene, los coeficientes de difusión, la concentración de las especies, el área electroactiva, así como estudiar algunos mecanismos de reacción obteniendo las variables que se encuentran descritas en la ecuación de Randles Sevcik, de acuerdo con el sistema en estudio.

### Cronoamperometría

La cronoamperometría es una técnica electroquímica en la que el potencial eléctrico de un electrodo (ánodo o cátodo) mantiene un valor constante y se obtiene como respuesta una corriente en función del tiempo (Zhao, 2009).

En los sistemas bioelectroquímicos esta técnica sirve para monitorear el crecimiento y otros comportamientos de los microorganismos, así como determinar los coeficientes de difusión, cinética y los mecanismos por el cual se desarrollan las reacciones (Logan, 2008). Es útil para estimular la formación de la biopelícula en el ánodo, se puede determinar la concentración de la especie redox, los electrones transferidos, también sirve para determinar el área electroactiva de los materiales que están en el electrodo donde se hace uso de la ecuación de Cottrell que consiste en:

$$\text{Disco plano} \rightarrow i(t) = i_d(t) = \frac{nFAD_0^{\frac{1}{2}}C_0^*}{(\pi t)^{\frac{1}{2}}} = Kt^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 4}$$

$$\text{Electrodo esférico} \rightarrow i(t) = i_d(t) = \frac{nFAD_0^{\frac{1}{2}}C_0^*}{(\pi t)^{\frac{1}{2}}} + \frac{nFAD_0C_0^*}{r_0} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

i = corriente de celda (A).

$n$  = número de electrones transferidos ( $\text{mol e}^-$ ).

$F$  = constante de Faraday =  $96\,485 \text{ (C mol}^{-1}\text{)}$ .

$A$  = área electroactiva ( $\text{cm}^2$ ).

$D_0$  = coeficiente de difusión de la especie redox ( $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ).

$C_0$  = concentración de la especie redox ( $\text{mol L}^{-1}$ ).

$\pi^{1/2}$  = constante de proporcionalidad (1).

$t$  = tiempo al momento de la medición (s).

$K$  = constante para reacción controlada por difusión para un electrodo plano (1).

### Espectroscopia de impedancia electroquímica

Es una técnica electroquímica que se basa en el uso de una señal externa de corriente alterna (CA), que es aplicado a un electrodo sumergido en algún electrolito para medir la respuesta en corriente a diferentes frecuencias. En ciertas ocasiones es posible aplicar una señal de corriente de baja intensidad y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, un equipo electrónico procesa las mediciones de potencial – tiempo – corriente dando como resultado una serie de valores correspondiente a cada frecuencia estudiada, esta relación de valores de impedancia y frecuencia se le denomina “espectro de impedancias”. En CEM sirve para analizar la resistencia interna del sistema, para comprender las reacciones electroquímicas que ocurren en los electrodos y examinar la biopelícula formada junto al análisis de la cinética de la reacción.

En esta técnica hay varios elementos que conforman al circuito resultante como los elementos de fase constante (Q), los cuales, se relacionan a la energía reactiva y la energía resistiva en un sistema resonante. Si el valor de Q es de  $n = 0$ , se puede considerar como una resistencia que se presenta en un momento dado (el de la medición); o capacitancias para valores de  $n = 1$  o como elementos de Warburg semi infinito para un valor de  $n = \frac{1}{2}$ . En síntesis, la representación más sencilla de una interfase electrodo - electrolito se puede hacer con el circuito equivalente mostrado en la figura 50.

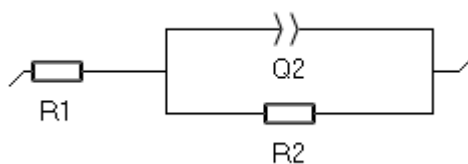


Figura 50. Circuito simple. Donde R1 es una resistencia a la solución, Q2 un elemento de fase constante y R2 una segunda resistencia a la carga por interfaz electrodo - electrolito. Fuente: elaboración propia.

## Potencial a circuito abierto

Se llama Potencial a Circuito Abierto (PCA) o potencial de equilibrio ( $E_{Eq}$ ) porque no está conectado a una forma de trayectoria eléctrica completa. El  $E_{Eq}$  da información de las respuestas que el sistema real pueda brindar relacionado a la corriente eléctrica.

## Anexo B. Técnicas espectroscópicas

Es el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, con absorción o emisión de energía radiante, se denomina espectroscopía a la medición de la cantidad de energía radiante que absorbe un sistema químico en función de la longitud de onda de la radiación. La teoría ondulatoria de la luz propone la idea de que un haz de luz es un flujo de cuantos de energía llamados fotones; la luz de una cierta longitud de onda está asociada a los fotones, cada uno de los cuales posee una cantidad definida de energía.

## Absorbancia UV-VIS

Se considera la técnica analítica más antigua que se puede definir como la técnica espectrofotométrica que se utiliza para medir la intensidad de la luz en las regiones UV (10–400 nm) y VIS (400–800 nm) en función de la longitud de onda (Akash y

Rehman, 2020). El analito absorbe la luz de una longitud de onda específica (solo UV y VIS) y se mide la cantidad de radiación absorbida por el analito. El espectro producido después de la absorción de radiación UV-VIS resulta de la interacción de radiaciones electromagnéticas en la región UV-VIS con el analito. Forma la base para analizar una variedad de sustancias como compuestos orgánicos, inorgánicos, bioquímicos y farmacéuticos. En la espectroscopia UV-VIS, la absorción de radiaciones se produce a niveles de energía electrónica vibracional y rotacional de las moléculas; por lo tanto, esta técnica también se conoce como espectroscopia electrónica (Justin, 2022). Los datos espectroscópicos UV-vis pueden brindar información cualitativa y cuantitativa de un compuesto o molécula determinada (Raja & Barrón, 2022). La cantidad de absorbancia se puede medir a través de las siguientes ecuaciones:

$$A = \text{Log}_{10} \frac{p_0}{p} \quad \text{Ec. 6}$$

$$A = \text{Log}_{10} \frac{1}{TA} = \text{Log}_{10} \frac{100}{\%TA} = 2 - \text{Log}_{10} \%T \quad \text{Ec. 7}$$

Donde T es la transmitancia y A es la absorbancia.

La Ley de Beer-Lambert es útil para expresar de qué modo la materia absorbe la radiación (Kyriacou *et al.*, 2019), esta ley establece que la pérdida de la intensidad en el momento en el que se encuentra en el medio es directamente proporcional a la intensidad y a la distancia del recorrido. Su principal utilidad es conocer la determinación de la concentración de las disoluciones, la absorbancia con esta ley se establece con la ecuación:

$$A = \epsilon bc \quad \text{Ec. 8}$$

Donde  $\epsilon$  es la absortividad molar de las especies absorbentes, b es la longitud del recorrido y c es la concentración de las especies absorbentes. En la figura 51 se muestra el seguimiento de la medición de la absorbancia.

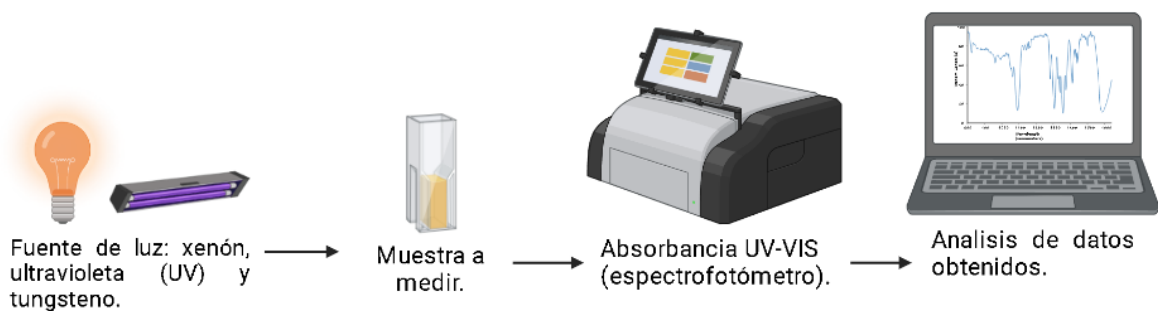


Figura 51. Seguimiento de la medición de absorbancia. Se muestra la fuente de luz utilizada para medir la longitud de onda de la muestra a través del equipo para después analizar los datos. Fuente: elaboración propia con ayuda del programa Biorender.

La absorción de la luz se produce cuando los electrones de los contaminantes en el agua absorben energía de los fotones y saltan a un nivel de energía más alto. La cantidad de luz absorbida depende de la concentración de los contaminantes en el agua y de las propiedades de absorción de estos.

### Espectroscopia de fluorescencia

La fluorescencia es un tipo de luminiscencia causada por fotones que excitan una molécula, elevándola a un estado de excitación electrónica mayor. Utiliza un haz de luz que excita los electrones en las moléculas de ciertos compuestos y lo estimula a que emitan luz. Esa radiación se dirige hacia un filtro y hacia un detector para medir e identificar la molécula o los cambios en la molécula (Kannan *et al.*, 2022). Es una emisión espontánea permitida por espín de un fotón desde el estado excitado, acompañada por la transición del fluoróforo al estado fundamental. Es un fenómeno que concierne a especies ricas en energía (fluoróforos excitados) que interaccionan fuertemente con las moléculas circundantes y sus propiedades (incluidas las características de fluorescencia) están influenciadas por interacciones con el microambiente, ver figura 44. La matriz de excitación-emisión se obtiene registrando los espectros de emisión para una serie de longitudes de onda de excitación, proporcionando así características completas de las propiedades de

absorción y fluorescencia de todos los componentes emisores en la muestra estudiada (Christensen *et al.*, 2006). Es una técnica que se utiliza frecuentemente para estudiar la conformación y dinámica de macromoléculas naturales y sintéticas. Este es un método experimental muy versátil, que se ha utilizado tanto en la ciencia macromolecular y coloidal como en la investigación biomédica y también en una serie de estudios de compuestos de baja masa molar (Limpouchová & Procházka, 2016).

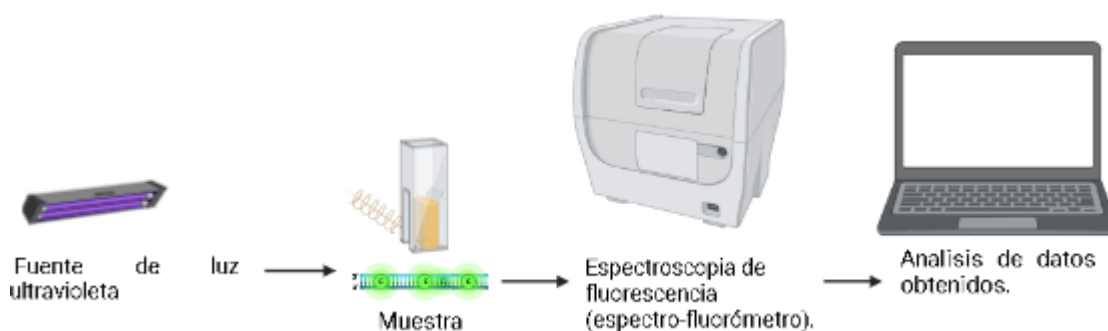


Figura 52. Medición de espectroscopia de fluorescencia

En la figura 52, se muestra un esquema detallado de la medición de espectroscopia de fluorescencia, donde se desarrolla en varias etapas, la primera es la preparación de la muestra, en donde a través de un equipo de espectrofluorometría la muestra es expuesta a una fuente de luz, y de ahí se emiten señales para poder determinar que puede contener la muestra.

Las principales ventajas de la fluorescencia son la mayor sensibilidad, hasta 1000 veces mayor que las técnicas de absorción espectrofotométrica. La alta selectividad de la fluorescencia la hace muy adecuada para estudiar matrices de bebidas multifluorofóricas. La alta sensibilidad y selectividad permiten la detección y evaluación de analitos que ocurren incluso a baja concentración en matriz compleja y en presencia de interferencias. La aplicación de longitudes de onda de excitación y emisión en mediciones de fluorescencia genera datos de segundo orden (Sikorska, 2019).



## Espectroscopia Raman

Esta es una técnica de dispersión, en la cual, la muestra se ilumina con un rayo láser monocromático que interactúa con las moléculas de la muestra y origina una luz dispersa, ver figura 45. La luz dispersada que tiene una frecuencia diferente a la de la luz incidente (dispersión inelástica) se usa para construir el denominado “espectro Raman” los fotones son absorbidos por la muestra y luego reemitidos (Bumrah y Sharma, 2016). La frecuencia de estos fotones reemitidos se desplaza de arriba abajo y viceversa en comparación con la frecuencia monocromática original, lo que se denomina efecto Raman. Este cambio proporciona información de las transiciones vibracionales, rotacionales y otras de baja frecuencia en las moléculas. El efecto Raman se descubrió en 1928, y su aplicación para espectroscopía ha demostrado ser una técnica eficiente para determinar además de la composición química, también la estructura molecular de los compuestos analizados (Cialla-May *et al.*, 2019).

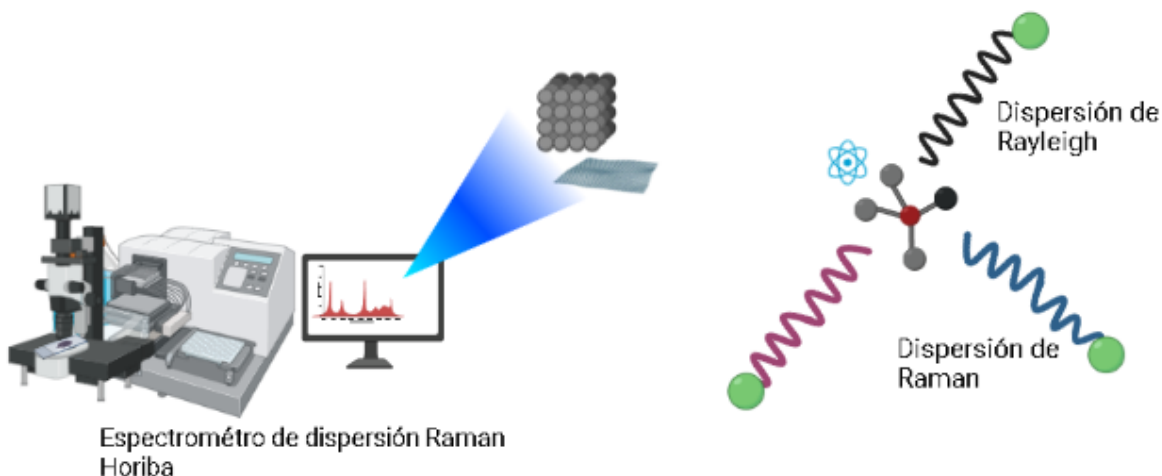


Figura 53. Espectroscopia Raman y efectos de dispersión

En la figura 53, se muestra el equipo de dispersión de raman, donde se analizó la muestra de los electrodos para poder analizar la estructura de estos, a través de las señales que las transiciones vibracionales y rotacionales. Las especificaciones técnicas de la fuente de excitación, como longitud de onda, ancho de línea (monocromaticidad), potencia óptica,

etc., son cruciales para obtener espectros Raman de buena calidad. Por lo general, el espectro Raman aparece entre 10 y 200 nm por encima (*Stokes*) y por debajo (*anti-Stokes*) de la longitud de onda de excitación (Neethu *et al.*, 2021). Esta técnica tiene la ventaja de no ser destructiva, además de que es factible manipular y observar las muestras, algunas de las aplicaciones más utilizadas es la caracterización de diferentes materiales como los carbonosos, inorgánicos, y minerales, entre otros. Así pues, se puede decir que esta técnica permite obtener la "huella dactilar" de las muestras analizadas (Bumbrah y Sharma, 2016).

### Anexo C. Técnicas microscópicas

Son el conjunto de procedimientos de investigación que utilizan un microscopio para obtener imágenes de determinadas estructuras, existen dos grandes grupos de técnicas microscópicas de caracterización de materiales: la microscopía óptica y la microscopía electrónica. En la primera, los microscopios utilizan fotones de luz para amplificar las muestras, mientras que, en la segunda, las imágenes se generan por la interacción entre electrones y las diferentes sustancias. Al emplear partículas con una longitud de onda inferior, la microscopía electrónica tiene mayor resolución (Research, 2022).

#### Microscopia Electrónica de barrido (MEB)

Esta técnica puede brindar información sobre topografía, morfología, composición, química, orientación de granos, análisis elemental, espesor de películas y defectos estructurales de la muestra (Mokobi, 2022) . El microscopio electrónico de barrido utiliza electrones emitidos y funciona según el principio de aplicar energía cinética para producir señales sobre la interacción de los electrones. Estos electrones se denominan electrones secundarios y electrones retrodispersados difractados que se utilizan para ver elementos cristalizados y fotones, estos electrones; secundarios y retrodispersados se utilizan para producir una imagen (Nasrollahzadeh, 2019). Los electrones secundarios emitidos por la muestra desempeñan el papel principal de detectar la morfología y la topografía de la muestra,

mientras que los otros electrones muestran contraste en la composición de los elementos de la muestra (Mokobi, 2022), la MEB es el aparato líder que es capaz de lograr una imagen visual detallada de una partícula con alta calidad y resolución espacial de 1 nm (Akhtar *et al.*, 2018).

### Espectroscopia de energía dispersa (EDS O EDX)

La espectroscopia de rayos X de energía dispersiva es una técnica de análisis elemental y de determinación de la composición química, asociada a la microscopia electrónica de barrido. El método se basa en la generación de rayos X característicos, que revelan la identidad de los elementos presentes en la muestra. Cuando el haz de electrones golpea la muestra, el electrón de la capa interna del átomo es expulsado y el electrón de la capa externa llena el hueco o vacío. La diferencia entre la capa interna de alta energía y la capa externa de baja energía se emite en forma de rayos X. El número y la energía de los rayos X se miden con el espectrómetro de dispersión de energía, lo que proporciona información acerca de la composición elemental de la muestra (Ismail y Matsuura, 2019).

### Difracción de rayos X (XRD)

La difracción de rayos X se basa en la interferencia constructiva de rayos X monocromáticos y una muestra cristalina. Estos rayos X son generados por un tubo de rayos catódicos, filtrados para producir radiación monocromática, colimados para concentrarlos y dirigidos hacia la muestra. La interacción de los rayos incidentes con la muestra produce interferencia constructiva y un rayo difractado cuando las condiciones cumplen la ley de Bragg ver ecuación (9).

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

d: es la distancia interplanar del cristal (nm).

$\theta$ : es el ángulo de difracción.

$\lambda$ : es la longitud de onda de los rayos X (nm).

Los rayos X se generan en un tubo de rayos catódicos calentando un filamento para producir electrones, acelerando los electrones hacia un objetivo aplicando un voltaje y bombardeando el material objetivo con electrones. Cuando los electrones tienen suficiente energía para desalojar los electrones de la capa interna del material objetivo, se producen espectros de rayos X característicos, los cuales ofrecen información sobre la estructura cristalográfica de las muestras que permite identificar las fases de esta, ver figura 46.

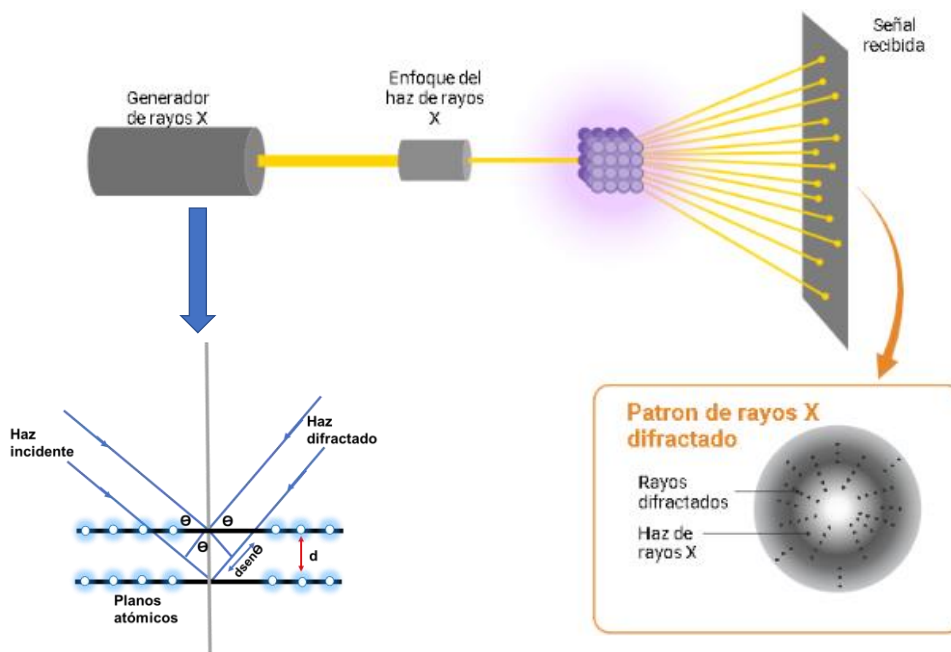


Figura 54. Difracción de rayos X. Fuente de elaboración: Propia con ayuda del software Biorender.

En la figura 54, se muestra cómo se generan los rayos X para poder pasar a través de la muestra y reflejar las señales que proporcionan datos para el análisis de la muestra, la cual nos da información para poder detectar los elementos en la muestra y composición de esta.

## Anexo D. Medición de otros parámetros

La medición de parámetros como pH, DQO, COT, conductividad, potencial de reducción (ORP), permite determinar si en el sistema bioelectroquímico hay degradación de contaminantes relacionada a la concentración del sustrato de interés, permite medir la eficiencia de descontaminación del sustrato, determinar si hay presencia de metales, y si es un medio alcalino o ácido.

### Demanda química de oxígeno

Es un parámetro que indica la cantidad de sustancias susceptibles a ser oxidadas en una muestra líquida, se utiliza para medir el grado de contaminación y está dado en  $\text{mg L}^{-1}$ . En la norma mexicana NMX-AA-030/1-SCFI-2012, se establecen las reacciones que se obtienen al combinar estos compuestos, junto con su curva de calibración. Este parámetro se puede medir a través de la espectrofotometría UV-VIS, posteriormente, se determina la cantidad de materia orgánica oxidada por el dicromato de potasio presente en la muestra.

### Carbono orgánico total

Es un parámetro importante en el tratamiento de aguas residuales, ya que puede ser utilizado como indicador de la cantidad de materia orgánica presente en el agua. El COT se refiere a la cantidad total de carbono orgánico presente en una muestra de agua, incluyendo compuestos como los hidrocarburos, carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos. La medición del COT puede ser utilizada para determinar la eficacia de un sistema de tratamiento de aguas residuales, ya que un aumento en la cantidad de COT después del tratamiento puede indicar que la materia orgánica no ha sido eliminada por completo.

## Potencial de hidrógeno (pH)

El pH se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno ( $H^+$ ) en una solución. Un pH de 7 se considera neutral, mientras que un pH menor que 7 indica acidez y un pH mayor que 7 indica alcalinidad (Wu y Brand 2020; Obileke *et al.*, 2021).

## Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo para permitir el paso de la corriente eléctrica, su unidad es el  $S \cdot m^{-1}$  o  $\Omega^{-1} m^{-1}$ . Los aislantes, los semiconductores y los conductores tienen conductividades de  $10^{-11}$ ,  $10^{-8}$  y  $10^2$ , y  $10^2 S \cdot cm^{-1}$ , respectivamente (Sharaf 2020). En el agua, la conductividad eléctrica se da a través de la disociación electrolítica, es decir, cuando una sustancia ya sea base o ácido se disocia en el agua, se producen iones de carga positiva o negativa, algunos factores que pueden afectar a la conductividad eléctrica son; la contaminación, la temperatura, los campos eléctricos y la frecuencia. La fórmula para calcular la conductividad eléctrica es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica, es el recíproco de la resistividad, ver ecuación (10):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:  $\sigma$  = conductividad específica ( $\Omega^{-1} m^{-1}$ ) y  $\rho$  = resistencia específica ( $\Omega m$ ).

En los conductímetros con sistema amperimétrico, se aplica un diferencial de potencial conocido como (V) a dos electrodos y se mide la corriente alterna, que pasa a través de ellos. Según la ley de Ohm, las dos dimensiones están sujetas a la relación mostrada en la ecuación (11).

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde: R es la resistencia ( $\Omega$ ), V es el voltaje conocido (V) e I es la corriente (A).

## Potencial de reducción de oxígeno (ORP)

Es una medida de la capacidad de los sistemas químicos/bioquímicos para oxidarse (perder electrones) o reducirse (ganar electrones). Un valor positivo indica un estado oxidado, mientras que un valor negativo indica un estado reducido (Myers, 2019). El ORP se expresa como un potencial eléctrico (un voltaje). La unidad más común para expresar ORP es el milivolt (mV), y la mayoría de los medidores pueden leer valores que van desde -1000 mV a +1000 mV. Cuanto más extremo sea el valor negativo o positivo, más reductor u oxidante es el fluido.

## Anexo E. Obtención de lixiviado de composta (microorganismos)

- a) Se diluyó 200 mL de composta (medir en vaso de precipitados sin compactar el material), con 300 mL de agua destilada, y se agregó 50 mM de cloruro de potasio y acetato de sodio y acetato de sodio 10 mM (considerar el volumen de agua únicamente para preparar la solución).
- b) Disolver sales primero en el agua y luego añadir la composta.
- c) La mezcla anterior se mantuvo en agitación con un agitador magnético y una parrilla (sin calentar) durante 24 h, a temperatura ambiente. La agitación no debe ser muy fuerte porque reduce el tamaño de partícula demasiado.

Los valores se pueden ajustar, pero mantener la relación 2 partes de composta y 3 partes de líquido.

COMPUESTO	1L	500 mL	250 mL	200 MI	100 mL
Acetato de sodio, 10 mM	0.82 g	0.41 g	0.205 g	0.164 g	0.082 g
KCL, 50 mM	3.72 g	1.864 g	0.931 g	0.746 g	0.373 g

<b>Composta, mL</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>
<b>Líquido, mL</b>	150	300	450	600
<b>Total, mL</b>	250	500	750	1000

Fuente: elaboración propia.

## Anexo F. Tratamiento de los electrodos

1. Se cortará fieltro de carbón en cuadrados de (4 cm<sup>2</sup>), dejando una “pestaña” para conectarlos a un alambre de cobre, el cual se cubrirá con resina epóxica, para evitar el contacto del cobre con los microorganismos.
2. Una vez seca la resina, se activará el área disponible de los electrodos de fieltro de carbón introduciéndolos en ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 98 %, J.T. Baker) 0.5 M durante una hora y después se someterá a un tratamiento térmico a 100 °C en un horno Felisa (FE-292D) durante 24 h. La activación es necesaria debido a que modifica la superficie del fieltro de carbón (ya que es hidrofóbico), permitiendo hacer contacto con los microorganismos y el agua residual aeronáutica.

Preparación de la solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:

1. Se preparó una solución de 0.250 L de ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 0.5 M, con los cálculos correspondientes a la molaridad respecto a la solución:

$$M = \frac{g}{PM \times V} \quad (1)$$

Donde:

M es la molaridad, g número de moles o gramos que se agregaron a la solución, PM es el peso molecular del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> que corresponde a 98.079 g/mol, y V es el volumen en litros que se preparó, es decir 0.250 L.



Despejando a g:  $g = M(PM)(V)$ ; se realizó el cálculo sustituyendo en la fórmula los valores ya mencionados:  $g = 0.5 * 98.079 \frac{g}{mol} * 0.250L$  y esto dio como resultado: 12.259 g; pero el reactivo se encuentra en estado líquido, por lo tanto, se tuvo que obtener de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

Donde:

$\rho$  es la densidad del  $H_2SO_4$  con un valor de  $1.84 \text{ g cm}^{-3}$ , m es la masa y v el volumen.

Despejando a V:  $V = \frac{m}{\rho}$ ; se realizó el cálculo correspondiente

$$V = \frac{12.259 \text{ g}}{1.84 \text{ g cm}^{-3}}$$

Dando como resultado: 6.66 mL que se añadieron en un matraz de 0.250 L con agua desionizada y aforando hasta la marca.

#### Anexo G. Cálculo del área a través de la ecuación de Randles Sevcik

1. Se preparó una solución de ferrocianuro de la marca Sigma Aldrich a una concentración de 10 mM con electrolito de  $KNO_3$  de la marca Karal S.A. de C.V. a una concentración de 100 mM, preparado para 60 mL.
2. Después de tener la solución ya preparada, se colocaron los electrodos para instalar la celda y se conectaron las conexiones de los cables.
3. Se programaron varias voltamperometrías cíclicas (5 en total) a diferentes velocidades de barrido (5,10,15,20 y 25 mV/s). Se usaron dos ventanas electroquímicas la primera de -0.6 V a 1 V para el cálculo del área del electrodo de fieltro de grafito y de -0.7 V a 0.8 V para el cálculo del área del electrodo de fieltro de grafito con la película de Ni.
4. Posteriormente se analizaron los datos de las gráficas resultantes y se realizaron los cálculos correspondientes de acuerdo con la ecuación de Randles Sevcik.

## Anexo H. Diseño y construcción de la celda de electrólisis microbianas

Para llevar a cabo la investigación, se utilizaron frascos de vidrio con una capacidad de 0.05 L, en la cual se utilizaron electrodos de fieltro de grafito de 2 X 2 cm, como electrodos de trabajo, los cuales se sujetaron a un alambre de titanio, también se utilizaron electrodos de referencia de Ag/AgCl saturado, como electrodo de referencia y, por último, se utilizaron electrodos de acero inoxidable como contraelectrodo de 2 X 2 cm. La separación de los electrodos fue de 5 mm, se adicionaron 0.010 L de lixiviado de composta y 0.05 L de agua residual, en el frasco se utilizaron tapaderas que fueron diseñadas e impresas ver figura 55.

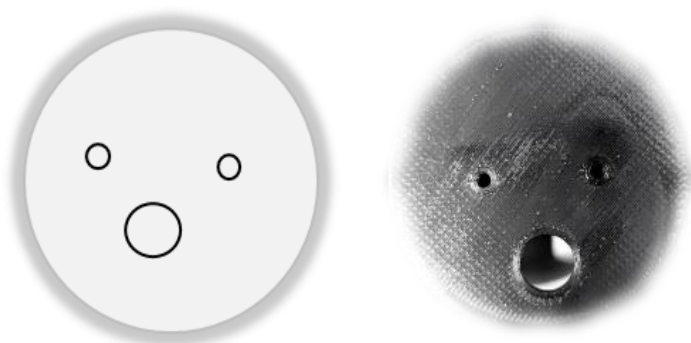


Figura 55. . Tapaderas con diseño de distribución de electrodos

## Anexo I. Medición de parámetros fisicoquímicos

### Medición de DQO

1. Se toma el equipo para preparación de los viales de acuerdo con la temperatura y se programa a 150 °C y 2 h.
2. Se agregan dos mililitros de agua desionizada a un vial de DQO, se cierra y agita dos veces, después se toma otro vial y se añade 2 mililitros de la muestra que se desea medir y se agita dos veces.
3. Una vez que llega a la temperatura se escuchará un sonido del equipo y se colocará la muestra de ambos viales a calentar.

4. Una vez pasadas 2 h de digestión, se procede a sacar los viales cuando se haya llegado a una temperatura de 100 °C.
5. Después se dejarán enfriando a temperatura ambiente y una vez fríos se procede a la medición.
6. Con el equipo de medición se programa para medición de DQO, se coloca el vial de agua desionizada que será el blanco y se procede a calibrar a cero, posteriormente se colocará el vial con la muestra de interés y se medirá.
7. Una vez terminadas las mediciones, se procede a recoger los materiales y residuos generados.

### Medición de pH

Se medirá el pH, mediante tiras de pH o mediante el uso de un potenciómetro. Con el potenciómetro se debe calibrar mediante las soluciones buffer acidas y básicas para obtener la calibración y medir las muestras, y con las tiras solo se meten en la muestra y se determina cualitativamente el pH medido, dependiendo del color que tomen los cuadros de las tiras.

#### *Medición con Potenciómetro*

1. Encender el equipo
2. Presionar cal de calibración
3. Limpiar el electrodo con agua desionizada y sumergirlo en el primer buffer, dependerá del equipo cual *buffer* pida primero para medir.
4. Una vez que ha medido el *buffer*, limpiar el electrodo con agua desionizada y medir el siguiente *buffer*
5. Nuevamente se espera a que la medición de ese *buffer* termine y, por último, se pedirá otra solución *buffer*, se medirá y el equipo marcará que se ha calibrado y está listo para la prueba

6. Sumergir el electrodo en la muestra de interés y tomar nota de los datos. Después de cada medición se debe limpiar con agua desionizada el electrodo.
7. Una vez que se termine de medir, se deberá guardar el electrodo en la solución para mantenerlo humectado y protegido.

### Medición de COT

1. Se debe filtrar la muestra de agua residual para que no dañe el equipo por las partículas y sólidos grandes que pueda contener.
2. Después de esto, las muestras se deben diluir de ser necesario, para después colocar 25 a 30 mL de muestra en los tubos especiales para medición de COT.
3. Colocar el tubo en los espacios para cada uno de los tubos.
4. Posteriormente, se tienen que poner las instrucciones correspondientes en el equipo para poder establecer las condiciones iniciales que son 200 kpa de presión, se inyecta en una cámara de combustión que es mantenida a 600–700 °C, llegando a veces incluso hasta 1200 °C.
5. Por último, se toman los resultados obtenidos, para analizarlos y determinar la eficiencia de remoción de cada experimento.