



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Centro Mexicano para la Producción más Limpia

SÍNTESIS Y EVALUACIÓN ANÓDICA DE UN ELECTROCATALIZADOR DE RuO_2
ORIENTADO A MEJORAR EL DESEMPEÑO DE UN ELECTROLIZADOR DE
MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES

TESIS DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE:
“MAESTRO EN INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA”

PRESENTA

LUIS FERNANDO CARVAJAL GUALDRÓN

DIRECTORES

DR. JORGE GABRIEL VÁZQUEZ ARENAS
DRA. ROSA DE GUADALUPE GONZÁLEZ HUERTA

Ciudad de México
Enero, 2026





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-13 BIS
REP 2017

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, a 8 de diciembre del 2025

El Colegio de Profesores de Posgrado del Centro Mexicano para la Producción más Limpia en su Sesión
(Unidad Académica)

ordinaria No. 11 celebrada el día 18 del mes de noviembre del 2025, conoció la solicitud presentada por el (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Carvajal	Apellido Materno:	Gualdrón	Nombre (s):	Luis Fernando
-------------------	----------	-------------------	----------	-------------	---------------

Número de registro: A 2 4 0 6 7 6

del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia

Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

"Síntesis y evaluación anódica de un electrocatalizador de RuO₂ orientado a mejorar el desempeño de un electrolizador de membrana de intercambio de protones".

Objetivo general del trabajo de tesis:

Sintetizar un electrocatalizador anódico de RuO₂ sobre la capa de transporte porosa de titanio (PTL) de un electrolizador tipo PEM, como sustrato, mediante el método de precursor polimérico, y evaluar su desempeño en un ensamble membrana-electrodos mixto.

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director: Dr. Jorge Gabriel Vázquez Arenas 2° Directora: Dra. Rosa de Guadalupe González
No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

Centro Mexicano para la Producción más Limpia

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Director de Tesis

Jorge Vázquez A.

Dr. Jorge Gabriel Vázquez Arenas

2° Directora de Tesis (en curso)

Rosa de Guadalupe González

Dra. Rosa de Guadalupe González Huerta

Aspirante

Luis Fernando Carvajal

Luis Fernando Carvajal Gualdrón

Presidente del Colegio

Raúl Hernández Altamirano

Dr. Raúl Hernández Altamirano



Página 1 de 1
CENTRO MEXICANO PARA LA PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14
REP 2017

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores del Posgrado del: para examinar la tesis titulada:

"Síntesis y evaluación anódica de un electrocatalizador de RuO₂ orientado a mejorar el desempeño de un electrolizador de membrana de intercambio de protones".

Apellido Paterno:	Carvajal	Apellido Materno:	Gualdrón	Nombre (s):	Luis Fernando
-------------------	----------	-------------------	----------	-------------	---------------

Número de registro:

Alumna del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 4 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI NO SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.

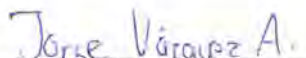
JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: Las similitudes identificadas corresponden a frases de uso común y terminología aplicable al tema de tesis utilizadas en el área de investigación del proyecto de investigación, que el software no es capaz de filtrar adecuadamente. El trabajo se realizó en tiempo y forma.


****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron APROBAR SUSPENDER NO APROBAR la tesis por UNANIMIDAD o MAYORÍA en virtud de los motivos siguientes:

La tesis cumple con los requerimientos normativos vigentes institucionales.

COMISIÓN REVISORA DE TESIS



Director de Tesis
Dr. Jorge Gabriel Vázquez Arenas


2^o Directora de Tesis
Dra. Rosa de Guadalupe González Huerta


Dra. Selené Montserrat García Solares


Dr. José Luis Reyes Rodríguez


Dra. Ma. Del Carmen Monterrubio Badillo


Dr. Raúl Hernández Altamirano
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día 14 del mes de enero del año 2026, el que suscribe Luis Fernando Carvajal Gualdrón alumno del programa Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia con número de registro A240676, adscrito al Centro Mexicano para la Producción más Limpia manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del Dr. Jorge Gabriel Vázquez Arenas y la Dra. Rosa de Guadalupe González Huerta y cede los derechos del trabajo intitulado "Síntesis y evaluación anódica de un electrocatalizador de RuO₂ orientado a mejorar el desempeño de un electrolizador de membrana de intercambio de protones", al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado del autor y/o directores. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguiente(s) dirección(es) de correo. luisf.carvajalq@gmail.com, jqvazquez@ipn.mx, rgonzalezh@ipn.mx. Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

Luis Fernando Carvajal Gualdrón

Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional (IPN), por abrirme sus puertas para estudiar un posgrado en el área de Ciencias de la Ingeniería, y por permitirme vivir en el grandioso país de México.

Al Centro Mexicano para la Producción más Limpia (CMP+L), por confiar en mi potencial, brindarme la oportunidad de estudiar la Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia y apoyarme en cada uno de mis propósitos académicos.

Al Dr. Jorge Gabriel Vázquez Arenas y a la Dra. Rosa de Guadalupe González Huerta, por motivarme en el campo de la electroquímica, por sus valiosos aportes en el desarrollo de este proyecto de investigación y sobre todo, por su empatía y amabilidad.

A la Dirección de Relaciones Internacionales (DRI), por apoyarme a cumplir mi sueño de realizar una pasantía internacional en el German Aerospace Center (DLR).

A la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) y a la Dirección de Posgrado (DP), por brindarme la beca de estudios.

Al Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI), por permitirme acceder a la Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI).

A los maestros y administrativos del CMP+L, por los conocimientos impartidos y por su buen trato.

Dedicatoria

A Dios, quien me reconfortó en los momentos de soledad y tristeza.

Mi camino y mis logros se los debo a él.

Este logro se lo dedico especialmente a mi familia:

*A mis padres, Luis Carlos y Gloria Esperanza,
quienes han sido mi motivación en cada uno de mis pasos.*

*A mis hermanos, Gloria Esperanza, Juan Carlos y Milton Cesar,
quienes siempre me apoyaron en este proyecto de vida.*

*A mis sobrinas, Natalia Alejandra y Sofía,
quienes me alegraron mis días, incluso a la distancia.*

*A mis amigos del CMP+L,
quienes con amabilidad y empatía, me demostraron su apoyo incondicional
y me levantaron en los momentos en los que me sentía más vulnerable.*

*A la vida,
gracias.*

Tabla de contenido

Abreviaturas y siglas	x
Lista de figuras	xii
Lista de tablas	xv
Resumen	xvii
Abstract	xviii
Introducción.....	1
Justificación.....	5
Hipótesis.....	6
Objetivos	7
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos.....	7
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....	8
1.1 Recursos fósiles como fuente de energía	9
1.2 Hidrógeno como vector energético	11
1.2.1 Producción de hidrógeno	12
1.2.2 Producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua	15
1.3 Tipo de electrólisis	19
1.3.1 Electrólisis alcalina (AWE).....	19
1.3.2 Electrólisis de membrana de intercambio aniónico (AEM).....	20
1.3.3 Electrólisis de óxido sólido (SOEC)	21

1.3.4	Electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM)	22
1.3.5	Comparación entre las técnicas de electrólisis del agua	24
1.4	Electrolizadores PEM.....	27
1.4.1	Componentes de un electrolizador PEM	28
1.4.2	Ensamble membrana – electrodos (MEA).....	30
1.4.3	Desafíos de los electrolizadores PEM	31
1.4.4	Curva de polarización en electrolizadores PEM	34
1.5	Reacción de evolución de oxígeno (OER)	35
1.6	Óxido de rutenio (RuO ₂) como catalizador anódico	38
1.7	Métodos de síntesis de catalizadores anódicos	41
1.7.1	Método del precursor polimérico (PPM o Pechini).....	43
1.8	Sistemas de energía alimentados con hidrógeno	49
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO ELECTROQUÍMICO		52
2.1	Ecuación de Nernst.....	53
2.2	Ecuación de Butler-Volmer	54
2.3	Pendiente de Tafel.....	55
2.4	Leyes de Faraday	57
2.4.1	Primera ley de Faraday	57
2.4.2	Segunda ley de Faraday.....	58
2.5	Ecuación de Randles - Sevcik	59
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....		60
3.1	Descripción de la metodología.....	61
3.2	Fase preliminar	68

3.2.1	Fabricación de los electrodos de prueba $Ti_{(PTL)}/RuO_2$	68
3.2.2	Caracterización electroquímica a los electrodos de $Ti_{(Lámina)}/RuO_2$	70
3.3	Fase final	72
3.3.1	Etapa A: Fabricación de los electrodos finales $Ti_{(PTL)}/RuO_2$	72
3.3.2	Etapa B: Caracterización electroquímica y caracterización morfológica, textural y de composición de los electrodos fabricados	73
3.3.3	Etapa C: Pruebas de desempeño en el electrolizador PEM	75
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		80
4.1	Fase preliminar	81
4.1.1	Fabricación de electrodos de prueba $Ti_{(PTL)}/RuO_2$	81
4.1.2	Caracterización electroquímica de electrodos de prueba $Ti_{(PTL)}/RuO_2$ 83	
4.1.3	Caracterización electroquímica a electrodos $Ti_{(Lámina)}/RuO_2$	86
4.2	Fase final	91
4.2.1	Etapa A: Fabricación de los electrodos finales $Ti_{(PTL)}/RuO_2$	91
4.2.2	Etapa B: Caracterización electroquímica, morfológica, textural y de composición de los electrodos finales.....	93
4.2.3	Etapa C: Pruebas de desempeño en el electrolizador PEM	120
Conclusiones.....		127
Anexos		129
Referencias bibliográficas		142

Abreviaturas y siglas

PEM	Proton Exchange Membrane (Membrana de intercambio de protones)
AEM	Anion Exchange Membrane (Membrana de intercambio aniónico)
AWE	Alkaline Water Electrolysis (Electrólisis alcalina)
SOEC	Solid Oxide Electrolysis Cell (Electrólisis de óxido sólido)
MEA	Membrane-Electrode Assembly (Ensamble membrana-electrodos)
PTL	Porous Transport Layer (Capa de transporte porosa)
OER	Oxygen Evolution Reaction (Reacción de evolución de oxígeno)
HER	Hydrogen Evolution Reaction (Reacción de evolución de hidrógeno)
AEM	Adsorbate Evolution Mechanism (Mecanismo de evolución del adsorbato)
RHE	Reversible Hydrogen Electrode (Electrodo reversible de hidrógeno)
SHE	Standard Hydrogen Electrode (Electrodo estándar de hidrógeno)
ECSA	Electrochemically Active Surface Area (Área superficial electrocatalítica activa)
DSA	Dimensionally Stable Anode (Ánodo dimensionalmente estable)
PGM	Platinum Group Metals (Metales del grupo del platino)
PPM	Polymeric Precursor Method (Método del precursor polimérico)
SEM	Scanning Electron Microscopy (Microscopía Electrónica de Barrido)
EDS	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X)
DRX	Difracción de Rayos X (XRD, X-Ray Diffraction)

LSV	Linear Sweep Voltammetry (Voltamperometría de Barrido Lineal)
CV	Cyclic Voltammetry (Voltamperometría Cíclica)
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy (Espectroscopía de Impedancia Electroquímica)

Lista de figuras

Figura 1. Proporción del consumo de energía primaria en el mundo, 2023.	9
Figura 2. Proporción del consumo de energía primaria en México, 2023.	10
Figura 3. Métodos de producción de hidrógeno usando combustibles fósiles y fuentes renovables.	13
Figura 4. Código de colores del hidrógeno basado en su método de producción.	14
Figura 5. Curva de polarización típica de la electrólisis del agua.	17
Figura 6. Esquema de un electrolizador AWE.	19
Figura 7. Esquema de un electrolizador AEM.	21
Figura 8. Esquema de un electrolizador SOEC.	22
Figura 9. Esquema de un electrolizador PEM.	23
Figura 10. Componentes de un electrolizador PEM.	28
Figura 11. Ensamble membrana-electrodos (MEA) convencional de un electrolizador PEM.	31
Figura 12. Curva de polarización de un electrolizador PEM.	35
Figura 13. Relación en forma de volcán entre la actividad para la OER y la entalpía (de adsorción o reacción) en superficies de óxidos metálicos.	40
Figura 14. Procedimiento del método de síntesis PPM.	45
Figura 15. Diagrama general de la metodología experimental.	61
Figura 16. Preparación de la solución precursora.	63
Figura 17. Registro fotográfico de la apariencia de la solución precursora.	64
Figura 18. Sustrato tipo fieltro de titanio (PTL).	64
Figura 19. Procedimiento del método de síntesis PPM.	65
Figura 20. Representación del electrodo anódico $Ti_{(PTL)}/RuO_2$	66
Figura 21. Técnicas de caracterización electroquímica.	67
Figura 22. Equipo potenciostato-galvanostato CMP+L.	68
Figura 23. Preparación de los electrodos para las pruebas electroquímicas en la celda de tres electrodos.	69
Figura 24. Electrodos de RuO_2 depositados sobre láminas de titanio $Ti_{(Lámina)}/RuO_2$	70

Figura 25. Técnicas de caracterización química.	74
Figura 26. Electrolizador tipo PEM con un área geométrica de 5 cm ² diseñado por ESIME-ESIQIE.	75
Figura 27. Componentes del electrolizador de prueba tipo PEM (área geométrica de 5 cm ²	76
Figura 28. MEA convencional empleado en el electrolizador de prueba tipo PEM.	78
Figura 29. MEA mixto empleado en el electrolizador de prueba tipo PEM.	79
Figura 30. Banco de pruebas del electrolizador de prueba tipo PEM.	79
Figura 31. Proceso de fabricación de los electrodos de prueba Ti _(PTL) /RuO ₂ . Las figuras corresponden a: E1 (a) y E2 (b).	81
Figura 32. Curvas LSV de los electrodos de prueba: E1 (a) y E2 (b).	84
Figura 33. Curvas CV de los electrodos de prueba: E1 (a) y E2 (b).	86
Figura 34. Curvas LSV de electrodos Ti _(Lámina) /RuO ₂	87
Figura 35. Gráficas de contorno obtenidas a partir de la optimización de la variable de respuesta (densidad de corriente) de los electrodos Ti _(Lámina) /RuO ₂	90
Figura 36. Proceso de fabricación de los electrodos finales Ti _(PTL) /RuO ₂ (E3, E4 y E5) utilizando diferentes porosidades de la PTL (50-60 %, 60-70 % y 70-73 %). .	92
Figura 37. Micrografías SEM de las PTL de titanio, obtenidas con detector de electrones secundarios a magnificaciones de 500 X y 10,000 X. Figuras a y b corresponden a porosidad baja: 50-60 %, figuras b y c corresponden a porosidad media: 60-70 %, y figuras e y f corresponden porosidad baja: 70-73 %.	94
Figura 38. Micrografías SEM de los electrodos Ti _(PTL) /RuO ₂ (E1–E5) obtenidas con detector de electrones secundarios a una magnificación de 10,000 X. Las figuras corresponden a: E1 (a), E2 (b), E3 (c), E4 (d) y E5 (e).	95
Figura 39. Mapeo elemental por EDS del electrodo E1.	98
Figura 40. Mapeo elemental por EDS del electrodo E2.	99
Figura 41. Mapeo elemental por EDS del electrodo E3.	99
Figura 42. Mapeo elemental por EDS del electrodo E4.	100
Figura 43. Mapeo elemental por EDS del electrodo E5.	100

Figura 44. Difractogramas DRX y sus planos característicos de las fases RuO ₂ (●), Ti metálico (▼) y TiO ₂ (●) de los electrodos E1 (a) y E2 (b).....	101
Figura 45. Difractogramas DRX y sus planos característicos de las fases RuO ₂ (●), Ti metálico (▼) y TiO ₂ (●) de los electrodos E3 (a), E4 (b) y E5 (c).	102
Figura 46. Curvas LSV de los electrodos E1-E5 sobre sustrato PTL de Ti y E9 sobre sustrato tipo lámina de Ti.	104
Figura 47. Pendiente de Tafel de los de los electrodos E1-E5 Ti _(PTL) /RuO ₂ y del electrodo E9 Ti _(Lámina) /RuO ₂	107
Figura 48. Comparación de la pendiente de Tafel de los electrodos E1-E5 Ti _(PTL) /RuO ₂ y del electrodo E9 Ti _(Lámina) /RuO ₂	108
Figura 49. Curva CV de los electrodos E1-E5 Ti _(PTL) /RuO ₂ . Las figuras corresponden a: E1 (a), E2 (b), E3 (c) E4 (d) y E5 (e).	111
Figura 50. Modelo de ajuste de resultados EIS en un circuito equivalente de dos constantes de tiempo para los electrodos E1-E5 Ti _(PTL) /RuO ₂	113
Figura 51. Ajuste de resultados EIS en un circuito eléctrico equivalente de dos constantes de tiempo a 1.2 V/Ag/AgCl y 1.3 V/Ag/AgCl. Las imágenes corresponden a: E1 (a), E2 (b), E3 (c), E4 (d) y E5 (e).	115
Figura 52. Proceso de fabricación de las membranas M1 y M2: lado anódico (RuO ₂) y lado catódico (C/Pt).	121
Figura 53. Curvas de polarización de la membrana M1 en un MEA convencional utilizando el electrolizador de prueba tipo PEM.....	122
Figura 54. Comparación de las curvas de polarización utilizando la membrana M1 en un MEA convencional y en un MEA mixto con los electrodos E1, E2 y E3. ...	124
Figura 55. Comparación de las curvas de polarización utilizando la membrana M2 en un MEA convencional y en un MEA mixto con los electrodos E4 y E5.	125

Lista de tablas

Tabla 1. Contenido energético en MJ kg^{-1} de algunos combustibles.	12
Tabla 2. Comparación entre las tecnologías para la electrólisis del agua.	25
Tabla 3. Comparación entre las tecnologías para la electrólisis del agua.	26
Tabla 4. Principales fabricantes de electrolizadores PEM.	28
Tabla 5. Precios de diferentes compuestos a base de rutenio (Sigma-Aldrich). ...	39
Tabla 6. Precios de diferentes compuestos a base de iridio (Sigma-Aldrich).	39
Tabla 7. Reactivos utilizados para la preparación de la solución precursora.	63
Tabla 8. Condiciones de síntesis de los electrodos de prueba (E1 y E2).	69
Tabla 9. Condiciones de síntesis de los electrodos $\text{Ti}_{(\text{Lámina})}/\text{RuO}_2$	71
Tabla 10. Condiciones de síntesis de electrodos finales $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$	72
Tabla 11. Componentes y materiales del electrolizador de prueba tipo PEM.	76
Tabla 12. Parámetros LSV de los electrodos de prueba E1 y E2.	83
Tabla 13. Variables de entrada y salida utilizados en el diseño experimental Box-Behnken, utilizando la actividad catalítica de los electrodos $\text{Ti}_{(\text{Lámina})}/\text{RuO}_2$	88
Tabla 14. Análisis de varianza del modelo ajustado mediante el diseño Box-Behnken de los electrodos $\text{Ti}_{(\text{Lámina})}/\text{RuO}_2$	89
Tabla 15. Condiciones óptimas de síntesis obtenidas a partir de la optimización de la variable de respuesta (densidad de corriente) de los electrodos $\text{Ti}_{(\text{Lámina})}/\text{RuO}_2$	90
Tabla 16. Composición elemental cuantificada por EDS de las PTL.	96
Tabla 17. Composición elemental cuantificada por EDS de los electrodos E1-E5.	97
Tabla 18. Potencial y sobrepotencial de los electrodos E1-E5 $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$ y del electrodo E9 $\text{Ti}_{(\text{Lámina})}/\text{RuO}_2$ a una densidad de corriente de 10 mA cm^{-2}	105
Tabla 19. Parámetros de la pendiente de Tafel de los electrodos E1-E5 $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$ y del electrodo E9 $\text{Ti}_{(\text{Lámina})}/\text{RuO}_2$	106
Tabla 20. Comparación de las pendientes de Tafel de los electrodos E1-E5 $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$ con respecto a otros trabajos de investigación.	109
Tabla 21. Resultados del ajuste del EIS a un circuito equivalente con dos constantes de tiempo para la OER y su respectivo error relativo para los electrodos E1-E5 $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$	116

Tabla 22. ECSA de los E1-E5 $Ti_{(PTL)}/RuO_2$ medidas en una solución de ferricianuro de potasio ($K_3[Fe(CN)_6]$) al 0.005 M y cloruro de potasio (KCl) al 0.1 M. 119

Resumen

En los últimos años, la producción de hidrógeno ha adquirido gran interés como vector energético, ya que puede ser transportado, almacenado y finalmente utilizado para generar energía eléctrica. La electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM) es una de las tecnologías más prometedoras para este propósito. Utiliza una membrana polimérica, comúnmente Nafion™, sobre cuya superficie se depositan los catalizadores en cada una de sus caras conformando el ensamble membrana-electrodos (MEA) convencional. Esta membrana permite el paso selectivo de protones (H^+) desde el ánodo hasta el cátodo, facilitando las reacciones de óxido-reducción y la producción de hidrógeno de alta pureza ($> 99.9999\%$). No obstante, su implementación se ve limitada por los elevados costos de fabricación, debido principalmente al empleo de metales nobles como el iridio en su electrodo anódico. Además de que en la mayoría de los casos, los electrodos son depositados por técnicas *ex situ* que incrementan las resistencias en ambas interfaces del MEA.

Ante este panorama, este trabajo se enfoca en la fabricación de electrodos anódicos con electrocatalizadores de RuO_2 , utilizando la capa de transporte porosa (PTL) como sustrato, y su integración en un electrolizador de prueba tipo PEM con un área geométrica de 5 cm^2 a través de un MEA mixto, para mejorar su desempeño operacional en términos de una menor demanda de voltaje al aplicar una densidad de corriente específica. La síntesis de los electrocatalizadores de RuO_2 se realiza a través del método del precursor polimérico (PPM o Pechini), variando condiciones como el número de capas, el tiempo, la temperatura de calcinación y diferentes porosidades de la PTL. Este enfoque busca aprovechar la estructura de la PTL no solo como difusor de gases, material conductor y distribuidor de corriente, sino también, como soporte electrocatalítico.

El proyecto se desarrolla en dos fases principales, la fase preliminar, en donde se fabrican dos electrodos de prueba (E1 y E2), los cuales se evalúan electroquímicamente para verificar su actividad catalítica hacia la reacción de evolución de oxígeno (OER). Luego, en la etapa final, se fabrican los electrodos (E3, E4 y E5), bajo condiciones de síntesis definidas en un diseño experimental Box Behnken. Todos los electrodos sintetizados, fueron analizados mediante técnicas analíticas de caracterización de materiales como Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) y Difracción de Rayos X (DRX), y caracterización electroquímica mediante técnicas como Voltamperometría de Barrido Lineal (LSV), Voltamperometría Cíclica (CV) y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS). Finalmente, los electrodos fueron integrados en un electrolizador de prueba tipo PEM con un área geométrica de 5 cm^2 usando un MEA mixto, y evaluados mediante curvas de polarización, lo que permitió comparar su desempeño frente a un MEA convencional.

Los resultados demostraron que, aunque el electrodo E2 (porosidad de la PTL: 70-73 %) presentó el mejor desempeño electroquímico para la OER, con una pendiente de Tafel de 32.5 mV dec^{-1} y un sobrepotencial de 0.304 V a 10 mA cm^{-2} , este comportamiento no se mantuvo al integrarlo en el electrolizador de prueba tipo PEM. En contraste, el electrodo E3 (porosidad de la PTL: 50-60 %), pese a no destacar en su caracterización electroquímica, mostró un desempeño superior en operación en un MEA mixto, alcanzando una densidad de corriente de 1.08 A cm^{-2} frente a 0.82 A cm^{-2} del MEA convencional, ambos medidos a un potencial de celda de 2.3 V . Esto sugiere que el desempeño del electrolizador de prueba tipo PEM con un área geométrica de 5 cm^2 , no solo está asociado a parámetros como la pendiente de Tafel o el potencial de inicio de la OER, sino también, a otras variables como por ejemplo la porosidad de la PTL, donde una menor porosidad del sustrato utilizado en el electrodo E3 (50-60 %) habría permitido obtener una mayor área superficial electrocatalítica activa (ECSA) de 27.6 cm^2 con respecto a los demás sustratos utilizados.

Palabras clave: Producción de hidrógeno, electrólisis de membrana de intercambio de protones, PEM, método del precursor polimérico (Pechini), reacción de evolución de oxígeno, OER, capa de transporte.

Abstract

In recent years, hydrogen production has gained considerable interest as an energy carrier, as it can be transported, stored, and ultimately used to generate electrical energy. Proton exchange membrane (PEM) electrolysis is one of the most promising technologies for this purpose. It uses a polymer membrane, commonly Nafion™, on both sides of which catalysts are deposited, forming the conventional membrane-electrode assembly (MEA). This membrane allows the selective passage of protons (H⁺) from the anode to the cathode, facilitating oxidation-reduction reactions and the production of high-purity hydrogen (> 99.9999 %). However, its implementation is limited by high manufacturing costs, mainly due to the use of noble metals such as iridium in its anode electrode. In addition, in most cases, the electrodes are deposited by *ex situ* techniques that increase the resistances at both interfaces of the MEA.

Given this situation, this work focuses on the manufacture of anode electrodes with RuO₂ electrocatalysts, using the porous transport layer (PTL) as a substrate, and their integration into a PEM-type test electrolyzer with a geometric area of 5 cm² through a mixed MEA, to improve their operational performance in terms of lower voltage demand when applying a specific current density. The synthesis of RuO₂ electrocatalysts is carried out using the polymer precursor method (PPM or Pechini), varying conditions such as the number of layers, time, calcination temperature, and different porosities of the PTL. This approach seeks to take advantage of the PTL structure not only as a gas diffuser, conductive material, and current distributor, but also as an electrocatalytic support.

The project is being developed in two main phases. In the preliminary phase, two test electrodes (E1 and E2) are manufactured and evaluated electrochemically to verify their catalytic activity toward the oxygen evolution reaction (OER). Then, in the final stage, the electrodes (E3, E4, and E5) are manufactured under synthesis conditions defined in a Box-Behnken experimental design. All synthesized electrodes were analyzed using analytical techniques for material characterization such as Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), and X-ray Diffraction (XRD), as well as electrochemical characterization using techniques such as linear sweep voltammetry (LSV), cyclic voltammetry (CV), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Finally, the electrodes were integrated into a PEM-type test electrolyzer with a geometric area of 5 cm² using a mixed MEA and evaluated using polarization curves, which allowed their performance to be compared to that of a conventional MEA.

The results showed that, although the E2 electrode (PTL porosity: 70-73 %) exhibited the best electrochemical performance for OER, with a Tafel slope of 32.5 mV dec⁻¹ and an overpotential of 0.304 V at 10 mA cm⁻², this behavior was not maintained when integrated into the PEM-type test electrolyzer. In contrast, electrode E3 (PTL porosity: 50-60 %), despite not standing out in its electrochemical characterization, showed superior performance in operation in a mixed MEA, reaching a current density of 1.08 A cm⁻² compared to 0.82 A cm⁻² for the conventional MEA, both measured at a cell potential of 2.3 V. This suggests that the performance of the PEM test electrolyzer with a geometric area of 5 cm² is not only associated with parameters such as the Tafel slope or the OER onset potential, but also with other variables such as the porosity of the PTL, where a lower porosity of the substrate used in electrode E3 (50-60 %) would have allowed a larger ECSA of 27.6 cm² to be obtained compared to the other substrates used.

Key words: Hydrogen production, proton exchange membrane electrolysis, PEM, polymeric precursor method (Pechini), oxygen evolution reaction, OER, porous transport layer.

Introducción

Diversificar y descarbonizar la matriz energética global, es una necesidad actual que promueve la búsqueda de nuevas alternativas de energía. En las últimas décadas, las investigaciones se han enfocado en el desarrollo de energías alternas, tales como la energía eólica, la energía solar, la energía geotérmica y la biomasa. No obstante, la producción de hidrógeno, como vector energético, que transporta, almacena y entrega energía útil, se posiciona como una de las alternativas con mayor potencial de sustitución y complemento a los combustibles fósiles (Rodríguez-Gómez *et al.*, 2024).

El hidrógeno puede obtenerse a partir de diversas materias primas, tales como los hidrocarburos, el carbón, el agua, el gas natural, la biomasa, entre otras. Sin embargo, los hidrocarburos y el carbón, continúan siendo las materias primas más empleadas en la actualidad (Yue *et al.*, 2021). Asimismo, se han desarrollado diferentes tecnologías para su producción, por ejemplo, a través del reformado del metano (CH₄) o de la gasificación del carbón. Aunque estos procesos son eficientes energéticamente, tienen como principal desventaja la generación de gases contaminantes atmosféricos, como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂) (Incer-Valverde *et al.*, 2023; Rolo *et al.*, 2024).

Actualmente, la electrólisis del agua es una de las tecnologías más prometedoras para la producción de hidrógeno, no solo por su mínimo impacto ambiental (Aragón-González *et al.*, 2015; Rolo *et al.*, 2024; Tan *et al.*, 2024) sino también por tener un alto potencial como vector energético en los próximos 30 años (J. Hou & Yang, 2025). Es una tecnología que permite dividir la molécula del agua, en hidrógeno (H₂) mediante la reacción de evolución de hidrógeno (HER, Hydrogen Evolution Reaction), y en oxígeno (O₂) mediante la reacción de evolución de oxígeno (OER, Oxygen Evolution Reaction), sin generar residuos contaminantes. También, permite obtener hidrógeno de alta calidad, ideal como suministro a sistemas de energía impulsados por hidrógeno, donde la pureza es fundamental para aumentar la vida útil de las celdas de combustible (Murugaiah & Shahgaldi, 2024).

En la última década, con el acuerdo de París del año 2015, donde se estableció como objetivo alcanzar emisiones netas cero de gases efecto invernadero para la segunda mitad del siglo XXI, la economía del hidrógeno ha ganado impulso como un complemento a los vectores energéticos tradicionales (J. Hou & Yang, 2025). En particular, el hidrógeno de alta pureza (99.9999 %) ha sido utilizado en aplicaciones directas en movilidad y en sistemas de calefacción en los últimos años (Parra *et al.*, 2019). En ese mismo sentido, se han desarrollado sistemas energéticos alimentados por hidrógeno, como las celdas de combustible (Yue *et al.*, 2021) que transforman la energía química del hidrógeno en energía eléctrica (Murugaiah & Shahgaldi, 2024). Una de las aplicaciones con mayor impacto en los últimos años, ha sido la fabricación de los vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV, Fuel Cell Electric Vehicles), que han alcanzado eficiencias de entre 1.5 y 2.5 veces mayores que los vehículos impulsados por gasolina (Godula-Jopek, 2015).

En la actualidad, existen cuatro principales tecnologías para la electrólisis del agua: la electrólisis alcalina (AWE, Alkaline Water Electrolysis), la electrólisis de membrana de intercambio aniónico (AEM, Anion Exchange Membrane Electrolysis), la electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM, Proton Exchange Membrane Electrolysis) y la electrólisis de óxido sólido (SOEC, Solid Oxide Electrolysis Cell). No obstante, la electrólisis PEM, es la tecnología más prometedora, que se destaca por operar a bajas temperaturas (50 – 80 °C), producir hidrógeno de alta pureza, operar en sistemas compactos con rápido tiempo de respuesta (< 10 s) y alcanzar densidades de corriente de hasta 2.5 A cm⁻² (S. Li *et al.*, 2024; Y. Liu *et al.*, 2024; Murugaiah & Shahgaldi, 2024; Tamilarasi *et al.*, 2024; Tan *et al.*, 2024).

Los electrolizadores PEM se fabrican utilizando un ensamble membrana-electrodos (MEA, Membrane-Electrode Assembly) convencional, entre dos placas terminales que actúan como colectores de corriente y mantienen compacto el sistema. Los colectores de corriente se conectan a una fuente de poder que genera una diferencia de potencial en un circuito cerrado y promueve la electrólisis del agua. La membrana de intercambio de protones, comúnmente NafionTM, se caracteriza por

incorporar catalizadores en cada una de sus caras. En una cara, generalmente se depositan óxidos de iridio (IrO_2), que actúan como catalizadores anódicos y donde se desarrolla la OER. En la otra cara, se depositan comúnmente catalizadores de platino y carbono (Pt/C), donde se lleva a cabo la HER (Godula-Jopek, 2015). Este diseño permite que las reacciones de oxidación y reducción se lleven a cabo en las caras de la membrana, facilitando el movimiento de protones a través de ella y reduciendo la resistencia óhmica del sistema.

Generalmente los catalizadores son fabricados a partir de metales nobles del grupo del platino (PGM, Platinum Group Metals), como el platino (Pt), el paladio (Pd), el rodio (Rh), el rutenio (Ru), el iridio (Ir) y el osmio (Os) (Shirvanian & van Berkel, 2020). Estos deben tener dos características importantes: la primera, ser estables químicamente a pH bajos (< 1.0) y la segunda, resistir altos potenciales de corrosión (> 1.5 V/RHE en el ánodo y < -0.1 V/RHE en el cátodo) (Martínez-Séptimo *et al.*, 2021). Sin embargo, la disponibilidad y el alto costo de estos metales nobles, son las principales desventajas de la electrólisis PEM (J. Hou & Yang, 2025; Liao *et al.*, 2024; Martínez-Séptimo *et al.*, 2021). Generalmente se utiliza el iridio para la producción de catalizadores anódicos, no obstante, es un material costoso y está presente en apenas un 0.001 ppm en la corteza terrestre (Tamilarasi *et al.*, 2024). En consecuencia, la Unión Europea en el año 2011, declaró que los metales PGM se encuentran en "estado crítico" debido a su importancia económica y a su alto riesgo de suministro (Otgonbayar *et al.*, 2024). Por otra parte, el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE, Department Of Energy), fijó como meta para el año 2025, producir hidrógeno mediante la electrólisis del agua a un costo máximo de 2.0 \$USD kg^{-1} (Y. Liu *et al.*, 2024). Con base en lo anterior, se evidencia la necesidad de desarrollar nuevos proyectos orientados a la mejora del desempeño de los electrolizadores PEM, no solo para obtener mejores eficiencias, sino también para descubrir nuevos materiales, nuevas rutas de síntesis de catalizadores, nuevos MEAs, entre otros.

En consecuencia, en el presente proyecto se mejora el desempeño de un electrolizador de prueba tipo PEM con un área geométrica de 5 cm^2 , diseñado por

la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) y la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), en términos de requerir una menor demanda de voltaje al aplicar una densidad de corriente específica. Lo anterior se logra al transformar la capa de transporte porosa (PTL, Porous Transport Layer) de un MEA convencional, en un electrodo anódico con electrocatalizadores de RuO₂, conformando un MEA mixto.

Los RuO₂ se sintetizan mediante el método del precursor polimérico (PPM, Polymeric Precursor Method), el cual se basa en la oxidación térmica de una solución polimérica precursora del rutenio, preparada con cloruro de rutenio (RuCl₃) como sal metálica, ácido cítrico como agente quelante y un alcohol (monoetilenglicol/dietilenglicol) como solvente. Este método permite sintetizar ánodos dimensionalmente estables (DSA, Dimensionally Stable Anode), los cuales se caracterizan por presentar una alta área superficial electrocatalítica activa (ECSA, Electrochemically Active Surface Area), una distribución homogénea y una elevada estabilidad en medio ácido, posicionándolos como una ruta alternativa para la fabricación de electrodos anódicos con aplicación en electrolizadores PEM.

En total, se fabrican cinco electrodos anódicos (E1-E5) utilizando la PTL con diferentes porosidades (alta: 70-73 %, media: 60-70 % y baja: 50-60 %), así como variaciones en el número de capas de RuO₂ en las temperaturas y tiempos de calcinación. Estos electrodos se caracterizan mediante técnicas analíticas para conocer su morfología, su textura y composición, y mediante técnicas electroquímicas para conocer su cinética (velocidad de transferencia de electrones), así como su estabilidad y eficiencia hacia la OER. Finalmente, el electrodo se integra en el electrolizador de prueba tipo PEM con un área geométrica de 5 cm², utilizando un ensamble membrana-electrodos (MEA) mixto y se evalúa su desempeño operacional mediante curvas de polarización.

Justificación

La electrólisis PEM es una de las tecnologías más prometedoras para la producción de hidrógeno verde en la actualidad; sin embargo, su implementación aún enfrenta desafíos significativos. Entre ellos se destacan los elevados costos asociados al uso de metales nobles del grupo del platino, la corrosión acelerada del ánodo bajo condiciones altamente ácidas y la cinética intrínsecamente lenta de la OER, factores que limitan la eficiencia operativa y la viabilidad económica de la tecnología.

En este proyecto se fabricarán cinco electrodos anódicos con electrocatalizadores de RuO₂ directamente sobre la PTL mediante el método del precursor polimérico (PPM), variando parámetros de síntesis como el número de capas aplicadas, el tiempo y la temperatura de calcinación, así como la porosidad de la PTL. El objetivo es explorar una ruta de síntesis que permita reducir los costos de fabricación de los electrodos y, al mismo tiempo, mejorar el desempeño operacional del electrolizador PEM.

Este método permite sintetizar electrocatalizadores de RuO₂ a bajo costo, ya que suele utilizar sales metálicas, como el cloruro de rutenio (RuCl₃), siendo significativamente más económica que los óxidos metálicos comercialmente disponibles. De igual forma, permite crear películas con partículas finas y dispersas sobre el sustrato, ya que usa una solución polimérica con iones Ru³⁺ lo que asegura su dispersión. También durante el proceso de calcinación, se forman óxidos sobre la superficie del sustrato, mejorando la conductividad y la transferencia de carga en el electrodo fabricado.

Hipótesis

La deposición de óxido de rutenio (RuO_2) mediante el método del precursor polimérico (PPM) sobre la capa de transporte porosa (PTL) de un electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM), permite transformar la PTL en un electrodo anódico activo para la reacción de evolución de oxígeno (OER). Su integración en un electrolizador de prueba tipo PEM con un área geométrica de 5 cm^2 usando un Ensamble Membrana-Electrodos (MEA) mixto, le aporta un mejor desempeño que el MEA convencional al disminuir la demanda de potencial a una densidad de corriente determinada bajo condiciones operacionales específicas.

Objetivos

Objetivo general

Sintetizar un electrocatalizador anódico de RuO₂ sobre la capa de transporte porosa de titanio (PTL) de un electrolizador tipo PEM, como sustrato, mediante el método de precursor polimérico, y evaluar su desempeño en un ensamble membrana-electrodos mixto.

Objetivos específicos

- Sintetizar catalizadores de RuO₂ mediante el método de precursor polimérico, sobre la capa de transporte porosa de titanio (PTL) utilizando RuCl₃ como precursor del rutenio, variando el número de capas, la temperatura, el tiempo de calcinación y la porosidad del sustrato.
- Caracterizar electroquímicamente el catalizador anódico utilizando la Voltamperometría de Barrido Lineal (LSV), la Voltamperometría Cíclica (CV) y la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS).
- Analizar sus propiedades texturales, morfológicas y de composición mediante técnicas como la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), la Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) y la Difracción de Rayos X (DRX).
- Evaluar el desempeño del electrocatalizador sintetizado al integrarlo en un ensamble membrana-electrodos (MEA) mixto en un electrolizador de pruebas tipo PEM mediante curvas de polarización.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

1.1 Recursos fósiles como fuente de energía

Los combustibles fósiles primarios como el carbón, el petróleo y el gas natural, son la principal fuente de energía para la gran mayoría de los países. De acuerdo con las estadísticas del año 2023, en la matriz energética mundial, el 81.47 % del consumo de energía proviene principalmente de combustibles fósiles (Figura 1). El petróleo se sitúa como la principal fuente de energía con un valor porcentual del 31.70 %, en segundo lugar, se posiciona al carbón con un valor del 26.47 %, y en tercer lugar se sitúa al gas natural con un valor del 23.30 % (Energy Institute - Statistical Review of World Energy, 2023).

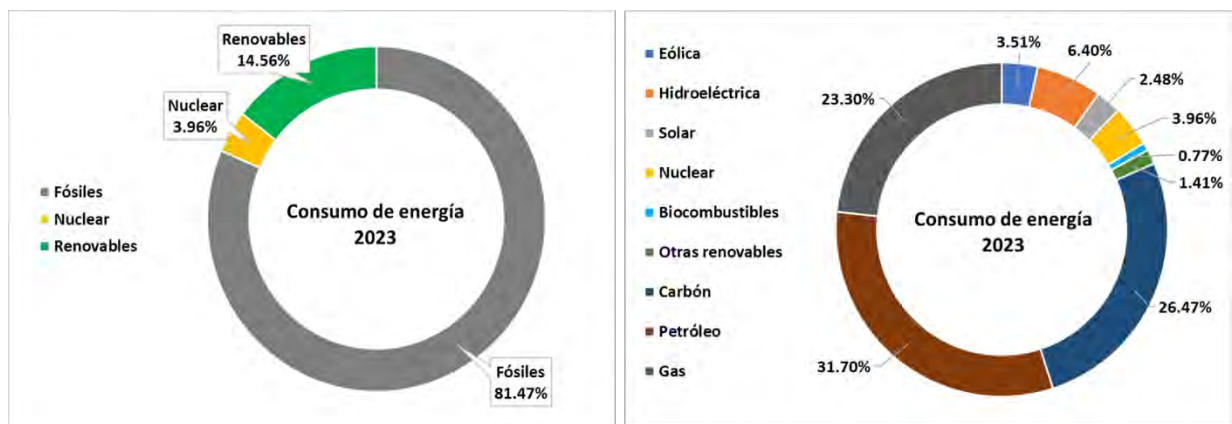


Figura 1. Proporción del consumo de energía primaria en el mundo, 2023.

Fuente: Elaboración propia.

Particularmente para México, las estadísticas en el año 2023 presentadas en la Figura 2, muestran una alta dependencia energética de los recursos fósiles alcanzando valores de hasta el 89.62 %. Al igual que la tendencia global, el petróleo es la principal fuente de energía en México con porcentaje del 42.61 %, seguido del gas natural con un valor del 41.34 % (International Energy Agency, 2023).

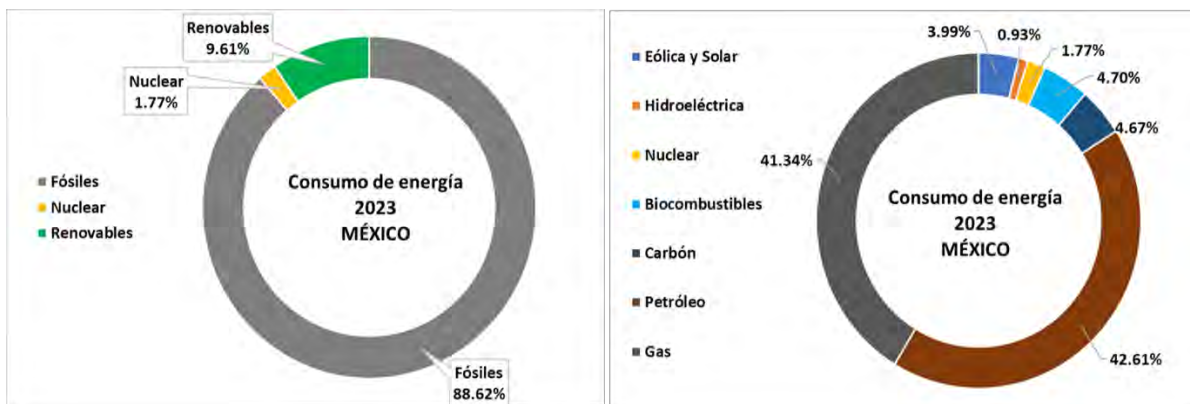


Figura 2. Proporción del consumo de energía primaria en México, 2023.

Fuente: Elaboración propia.

No obstante, varios estudios han demostrado que los recursos fósiles en procesos de combustión, son la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global, a la afectación de la calidad del aire y al deterioro de la salud (Afifa *et al.*, 2024). La International Energy Agency (IEA), reporta que, en el año 2022, China fue el país con mayor contribución de CO_2 a la atmósfera, con cifras que ascienden a un valor de 7.515 ton CO_2 -eq per cápita, de los cuales el 79 % proviene de la combustión del carbón (International Energy Agency, 2021). Por lo anterior, el cambio climático y el incremento de contaminantes en la atmósfera, son dos de los principales desafíos globales, y que están estrechamente relacionados con el uso de recursos fósiles como fuente de energía (Afifa *et al.*, 2024).

lyke (2024) resalta que la seguridad energética es uno de los desafíos inminentes en la actualidad dado que la energía es la fuente de las actividades económicas de cada nación. A lo largo de la historia, se ha demostrado que las matrices energéticas fuertemente dependientes de recursos fósiles, son también afectadas por factores externos socio-políticos que, en consecuencia, desencadenan impactos económicos y ambientales significativos para la sociedad. Uno de los ejemplos más claros ha sido la guerra entre Rusia y Ucrania que inició en el año 2021 y desestabilizó la economía de los países europeos, generando incrementos en el

precio del petróleo alrededor del mundo. En consecuencia, en el periodo comprendido entre octubre del 2021 y agosto del 2022, el precio del petróleo West Texas Intermediate (WTI) aumentó en un 52.33 % y el precio del petróleo Brent aumentó en un 56.33 % (Zhang *et al.*, 2024). Es por ello, que la diversificación energética no solo se presenta como una de las alternativas para contribuir a la descarbonización y a la disminución de la huella de carbono, sino también, para aumentar los niveles de seguridad y capacidad de distribución energética.

1.2 Hidrógeno como vector energético

El hidrógeno es un compuesto con fórmula química H_2 , incoloro, inodoro, no tóxico y de baja densidad. Se debe manejar con seguridad ya que puede generar asfixia en lugares cerrados, puede provocar incendios y explosiones, así como quemaduras en forma líquida. Es el elemento más abundante en el universo, que a condiciones estándar de presión y temperatura (101.325 kPa y $0^\circ C$), existe en forma gaseosa (Rolo *et al.*, 2024). Comúnmente es usado en diferentes sectores de la industria: en la industria química, para la producción de amoníaco y de metanol; en la industria metalúrgica, para la reducción directa del hierro, y en la industria de la energía, en celdas de combustible con aplicación en movilidad y obtención de electricidad (Godula-Jopek, 2015).

El hidrógeno cuenta con un alto potencial de sustitución a los combustibles fósiles, dado que tiene una energía específica por unidad de masa de 120 MJ kg^{-1} (Lower Heating Value, LHV) y de 142 MJ kg^{-1} (Higher Heating Value, HHV), siendo considerablemente mayor que la mayoría de los combustibles utilizados actualmente (Tabla 1). Por ejemplo, la gasolina reporta una energía específica de 42 MJ kg^{-1} a $25^\circ C$, siendo tres veces menor que la del hidrógeno (Godula-Jopek, 2015). Adicionalmente, una de sus ventajas es la diversidad de rutas de producción disponibles, donde muchas de ellas no generan emisiones de gases contaminantes a la atmósfera (S. Li *et al.*, 2024).

Tabla 1. Contenido energético en MJ kg⁻¹ de algunos combustibles.

Combustible	Contenido energético (MJ kg⁻¹)
Hidrógeno	120.0 *
	142.0 **
Metanol	19.7
Gasolina	42.0
Diesel	45.3
Keroseno	43.5

* Poder calorífico inferior (Lower Heating Value, LHV)
 ** Poder calorífico superior (Higher Heating Value, HHV)

Fuente: Adaptado de Godula-Jopek (2015).

1.2.1 Producción de hidrógeno

El hidrógeno puede producirse tanto a partir de recursos fósiles como de fuentes renovables (Figura 3). No obstante, no todos los métodos son aptos para una producción de hidrógeno a gran escala. En cuanto a los combustibles fósiles, el reformado de gas natural, es una de las tecnologías más ampliamente estudiadas e implementadas en el mundo, pero simultáneamente aporta gran cantidad de gases contaminantes como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera (Rolo *et al.*, 2024).

El uso de recursos renovables para la producción de hidrógeno, se ha incrementado en los últimos años. Por ejemplo, la pirólisis de la biomasa, es un proceso térmico viable que descompone materia orgánica en ausencia de oxígeno; sin embargo, aún presenta desafíos inherentes a la composición de la biomasa para lograr mayores rendimientos en la producción de hidrógeno (Z. Hou *et al.*, 2025). Otras tecnologías ampliamente estudiadas en los últimos años están basadas en los procesos biológicos. La fermentación oscura y los procesos fotofermentativos, producen

hidrógeno de manera limpia y sostenible, pero aún manejan eficiencias bajas en la conversión de biomasa a hidrógeno y requieren controles estrictos de las condiciones anaeróbicas y de luz (Rolo *et al.*, 2024).

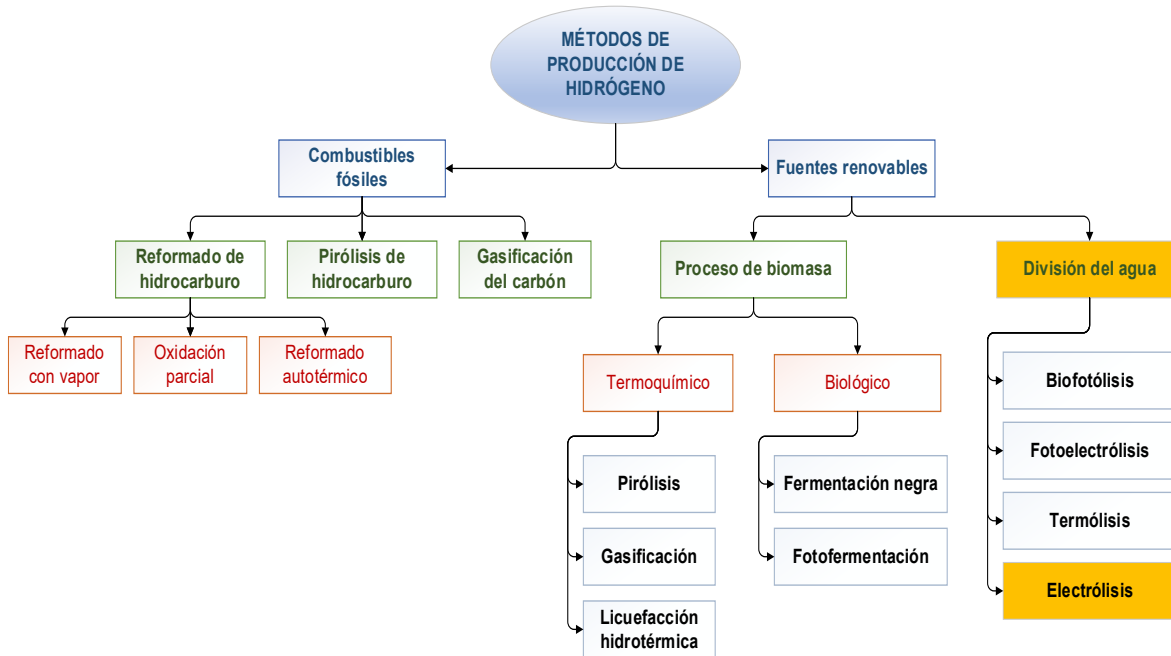


Figura 3. Métodos de producción de hidrógeno usando combustibles fósiles y fuentes renovables.

Fuente: Adaptada de Rolo *et al.* (2024).

En los últimos años, con la creciente necesidad de disminuir el impacto ambiental causado por los combustibles fósiles, se han desarrollado diferentes tecnologías para producir hidrógeno a partir de materias primas renovables. La electrólisis del agua (water splitting), que consiste en fraccionar su molécula en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂), surge como alternativa para producir hidrógeno de alta pureza (> 99,99 %) (Godula-Jopek, 2015; Tamilarasi *et al.*, 2024). Al ser un proceso electroquímico no espontáneo, requiere de suministro de energía para llevarse a cabo, por lo que existe una clasificación cualitativa en función de la fuente de

energía utilizada (Figura 4). Si la energía proviene de la red eléctrica, el hidrógeno obtenido se denomina como “hidrógeno amarillo”, si proviene de una central nuclear, se denomina como “hidrógeno rosa, rojo o púrpura”. Cuando proviene de energías 100 % renovables o cercanas al 100 %, se denomina como “hidrógeno verde” (Incer-Valverde *et al.*, 2023; Rolo *et al.*, 2024).

Actualmente, los métodos más comunes para producir hidrógeno, se basan en el procesamiento de combustibles fósiles. Por ejemplo, el “hidrógeno gris” se obtiene a través del proceso de reformado del hidrocarburo, el “hidrógeno negro o café”, se obtiene en el proceso de gasificación del carbón, el “hidrógeno turquesa” es obtenido mediante la pirólisis del metano donde simultáneamente se produce carbono sólido en lugar de CO₂, y el “hidrógeno azul” es el resultante de un proceso derivado del hidrógeno gris, pero enfocado en disminuir el CO₂ emitido a la atmósfera, mediante su captura, almacenamiento y utilización (Rolo *et al.*, 2024).

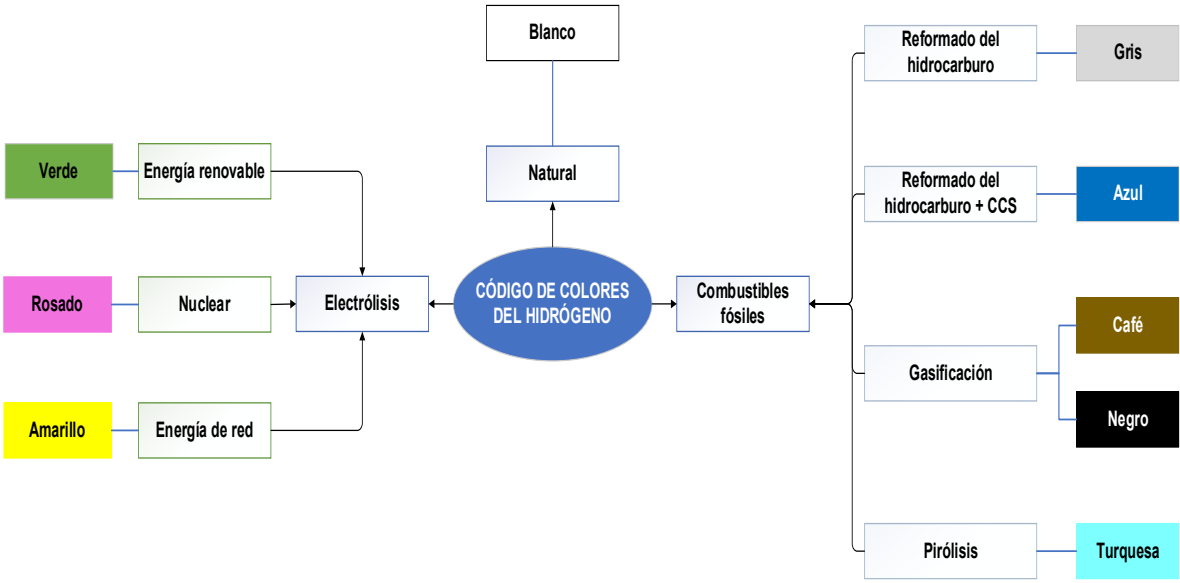
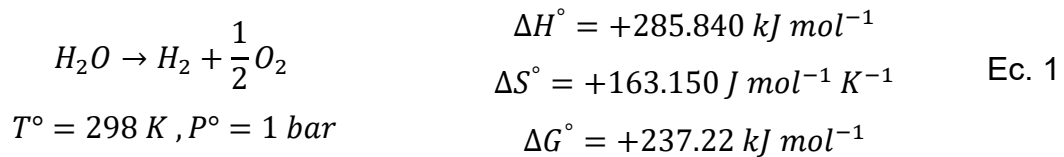


Figura 4. Código de colores del hidrógeno basado en su método de producción.

Fuente: Adaptado de Rolo *et al.* (2024).

1.2.2 Producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua

Como se mencionó anteriormente, la electrólisis se basa en el principio de dividir la molécula del agua en sus componentes básicos, hidrógeno y oxígeno, tal como se muestra en la Ec. 1.



A condiciones estándar de temperatura y presión ($T^\circ = 298\text{ K}$ y $P^\circ = 1\text{ bar}$), la electrólisis del agua presenta un cambio de entalpía positivo ($\Delta H^\circ = +285.840\text{ kJ mol}^{-1}$), lo que indica que se trata de una reacción fuertemente endotérmica. Asimismo, presenta un cambio de energía libre de Gibbs positiva ($\Delta G^\circ = +237.22\text{ kJ mol}^{-1}$) evidenciando que la reacción es no espontánea. Por otra parte, la reacción presenta un cambio de entropía positiva ($\Delta S^\circ = +163.150\text{ J mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$) reflejando un aumento en el desorden del sistema asociado a la formación de 1.5 moles de especies gaseosas a partir de 1 mol de agua líquida (Godula-Jopek, 2015). En términos termodinámicos, la relación entre entropía, entalpía y la energía libre de Gibbs se muestra en la Ec. 2, donde la energía libre de Gibbs (ΔG) corresponde a la diferencia entre el cambio de entalpía (ΔH) y el término entrópico ($T \cdot \Delta S$). En este contexto, ΔG representa el trabajo eléctrico mínimo (o reversible) necesario para disociar la molécula del agua, ΔH corresponde a la energía total requerida por el proceso, ya sea en forma eléctrica o térmica, y el término $T \cdot \Delta S$ representa la fracción de energía térmica que puede intercambiarse con el entorno en forma de calor durante la operación de la celda electrolítica (J. Hou & Yang, 2025).

$$\Delta G = \Delta H - Q = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad \text{Ec. 2}$$

En términos electroquímicos, el potencial mínimo necesario para dividir la molécula del agua (U°_{rev}), en unidades de voltaje, es de 1.23 V (Ec. 3). Este valor también se conoce como potencial reversible para la electrólisis del agua, ya que ignora las irreversibilidades y se calcula a partir de la energía libre de Gibbs estándar ($\Delta G^{\circ} = +237.22 \text{ kJ mol}^{-1}$), la constante de Faraday ($F = 96,485 \text{ C mol}^{-1}$) y la transferencia de dos electrones asociada a la reacción de electrólisis del agua ($z = 2$) (Diéguez *et al.*, 2008).

$$U^{\circ}_{rev} = \frac{\Delta G^{\circ}}{z F} = \frac{237,220 \text{ J mol}^{-1}}{(2)(96,485 \text{ C mol}^{-1})} = 1.23 \text{ V} \quad \text{Ec. 3}$$

No obstante, para que se lleve a cabo la electrólisis del agua se debe contemplar la contribución térmica de la reacción, lo que corresponde al calor de formación del agua o también conocido como el ΔH° ($285.840 \text{ kJ mol}^{-1}$). Esta contribución permite calcular el denominado potencial termoneutral (U°_{th}), el cual, para la electrólisis del agua, presenta un valor de 1.48 V y se calcula mediante la Ec. 4 (Diéguez *et al.*, 2008).

$$U^{\circ}_{th} = \frac{\Delta H^{\circ}}{z F} = \frac{285,840 \text{ J mol}^{-1}}{(2)(96,485 \text{ C mol}^{-1})} = 1.48 \text{ V} \quad \text{Ec. 4}$$

En la Figura 5, se muestra una curva de polarización característica de la electrólisis del agua a una temperatura de 25 °C y a una presión de 1 bar. Se aprecia que la diferencia entre el potencial termoneutral ($U^{\circ}_{th} = 1.48 \text{ V}$) y el potencial mínimo ($U^{\circ}_{rev} = 1.23 \text{ V}$), corresponde al término entrópico ($T \cdot \Delta S$) o contribución térmica del sistema. Esto quiere decir, que por encima de un voltaje de 1.23 V, el flujo de corriente comienza a través de la celda, no obstante, a potenciales mayores al termoneutral (1.48 V), es cuando la electrólisis del agua se lleva a cabo. El comportamiento logarítmico se debe al fenómeno de transferencia de carga, donde

a medida que la densidad de corriente se incrementa, la resistencia a la transferencia de carga disminuye y se vuelve más lineal (Godula-Jopek, 2015).

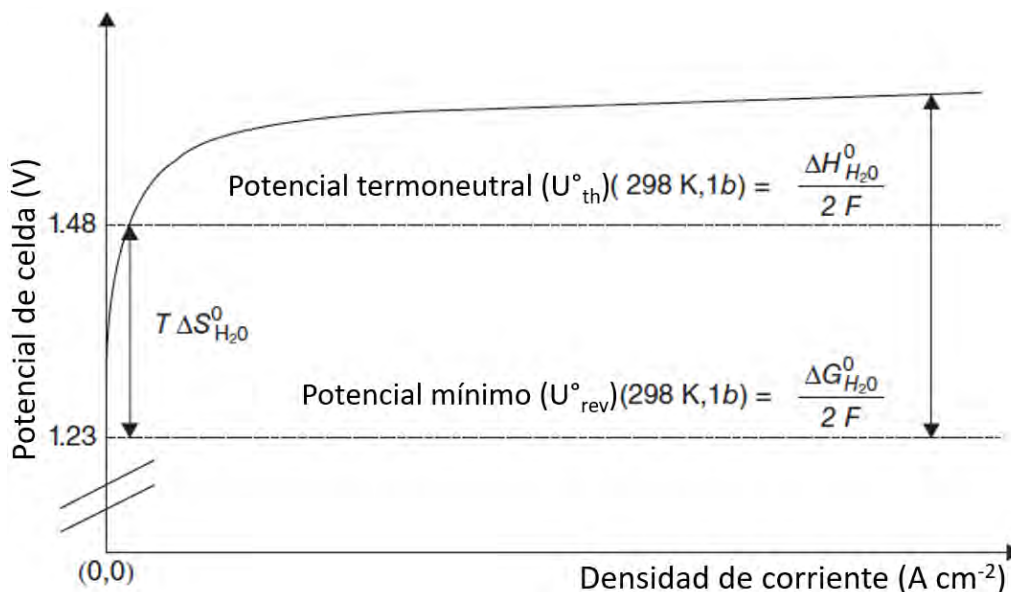


Figura 5. Curva de polarización típica de la electrólisis del agua.

Fuente: Adaptado de (Godula-Jopek, 2015).

En términos de demanda de la energía eléctrica, la International Energy Agency (IEA) indica que la electrólisis del agua incrementará su capacidad instalada en el mundo desde 0.3 GW para el año 2021 hasta 3600 GW para el año 2050 (T. Liu *et al.*, 2024). Particularmente, la Unión Europea se ha propuesto aumentar su capacidad instalada a un valor de 40 GW de electrolizadores en el 2023 (Rolo *et al.*, 2024). Esto supone un campo de investigación importante, enfocado en la optimización de las tecnologías actuales, la reducción de costos de fabricación de los electrodos, la disminución de costos de operación, y el mejoramiento de las eficiencias globales de producción de hidrógeno.

En términos generales, los componentes principales de una celda electrolítica son los siguientes (Yue *et al.*, 2021):

a) Fuente de energía externa

Es aquella que proporciona la energía eléctrica (I-V en corriente directa, CD) necesaria para favorecer la división de la molécula de agua. La fuente cuenta con dos terminales o polos, los cuales están conectados mediante alambre metálico a los electrodos anódico y catódico. El polo positivo está conectado al ánodo y el polo negativo está conectado al cátodo (Godula-Jopek, 2015).

b) Electrodos

Se conocen como ánodo y cátodo, y facilitan el flujo de electrones entre la solución electrolítica y la fuente de energía externa. En el ánodo, es donde se lleva a cabo la semireacción de oxidación, generando O_2 y extrayendo electrones hacia la fuente de energía. Por otro lado, en el cátodo, es donde ocurre la semireacción de reducción, generando H_2 y recibiendo los electrones provenientes de la fuente de energía (S. Li *et al.*, 2024).

c) Electrolito

Es una sustancia que permite el flujo de iones entre los electrodos. Normalmente se usan soluciones líquidas, sin embargo, también pueden encontrarse en forma de sal fundida o en forma de un sólido conductor iónico (Martínez-Séptimo *et al.*, 2021).

Actualmente existen cuatro técnicas de electrólisis del agua, las cuales se diferencian por manejar diferentes condiciones de operación, diferentes tipos de membrana y diferentes tipos de electrolito: la electrólisis alcalina (AWE), la electrólisis de membrana de intercambio aniónico (AEM), la electrólisis de óxido sólido (SOEC) y la electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM) (S. Li *et al.*, 2024; Rolo *et al.*, 2024; Tamilarasi *et al.*, 2024).

1.3 Tipo de electrólisis

1.3.1 Electrólisis alcalina (AWE)

Es una de las tecnologías más maduras para producir hidrógeno a escala industrial en mega watts (MW), y ampliamente utilizada en Europa para la síntesis del amoníaco. El proceso se lleva a cabo en un electrolizador, el cual utiliza un electrolito de hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH) a una alta concentración, entre 5 y 6 M. También utiliza dos electrodos (ánodo y cátodo) generalmente a base de níquel (Figura 6) (S. Li *et al.*, 2024; Rolo *et al.*, 2024).

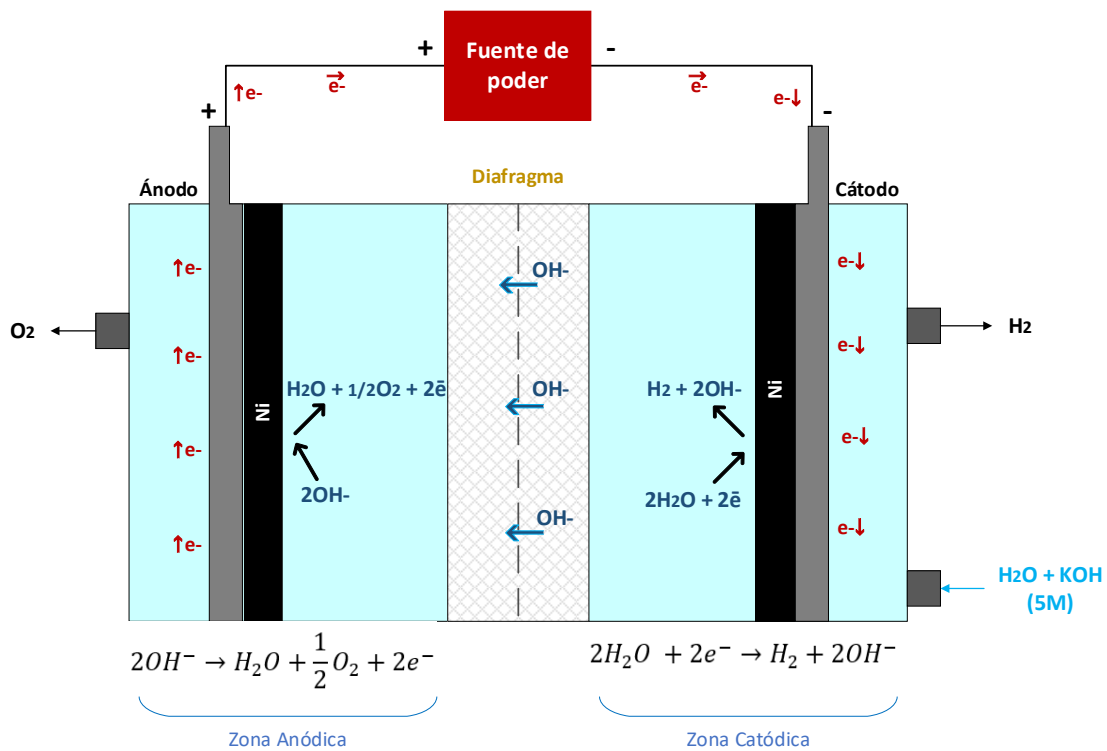


Figura 6. Esquema de un electrolizador AWE.

Fuente: Elaboración propia.

En el cátodo, se lleva a cabo la reacción de evolución de hidrógeno (HER) que se muestra en la Ec. 5, y en el ánodo, se lleva a cabo la reacción de evolución de oxígeno (OER) que se muestra en la Ec. 6.



El electrolizador AWE cuenta con un diafragma no selectivo que separa la zona catódica y la zona anódica, y maximiza el movimiento de los iones hidroxilo OH^- desde el cátodo hacia el ánodo. A su vez, el diafragma evita que los gases producidos (H_2 y O_2) se mezclen entre sí, lo que asegura que no se forme la mezcla estequiométrica oxihidrógeno, o también conocida como mezcla detonante.

1.3.2 Electrólisis de membrana de intercambio aniónico (AEM)

La electrólisis AEM es una técnica similar a la AWE, sin embargo, se diferencia al utilizar una membrana selectiva que permite únicamente el paso de iones OH^- a través de ella. Esta membrana hace que esta tecnología sea más eficiente y permita utilizar un electrolito alcalino de hidróxido de potasio (KOH) o de hidróxido de sodio (NaOH) de baja concentración, normalmente a 1 M (Rolo *et al.*, 2024; Tamilarasi *et al.*, 2024). En la Figura 7 se muestra un esquema típico de un electrolizador AEM, junto con las semirreacciones que ocurren tanto en el cátodo (HER) como en el ánodo (OER). Cabe resaltar que las semirreacciones que ocurren en un electrolizador AEM son las mismas que ocurren en un electrolizador alcalino, tanto la HER como la OER se muestran en las ecuaciones Ec. 5 y Ec. 6, respectivamente.

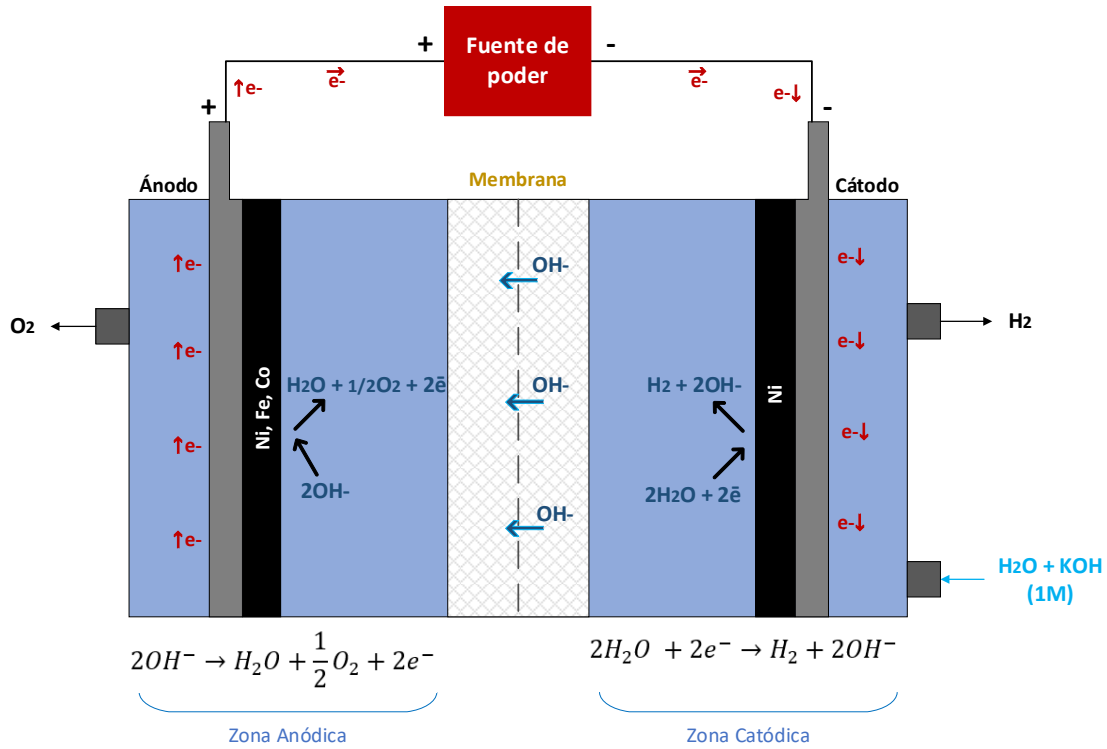


Figura 7. Esquema de un electrolizador AEM.

Fuente: Elaboración propia.

1.3.3 Electrólisis de óxido sólido (SOEC)

La electrólisis SOEC se caracteriza por operar a altas temperaturas, normalmente entre 700 y 1000 °C con agua en forma de vapor. En el cátodo, la molécula de agua es reducida en hidrógeno (H_2) e iones óxido (O^{2-}) (Ec. 7). Posteriormente los iones O^{2-} pasan a través de la membrana de intercambio iónico, normalmente de material cerámico, desde el cátodo hacia el ánodo, en donde se oxidan para producir oxígeno (O_2) (Ec. 8) (Rolo *et al.*, 2024; Tamilarasi *et al.*, 2024). Un esquema del principio de electrólisis SOEC se muestra en la Figura 8.

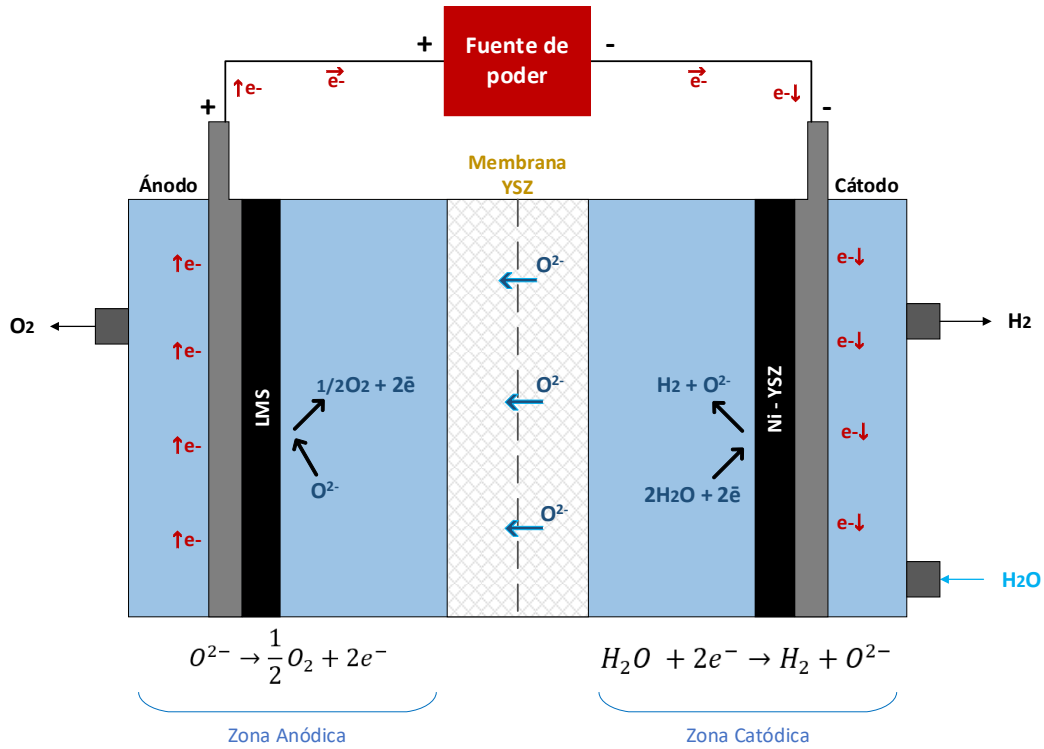


Figura 8. Esquema de un electrolizador SOEC.

Fuente: Elaboración propia.



1.3.4 Electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM)

A diferencia de las otras técnicas de electrólisis, la electrólisis PEM, no utiliza un electrolito líquido, sino una membrana polimérica de intercambio de protones sulfonada (Figura 9). En esta tecnología, la molécula del agua es dividida en el ánodo para producir oxígeno (O₂), protones (H⁺) y electrones (e⁻), Ec. 9.

Posteriormente los protones, viajan a través de la membrana hacia el cátodo, donde se reducen para formar hidrógeno (H₂), Ec. 10.

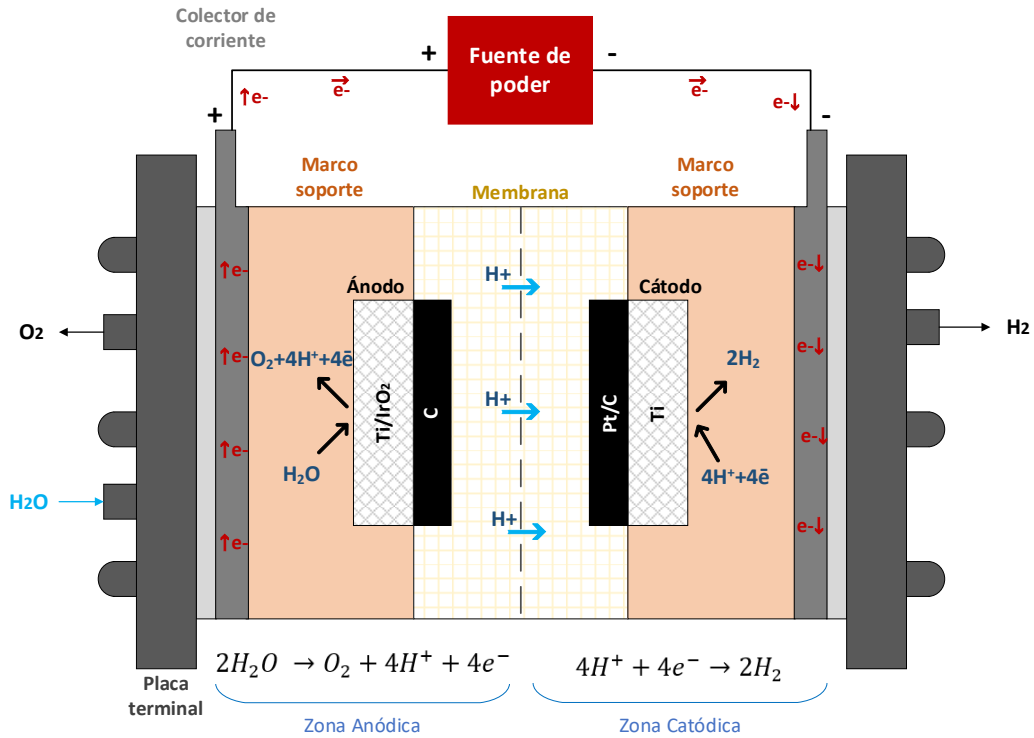


Figura 9. Esquema de un electrolizador PEM.

Fuente: Elaboración propia.



Esta tecnología utiliza agua pura, opera a bajas temperaturas (30 – 80 °C), permite obtener hidrógeno de alta pureza (> 99.9999 %) y logra alcanzar densidades de corriente altas entre 1.0 y 2.0 A cm⁻² (Tamilarasi *et al.*, 2024), aunque algunos autores reportan densidades de corriente mayores de hasta 2.5 A cm⁻² (S. Li *et al.*, 2024).

1.3.5 Comparación entre las técnicas de electrólisis del agua

Aunque las dos tecnologías más utilizadas son la electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM) y la electrólisis alcalina (AWE), en la Tabla 2, se muestra un resumen comparativo entre las cuatro tecnologías más utilizadas en la actualidad de donde se pueden sacar las siguientes observaciones:

- La electrólisis AWE es la tecnología más madura y con mayor vida útil frente a las demás. No obstante, está limitada por la baja densidad de corriente de operación comprendida generalmente entre 0.2 y 0.5 A cm⁻².
- Algunas referencias muestran que la tecnología de electrólisis AEM únicamente alcanza densidades de corriente de hasta 1.0 A cm⁻². Sin embargo, bajo ciertas condiciones de operación, se han reportado densidades de corriente mayores, alcanzando valores de hasta 2.0 A cm⁻². Aunque es una tecnología que alcanza una pureza del hidrógeno relativamente alta (> 99.99 %), presenta baja su vida útil y baja eficiencia energética.
- La tecnología de electrólisis SOEC opera a temperaturas relativamente altas, comprendidas entre 700 y 1000 °C. Su diseño tiene una vida útil limitada, con registros de operación continua comprendidos entre 500 y 2,000 horas, y ofrece densidades de corriente relativamente bajas entre 0.3 y 1.0 A cm⁻².
- La tecnología PEM tiene como ventaja, que opera a bajas temperaturas (50 – 80 °C), ofrece la producción de hidrógeno gaseoso de alta pureza (> 99.9999 %), permite la operación de sus celdas a altas densidades de corriente (1.0 – 2.0 A cm⁻²), incluso algunos estudios han mostrado que logra operar a densidades de corriente de hasta 2.5 A cm⁻² bajo condiciones específicas, y los diseños pueden involucrar módulos compactos con buenos tiempos de respuesta (Y. Liu *et al.*, 2024).

Tabla 2. Comparación entre las tecnologías para la electrólisis del agua.

	Electrólisis Alcalina (AWE)	Electrólisis de Membrana de Intercambio Aniónico (AEM)	Electrólisis de Membrana de Intercambio Protónico (PEM)	Electrólisis de Óxido Sólido (SOEC)
Mecanismo				
Reacción global	$H_2O \rightarrow H_2 + O_2$			
Portador de carga	OH ⁻	OH ⁻	H ⁺	O ²⁻
Reacción en el ánodo	$2OH^- \rightarrow H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$	$2OH^- \rightarrow H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$	$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$	$O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$
Reacción en el cátodo	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$	$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$
Material				
Electrolito	Solución alcalina (5 M de KOH o NaOH)	Solución alcalina (1 M de KOH o NaOH)	Membrana PEM (Nafion™)	YSZ (circonia estabilizada con itrio)
Separador	Diafragma (Asbesto, Zirfon Perl 500)	Fumatech**	Membrana (Ácido Perfluorosulfonado)	Cerámico poroso
Catalizador anódico	Ni, Aleación Ni-Co	Óxidos Fe, Co, Ni	Óxidos de Iridio / Rutenio	Ni, Ni-YSZ
Catalizador catódico	Ni, Aleación Ni-Mo	Ni, Aleaciones de Ni	Platino/Carbono	LSM (Manganita de estroncio y lantano)
Condiciones operativas				
Temperatura (°C)	60 - 80 65 - 100 *	50 - 60 50 - 85*	50 - 80 50 - 95*	700 - 1000
Presión (bar)	< 30	<30	30-76	1 - 5
Desempeño				
Potencial de celda (V)	1.8 - 2.4 1.4 - 3.0*	1.8 - 2.2 1.4 - 2.0*	1.8 - 2.2	0.5 - 1.4
Densidad de corriente (A cm ⁻²)	0.2 - 0.5 < 0.6*	0.2 - 1.0 0.2 - 2.0*	1.0 - 2.0 1.4 - 2.5*	0.3 - 1.0
Pureza del hidrógeno (%)	> 99.5 99.8*	> 99.9 99.99*	> 99.9999	> 99.9
Durabilidad (h)	> 100000	2000 >5000*	10000 > 50000 50000 - 80000*	500 - 2000
Capacidad* (Nm ³ h ⁻¹)	5	0.25 - 1	0.265 - 30	N/A
Eficiencia energética* (%)	59-70	52-67	65-82	75-85**
Consumo eléctrico por volumen de H ₂ producido (kWh Nm ⁻³ de H ₂)	4.3-5.7* 4.2-5.0***	5.2-4.8* 4.8***	5.8-7.3* 4.2-5.0***	2.5-4.0***
Estado del desarrollo	Madura	I + D	Comercial	I + D

* Li, S., Zhao, S., Hu, F., Li, L., Ren, J., Jiao, L., Ramakrishna, S., & Peng, S. (2024). Exploring the potential Ru-based catalysts for commercial-scale polymer electrolyte membrane water electrolysis: A systematic review. In *Progress in Materials Science* (Vol. 145)

** Rolo, I., Costa, V. A. F., & Brito, F. P. (2024). Hydrogen-Based Energy Systems: Current Technology Development Status, Opportunities and Challenges. In *Energies* (Vol. 17, Issue 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)

*** Hou, J., & Yang, M. (2025). *Green Hydrogen Production by Water Electrolysis* (1st Edition). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781003368939>

Fuente: Adaptada de Tamarasi *et al.* (2024).

Cabe mencionar que, en el año 2016, se creó la electrólisis con membrana bipolar (BPM, Bipolar Membrane), la cual emplea una membrana bipolar caracterizada por usar una capa de intercambio de protones (permeable a los cationes), que favorece la HER, y una capa de intercambio aniónico (permeable a los aniones), que favorece la OER. Es una tecnología que reporta consumos energéticos favorables entre 4.8 y 6.45 kWh Nm⁻³ de H₂ y una alta eficiencia energética entre 79 y 90 %, sin embargo, solo alcanza densidades de corriente entre 0.1 y 1.0 A cm⁻², ubicándose aún se encuentra en etapa de desarrollo experimental (S. Li *et al.*, 2024).

S. Li *et al.* (2024) también realizaron una comparación cualitativa entre las diferentes tecnologías de electrólisis del agua (Tabla 3), resaltando que actualmente la electrólisis PEM es la tecnología más prometedora para producción de hidrógeno. Sin embargo, dentro de sus desventajas, se encuentra el uso de metales nobles en sus catalizadores, debido a que tienen que resistir la corrosión ácida del ánodo, repercutiendo en el alto costo de la tecnología. Por lo tanto, innovar en nuevos catalizadores es uno de los desafíos actuales.

Tabla 3. Comparación entre las tecnologías para la electrólisis del agua.

	Electrólisis Alcalina (AWE)	Electrólisis de Membrana de Intercambio Aniónico (AEM)	Electrólisis de membrana de intercambio protónico (PEM)	Electrólisis de óxido sólido (SOEC)
Ventajas	Fácil construcción Bajo costo	Catalizadores no nobles Bajo Costo	Respuesta rápida Diseño compacto Operación dinámica Alta densidad de corriente Alta pureza de H ₂ Alta compatibilidad Alta seguridad	Más resistencia (cerámicos)
Desventajas	Densidad de corriente baja Baja pureza del H ₂ Corrosión alcalina Alta transferencia de gas Alta intensidad energética	Conductividad baja Alta intensidad energética Tiempo de vida corto Degradación de la membrana Alta carga de catalizador	Corrosión ácida Catalizadores metales nobles Alto costo	Temperaturas altas Densidad de corriente relativa baja

Fuente: Adaptada de S. Li *et al.* (2024).

1.4 Electrolizadores PEM

En el año 1996, se creó el primer electrolizador patentado por la compañía General Electric Co, el cual consistía en un Proton Membrane Exchange (PEM) (Rolo *et al.*, 2024). La membrana polimérica, comúnmente Nafion™, se caracteriza por tener grupos sulfonatos ($R-SO_3^-$) que proporcionan mayor estabilidad química y únicamente permiten el movimiento de protones (H^+) a través de ella. La membrana actualmente es fabricada por la empresa Chemours Company FC, LLC, sin embargo, fue originalmente desarrollada por la compañía DuPont.

A nivel mundial, diversos fabricantes de electrolizadores PEM emplean distintos parámetros de referencia para la comercialización de sus tecnologías, tales como la presión de operación (bar), el caudal de producción de hidrógeno ($Nm^3 h^{-1}$), la pureza del hidrógeno (%) y el consumo energético específico ($kWh Nm^{-3}$ de H_2) (Cummins, 2024; ITM Power, 2024; Nel Hydrogen, 2024; Plug Power, 2024; Siemens Energy, 2024). En la Tabla 4 se muestra un listado de los principales fabricantes de electrolizadores PEM del mundo, junto con algunos modelos comercializados. Se puede observar que, aunque manejan parámetros de referencia similares, tienen algunas diferencias entre ellos, los cuales dependen principalmente del mercado objetivo. Por ejemplo, la empresa Cummins, que fabrica el electrolizador PEM modelo *HyLYZER® 4000-30*, se destaca por manejar un alto caudal de producción de hidrógeno de $4,000 Nm^3 h^{-1}$, no obstante, reporta un consumo energético de $5.0 kWh Nm^3$ de H_2 , siendo ligeramente mayor que el de los demás. Por otra parte, el electrolizador modelo *PSM Series Compacta* de la empresa Nel Hydrogen, a pesar de presentar un menor consumo energético de $4.5 kWh Nm^3$ de H_2 , muestra una limitación en su capacidad de producción al alcanzar únicamente $2,020 Nm^3 h^{-1}$ de H_2 . En conclusión, es importante señalar que, aunque la capacidad nominal de hidrógeno es un parámetro relevante desde el punto de vista comercial, también debe considerarse el consumo energético durante su operación, el cual puede verse favorecido mediante el uso de electrodos más eficientes.

Tabla 4. Principales fabricantes de electrolizadores PEM.

Compañía	País	Modelo del electrolizador	Presión (bar)	Producción H ₂ (Nm ³ h ⁻¹)	Pureza (%)	Consumo energía (kWh Nm ⁻³)
Nel Hydrogen ⁽¹⁾	Noruega	PSM Series compacta	30	2,020	> 99	4.5
ITM Power ⁽²⁾	UK	HGas3SP	30	400	N/A	N/A
Cummins ⁽³⁾	USA	HyLYZER ® 4000-30	30	4,000	99.99	5.0
Siemens Energy ⁽⁴⁾	Germany	Elyzer P-300	N/A	3,727	99.999	4.7
Plug Power ⁽⁵⁾	USA	EX4250D	40	1,989	99.999	5.0

Fuentes

(1) Nel Hydrogen. PEM Electrolyser – PSM Series. Publicado en: <https://nelhydrogen.com/product/psm-series-electrolyser/>. Consultado: Noviembre 2024.

(2) ITM Power. Leading PEM electrolyser technology. Publicado en: <https://itm-power.com/products/>. Consultado: Noviembre 2024.

(3) Cummins. Hydrogen: The next generation. Discover cummins electrolyzer technologies. Publicado en: <https://www.cummins.com/sites/default/files/2023-10/electrolyzer-brochure.pdf>. Consultado: Noviembre 2024.

(4) Siemens Energy. Green hydrogen production: Electrolyzer for green hydrogen production in detail. Publicado en: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product-offerings/hydrogen-solutions.html>. Consultado: Noviembre 2024.

(5) Plug Power. Electrolyzer Hydrogen Solutions Now. Publicado en: <https://www.plugpower.com/hydrogen/electrolyzer-hydrogen/>. Consultado: Noviembre 2024.

Fuente: Elaboración propia.

1.4.1 Componentes de un electrolizador PEM

Los principales componentes de un electrolizador PEM se muestran en la Figura 10:

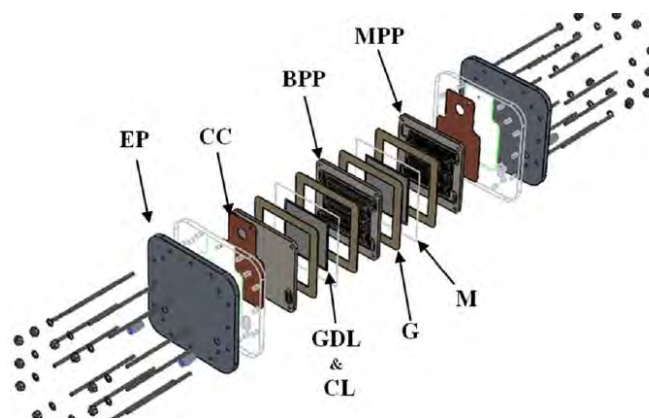


Figura 10. Componentes de un electrolizador PEM.

Fuente: Tomada de Escobedo *et al.* (2023).

a) Placas terminales (End Plates, EP)

Su función principal es asegurar que el electrolizador sea compacto y todos los componentes se encuentren ensamblados adecuadamente. Las placas terminales tienen tornillos que permiten aplicar un torque al electrolizador. Si un torque es débil, puede propiciar fugas de gas y agua, aumentando la resistencia eléctrica de contacto. Por otro lado, si el torque es fuerte, la capa de transporte porosa (PTL) y las capas catalíticas (CL) se comprimirán excesivamente afectando la transferencia de gas y disminuyendo la eficiencia del electrolizador.

b) Placas monopolares (Monopolar Plates, MPP) bipolares (Bipolar Plates, BPP)

Tienen como función distribuir el gas, permitir una buena conductividad eléctrica, y modular la transferencia de masa tanto del agua como de los gases producidos. Se diseñan con canales que permitan el transporte de masa adecuadamente y le aportan un soporte y resistencia al electrolizador mientras se aplica el torque.

c) Capa de transporte porosa (Porous Transport Layer, PTL)

La capa de transporte porosa (PTL) cumple diferentes funciones dentro del electrolizador PEM: (1) proporciona una distribución uniforme del gas y del líquido hacia/desde los electrodos debido a su porosidad y permeabilidad, (2) da soporte metálico entre los componentes internos, y (3) mejora la conductividad interna de la celda lo que se traduce en una menor resistencia eléctrica (Ito *et al.*, 2013). Dado que los electrolizadores PEM operan a potenciales elevados y bajo condiciones altamente ácidas, el material de la capa de transporte porosa (PTL) debe presentar una elevada resistencia a la corrosión y una adecuada estabilidad electroquímica (J. Hou & Yang, 2025).

d) Membrana (Membrane, M) y capas catalíticas (Catalyst Layer, CL)

La membrana actúa como un electrolito sólido, permitiendo el paso selectivo de protones (H^+) desde el ánodo hacia el cátodo y bloqueando el paso de electrones y gases generados. Generalmente son polímeros fluorados con grupos sulfonatos ($R-SO_3^-$), sobre cuyas caras se integran capas catalíticas: por un lado será el catalizador anódico (comúnmente IrO_2) y por el otro lado será el catalizador catódico (comúnmente Pt/C). Las membranas más comunes suelen ser NafionTM, Flemion y Aquivion, debido a su excelente conductividad protónica, estabilidad química y resistencia mecánica (Zerrougui *et al.*, 2025).

e) Colectores de corriente (Current Collectors, CC)

Son aquellos que facilitan la distribución de corriente eléctrica desde y hacia los electrodos.

f) Sellos (Gaskets, G)

Previenen el contacto eléctrico entre el ánodo y el cátodo del electrolizador, así como fugas de gases y agua.

1.4.2 Ensamble membrana – electrodos (MEA)

La parte central de un electrolizador PEM es el ensamble membrana-electrodos (MEA), el cual está conformado convencionalmente por una membrana polimérica NafionTM sobre cuyas caras se depositan los catalizadores anódico y catódico. Adicionalmente, se incorporan las capas de transporte porosa (PTL), las cuales se

encuentran en contacto directo con los catalizadores y proporcionan un rol mecánico importante, donde favorece la conductividad interna, la difusión del gas y el transporte del agua (J. Hou & Yang, 2025). En la Figura 11 se muestra un esquema del MEA convencional de un electrolizador PEM.

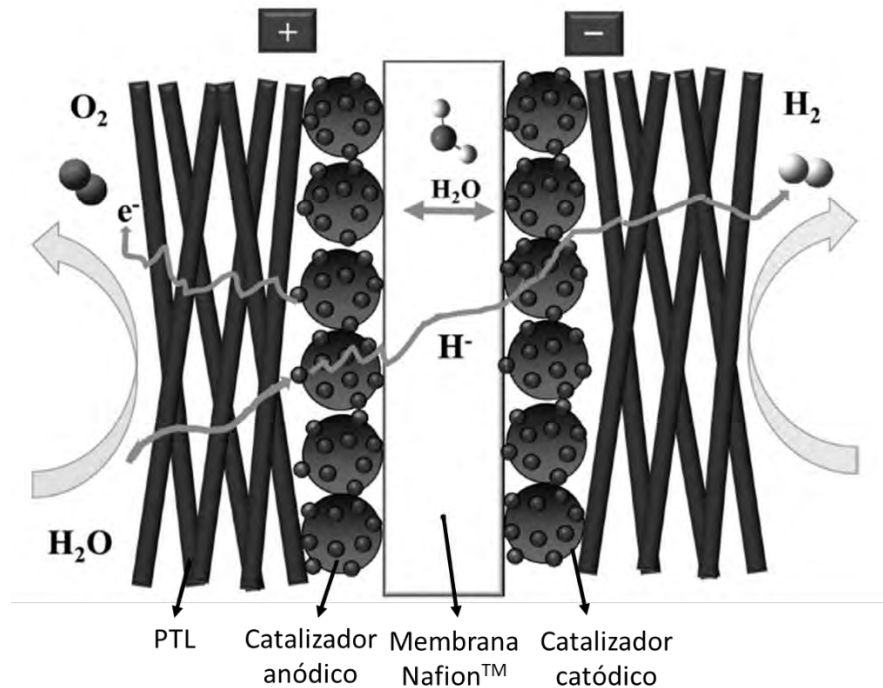


Figura 11. Ensamblaje membrana-electrodo (MEA) convencional de un electrolizador PEM.

Fuente: Adaptada de J. Hou & Yang (2025).

1.4.3 Desafíos de los electrolizadores PEM

a) Disponibilidad limitada y alto costo de metales nobles

Los electrolizadores PEM usan electrodos compuestos principalmente por metales nobles generalmente de iridio (Ir) para el ánodo, y de platino (Pt) y carbono (C) para el cátodo (Shirvanian & van Berkel, 2020). Estos metales tienden a ser resistentes a la corrosión y estables en medios ácidos (S. Li *et al.*, 2024; Murugaiah & Shahgaldi, 2024; Tamilarasi *et al.*, 2024), no obstante, son elementos particularmente raros, costosos y escasos en la corteza terrestre, por ejemplo, el iridio es un metal noble presente en la tierra en apenas un 0.001 ppm (Tamilarasi *et al.*, 2024). En consecuencia, uno de los desafíos primordiales de la tecnología, se centra en encontrar catalizadores menos costosos y más abundantes en la tierra. Algunas investigaciones han reportado materiales que podrían sustituir los PGM, como los óxidos monometálicos, mezclas polimetálicas y materiales a base de carbono (Tamilarasi *et al.*, 2024).

b) Resistencia a la corrosión en medio ácido

La operación de los electrolizadores PEM se centra en la oxidación del agua (H_2O) en la zona anódica, liberando oxígeno (O_2), protones (H^+) y electrones (e^-). Esta reacción, junto con la naturaleza ácida del entorno impuesto por la membrana polimérica conductora de protones, conduce a condiciones altamente corrosivas en la interfaz ánodo-electrolito. Diversos estudios han reportado que la acidez local en la región anódica puede alcanzar valores de pH cercanos a 1, comparables a los de una solución de 0.5 M de H_2SO_4 (S. Li *et al.*, 2024). En este contexto, investigaciones recientes han promovido el uso de óxidos metálicos como catalizadores anódicos, entre ellos el RuO_2 , ya que suelen ser más resistentes a la corrosión en medios ácidos en comparación con el Ru metálico (S. Li *et al.*, 2024).

No obstante, diversos estudios han demostrado que el RuO_2 puede exhibir cierto grado de inestabilidad durante la OER, a elevados potenciales (mayores de 1.3 – 1.4 V/SHE), favoreciendo procesos de degradación y corrosión en medios altamente ácidos (Y. Liu *et al.*, 2024). En particular, se ha observado que a estos

potenciales, el oxígeno reticular, es decir, aquel que forma parte de la estructura cristalina del óxido, puede oxidarse y deslocalizarse, dejando expuesto al átomo de Ru en la superficie del catalizador (J. Hou & Yang, 2025; Retuerto *et al.*, 2019). Bajo condiciones de elevada acidez, estos átomos de Ru también pueden oxidarse en presencia de protones H^+ , dando lugar a la formación de otras especies químicas del rutenio de mayor estado de oxidación como RuO_4 y RuO_5 (Teng *et al.*, 2023), que eventualmente terminarán acumulándose en el agua e inactivando los sitios activos del catalizador (Y. Liu *et al.*, 2024).

A pesar de estos desafíos, se han propuesto diversas estrategias para mejorar la estabilidad electroquímica del RuO_2 bajo condiciones operativas de la OER. Entre ellas se encuentra el dopaje con Paladio (Pd) en nanohojas bidimensionales, que mejoran sustancialmente la sobreoxidación del Ru conforme es sometido a varios ciclos durante la OER (Y. Liu *et al.*, 2024), así como el uso de iridio (Ir) para la fabricación de estructuras cristalinas núcleo-corteza tipo $RuO_2@IrO_2/C$, donde la capa externa rica en Ir protege al Ru de su oxidación y disolución en el medio (Teng *et al.*, 2023). Estas estrategias demuestran que si bien el RuO_2 presenta limitaciones, continúa siendo un óxido metálico prometedor para emplearse como catalizador anódico para la OER.

c) Cinética lenta de la reacción OER

En un electrolizador PEM, las reacciones redox que ocurren en los electrodos deben cumplir con la electroneutralidad, lo que implica que la cantidad de carga transferida en el ánodo debe ser igual a la transferida en el cátodo. Sin embargo, la OER representa un desafío significativo debido a su cinética lenta, ya que involucra la transferencia de cuatro electrones (Ec. 9) a diferencia de la HER, que solo requiere la transferencia de dos electrones (Ec. 10) (S. Li *et al.*, 2024; Y. Liu *et al.*, 2024; Tamilarasi *et al.*, 2024).

Debido a esta diferencia, la OER se convierte en el paso limitante de la cinética global del proceso afectando directamente la eficiencia del electrolizador. Por esta razón, se ha priorizado la búsqueda y desarrollo de catalizadores anódicos que permitan mejorar la cinética de la OER y, con ello, optimizar el desempeño y eficiencia energética del sistema.

1.4.4 Curva de polarización en electrolizadores PEM

Las curvas de polarización son ampliamente utilizadas para evaluar el desempeño de los electrolizadores, ya que permiten relacionar la demanda de potencial de celda a diferentes densidades de corrientes aplicadas. La referencia internacional de desempeño de un electrolizador PEM en la curva de polarización, es aplicar una densidad de corriente de 2.0 A cm^{-2} a un voltaje máximo de 2.0 V (Malkow T *et al.*, 2018).

En el proceso de electrólisis del agua, el potencial de celda demandado suele ser mayor que el potencial termoneutral ($U^{\circ}_{th} = 1.48 \text{ V}$), que fue discutido en la sección 1.2.2, debido a la contribución de resistencias presentes en el electrolizador PEM, tales como resistencias óhmicas, resistencias por transferencia de carga en el ánodo y cátodo, y resistencias por transporte de masa (Diéguez *et al.*, 2008). En la Figura 12 se observa una curva de polarización característica de un electrolizador PEM, donde se aprecian diferentes resistencias que impactan en la demanda del potencial de celda: (1) en color gris se muestra la contribución por pérdidas óhmicas, asociadas a las resistencias internas del electrolizador, ya sea por la interfaz entre cada componente, el espesor de la membrana NafionTM, la hidratación de la membrana, y/o a la conductividad interna. Esta resistencia suele comportarse de forma lineal a medida que incrementa la densidad de corriente, dominando principalmente la zona intermedia de la curva, (2) en color azul se muestra una contribución pequeña asociada a la transferencia de carga en el cátodo donde se lleva a cabo la HER, siendo generalmente relevante a bajas densidades de corriente. Su contribución suele ser pequeña debido a que sus catalizadores de Pt

presentan bajos sobrepotenciales y la HER tiene una cinética rápida, (3) en color rojo se muestra una contribución relevante asociada a la transferencia de carga en el ánodo donde se lleva a cabo la OER. Su contribución es relevante debido a que la OER maneja una cinética lenta en múltiples etapas y registra elevados sobrepotenciales, y (4) en color verde una contribución debido al transporte de masa, asociada principalmente a la formación de burbujas, restricción y acumulación del H₂ y el O₂ producido en el electrolizador PEM (J. Hou & Yang, 2025).

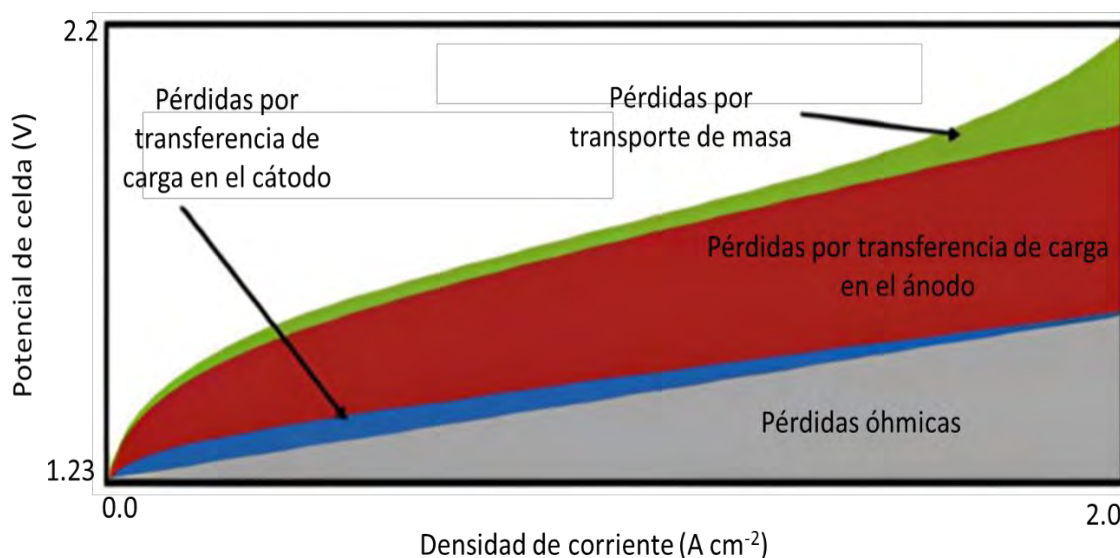


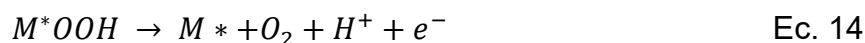
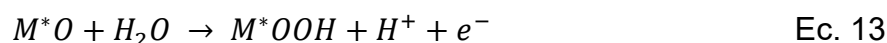
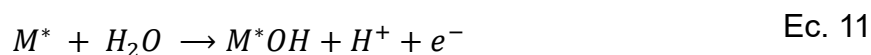
Figura 12. Curva de polarización de un electrolizador PEM.

Fuente: Adaptada de (Martínez, 2024)

1.5 Reacción de evolución de oxígeno (OER)

Es una reacción que bajo condiciones estándar de temperatura de 298.15 K y una presión de 1 bar, tiene un potencial de equilibrio de 1.23 V/SHE (Ec. 9). Es una reacción compleja que implica la transferencia secuencial de protones y electrones, la cual ha sido estudiada través de diferentes mecanismos en medio ácido. La

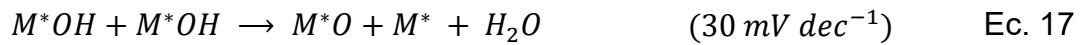
evolución de oxígeno sobre un sitio activo metálico del catalizador (M^*), se puede describir por el mecanismo tradicional de evolución del adsorbato (AEM, Adsorbate Evolution Mechanism), el cual asume una transferencia de un par de protón y electrón a la vez. En este mecanismo, el proceso de formación del oxígeno molecular (O_2), ocurre debido a la interacción entre las especies químicas intermedias como M^*OH , M^*O y M^*OOH (J. Hou & Yang, 2025; Y. Liu *et al.*, 2024). Los pasos secuenciales se muestran entre las ecuaciones Ec. 11 y Ec. 14.



En el primer paso, ocurre la desprotonación de la molécula del agua (H_2O) y adsorción del hidroxilo (OH^-) sobre el sitio activo del catalizador (M^*) formando un estado estable de M^*OH y la liberación de un par protón y electrón (Ec. 11). En el segundo paso, la especie M^*OH se deshidrogeniza para formar una especie de oxígeno adsorbido M^*O , liberando otro par de protón y electrón (Ec. 12). En el tercer paso, la especie M^*O recibe un ataque nucleofílico del agua (H_2O), reaccionando con otro hidroxilo (OH^-) para formar la especie M^*OOH (Ec. 13). Finalmente, en el cuarto paso, ocurre la última desprotonación de la especie M^*OOH , liberando un último par de protón y electrón, y permitiendo la evolución del oxígeno molecular (O_2) (Ec. 14). En este último paso, el sitio activo M^* se reactiva a su estado inicial. (J. Hou & Yang, 2025). El tercer paso, es comúnmente conocido como el paso determinante de la velocidad de reacción (RDS, Rate Determining Step), debido a que la formación de la especie M^*OOH , que requiere alta energía de activación y adsorción, principalmente por la formación del enlace O-O entre el oxígeno

adsorbido de la especie M^*O y el hidroxilo (OH^-) proveniente del agua (S. Li *et al.*, 2024).

Una variante del mecanismo tradicional de evolución del adsorbato ampliamente aceptada, se basa en la ruta del óxido o mecanismo de paso de recombinación, la cual se muestra en la siguiente secuencia de reacciones:



En esta ruta, la Ec. 11 del mecanismo AEM tradicional es desglosada en las ecuaciones Ec. 15 y Ec. 16, donde se contemplan dos intermedios de adsorción adicionales M^*OH^* y M^*OH , los cuales tienen la misma estructura química pero diferentes estados de energía (G. Li *et al.*, 2017). Posteriormente dos sitios activos son sus respectivos hidroxilos (M^*OH) forman la especie M^*O (Ec. 17), donde finalmente, ocurre la recombinación de dos oxígenos adsorbidos ($M^*O + M^*O$) para la liberación del oxígeno molecular (O_2) (Ec. 18). Cada paso tiene asociada una pendiente de Tafel, por ejemplo, para el primer paso, donde ocurre la adsorción del agua se asocia una pendiente de Tafel de 120 mV dec^{-1} , el segundo paso, donde el hidroxilo adsorbido cambia de estado de energía se asocia una pendiente de Tafel de 60 mV dec^{-1} , el tercer paso, donde se forma el oxígeno adsorbido suele tener una pendiente de Tafel de 30 mV dec^{-1} , y el último paso, donde ocurre la recombinación de los dos oxígenos para formar el oxígeno diatómico (O_2) suele tener una pendiente de Tafel de 15 mV dec^{-1} (Antolini, 2014).

1.6 Óxido de rutenio (RuO_2) como catalizador anódico

Como se ha discutido anteriormente, a nivel comercial los electrolizadores PEM emplean predominantemente catalizadores anódicos basados en iridio (Ir); sin embargo, el uso de este metal noble incrementa de manera significativa el costo de fabricación de estos sistemas. En este contexto, una de las alternativas planteadas en el presente proyecto es el uso de RuO_2 como material activo para la síntesis de electrocatalizadores anódicos en electrolizadores PEM, dada su elevada actividad catalítica para la reacción de evolución de oxígeno y su potencial para reducir los costos asociados (S. Li *et al.*, 2024; Y. Liu *et al.*, 2024; Tamilarasi *et al.*, 2024). En particular, algunos estudios evidencian que, en promedio, el costo del rutenio corresponde aproximadamente al 7 % del costo total del iridio (S. Li *et al.*, 2024), lo que convierte al rutenio en una alternativa económicamente atractiva como sustituto parcial o total del iridio en catalizadores anódicos para electrolizadores PEM.

Se usa el proveedor de insumos químicos Sigma-Aldrich (ahora Merck) como referencia comparativa de costos de algunos precursores de catalizadores de rutenio e iridio en laboratorio, los cuales se muestran en la Tabla 5 y Tabla 6 respectivamente; sin embargo, el análisis técnico-económico a mayor escala queda fuera del alcance del presente estudio. A modo de comparación, y considerando precursores metálicos con una pureza del 99.9 %, el óxido de Iridio (IrO_2) presenta un costo aproximado de 18,774.00 pesos mexicanos por gramo, mientras que el óxido de rutenio (RuO_2) tiene un precio de 2,296.00 pesos mexicanos por gramo, lo que equivale aproximadamente al 12 % del costo total del IrO_2 . Si bien esta diferencia de precio hace al RuO_2 una alternativa económicamente más atractiva frente al IrO_2 , el RuO_2 continúa siendo una especie química del rutenio con un costo considerablemente elevado.

Por otra parte, al comparar el precio de sales metálicas con una pureza del 99.9 % del metal precursor, se observa que 1 gramo de cloruro de rutenio hidratado ($\text{RuCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) tiene un costo aproximado de 1,854.00 pesos mexicanos, mientras que 1 gramo de cloruro de iridio hidratado ($\text{IrCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) alcanza un precio de

7,944.00 pesos mexicanos. Estos valores evidencian que, incluso al considerar diferentes especies químicas precursoras, las sales metálicas basadas en rutenio presentan un costo significativamente menor en comparación con las de iridio, lo que refuerza el atractivo económico del cloruro rutenio como alternativa para la síntesis de catalizadores anódicos en electrolizadores PEM utilizando el método de síntesis PPM.

Tabla 5. Precios de diferentes compuestos a base de rutenio (Sigma-Aldrich).

Material	No. CAS	Descripción	Pureza Ru (%)	Costo (MXN g ⁻¹)
Oxido de rutenio (RuO₂)	12036-10-1	1 gramo	99.9	\$ 2,296.00
Cloruro de rutenio hidratado (RuCl₃ · xH₂O)	14898-67-0	1 gramo	99.9	\$ 1,854.00

Fuente: Página oficial Sigma Aldrich (Merck). Fecha de consulta: Enero 2026

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Precios de diferentes compuestos a base de iridio (Sigma-Aldrich).

Material	No. CAS	Descripción	Pureza Ir (%)	Costo (MXN g ⁻¹)
Oxido de iridio (IrO₂)	12030-49-8	1 gramo	99.9	\$ 18,774.00
Cloruro de iridio hidratado (IrCl₃ · xH₂O)	14996-61-3	1 gramo	99.9	\$ 7,944.00

Fuente: Página oficial Sigma Aldrich (Merck). Fecha de consulta: Enero 2026

Fuente: Elaboración propia.

Otras razones que sustentan al óxido de rutenio como buen candidato a utilizarse como electrocatalizador anódico, se presentan a continuación:

- a) El RuO_2 es uno de los metales nobles con mayor actividad catalítica para la OER. En la Figura 13, que muestra un gráfico tipo volcano, compara el desempeño de varios óxidos metálicos como catalizadores para la OER, donde se aprecia que el RuO_2 es el óxido metálico con menor sobrepotencial (η), lo que indica que requiere menor energía para impulsar la OER. Adicionalmente, su posición cercana al punto máximo, indica que tiene una buena relación entre estabilidad y reactividad de las especies oxigenadas (J. Hou & Yang, 2025).

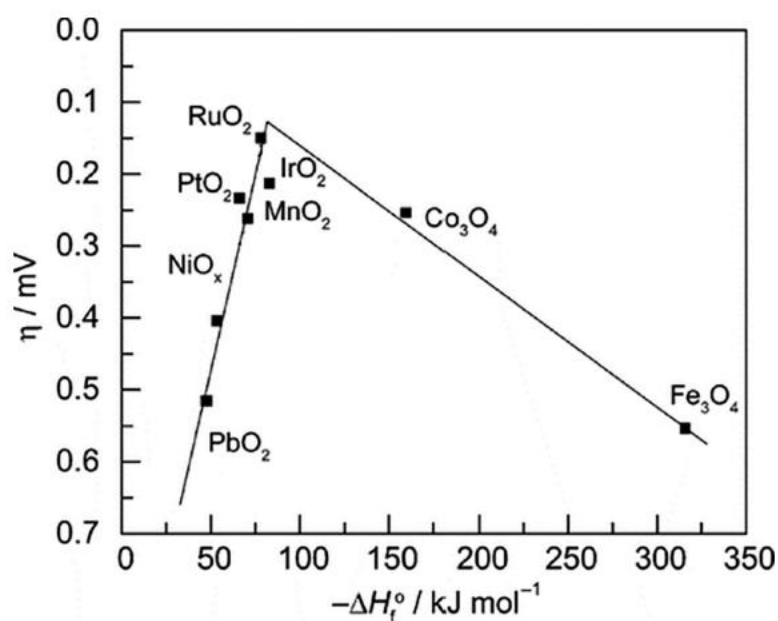


Figura 13. Relación en forma de volcán entre la actividad para la OER y la entalpía (de adsorción o reacción) en superficies de óxidos metálicos.

Tomada de: (J. Hou & Yang, 2025).

- b) El RuO_2 puede ser formado a partir de diferentes métodos de síntesis, por ejemplo, utilizando sales de rutenio que tienen menor costo. Se puede utilizar cloruro de rutenio (RuCl_3) para fabricar ánodos tipo DSA de RuO_2 , con buena

actividad catalítica, gran dispersión, durabilidad y homogeneidad (Palma-Goyes *et al.*, 2016).

- c) También se pueden utilizar sustratos de diferentes formas, como nanopartículas, nanorods y nanowires para sintetizar RuO₂ (S. Li *et al.*, 2024), lo que puede aumentar el ECSA y evitar el uso directo de la especie química RuO₂, la cual tiene mayor costo en el mercado (Tamilarasi *et al.*, 2024).

1.7 Métodos de síntesis de catalizadores anódicos

En los últimos años, se han reportado diferentes métodos de síntesis de electrocatalizadores anódicos de rutenio que favorecen la OER. Por ejemplo, Santos *et al.* (2014) desarrollaron ánodos tipo DSA de titanio recubiertos con óxidos de rutenio (Ti/RuO₂) a través de tres métodos de síntesis: el del precursor polimérico (PPM o Pechini), el del sol-gel y el del líquido iónico. Los catalizadores fueron caracterizados fisicoquímicamente encontrando que, aquellos fabricados por el método de síntesis PPM, tuvieron mayor estabilidad física y electroquímica con respecto a los otros métodos de síntesis mencionados anteriormente. Por medio de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) acoplada a Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS), encontraron que los fabricados por el método PPM tenían una mayor proporción de átomos de Ru, películas homogéneas y grietas superficiales, impactando positivamente en su actividad catalítica. También aplicaron la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) encontrando estructuras cristalinas tipo rutilo (tetragonales), siendo deseables en los catalizadores de RuO₂, ya que minimizan las pérdidas óhmicas por su arreglo cristalino, estabilidad termodinámica, alta conductividad y actividad catalítica.

Chen *et al.* (2020) sintetizaron un catalizador de diboruro de rutenio (RuB₂) mediante el método de síntesis de fase-pura ionotermal, mezclando dióxido de rutenio (RuO₂), borohidruro de potasio (KBH₄), cloruro de potasio (KCl) como sal fundida y cloruro de litio (LiCl) como solvente. La solución posteriormente fue calentada a una

temperatura de 1,173 K, y finalmente enfriada para formar un producto negro de (RuB_2) como catalizador. Este método permitió obtener catalizadores resistentes en medio ácido característico de la OER, e incluso mostró una buena estabilidad después de 1,000 ciclos en una Voltamperometría Cíclica.

Hubert *et al.* (2020) utilizaron una adaptación del método de síntesis sol-gel, para fabricar catalizadores a base de rutenio con fórmula química $\text{A}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$, conocida como estructura pirocloro, donde “A” hace referencia a diferentes átomos como el itrio (Y), neodimio (Nd), gadolinio (Gd) y bismuto (Bi). Los compuestos precursores de los metales “A” y Ru fueron mezclados con agua, ácido nítrico y una solución de nitrato de nitrosilo de rutenio ($\text{RuNO}(\text{NO}_3)_3$). Posteriormente se calentó a 80 °C hasta secar y obtener un polvo, que luego se calcinó entre 700°C y 1,000 °C. Con este método, se logró incrementar la actividad catalítica de sus catalizadores hacia la OER y mejorar su estabilidad en medio ácido. El catalizador $\text{Nd}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ mostró buena actividad catalítica en los primeros ciclos de operación, no obstante, perdió su actividad finalizando la prueba de estabilidad. Por otro lado, el catalizador $\text{BiNd}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ no mostró una relevante actividad catalítica pero si se destacó por ser estable al ser sometido a una Cronoamperometría (CP) de 10 horas.

Martínez-Séptimo *et al.* (2021) utilizaron el método de oxidación térmica para crear un catalizador compuesto por nanopartículas de IrRuO_x sobre un sustrato de óxido de titanio ($\text{TiO}_2\text{-P25}$). Utilizaron sales metálicas como el RuCl_3 y el IrCl_3 disueltas en agua y mediante un tratamiento térmico, lograron la deposición de óxidos de Ir y Ru sobre el $\text{TiO}_2\text{-P25}$. Se demostró que la incorporación del Ir permitió estabilizar la sobre oxidación del Ru y dio mayor estabilidad a los depósitos de RuO_2 .

S. Hou *et al.* (2022) utilizaron un método de complejo de amoníaco (template-free) para preparar nanopartículas porosas de RuO_x . En este método, se mezcló una sal metálica de rutenio (RuCl_3) con una sal inorgánica de bicarbonato de amoníaco (NH_4HCO_3), que posteriormente fue calentada a temperaturas entre 350 y 450°C y centrifugada para precipitar nanopartículas porosas de RuO_x . Se encontró que la temperatura influyó en el grado de cristalinidad de los depósitos y que las estructuras porosas mejoraron su actividad catalítica favoreciendo la OER.

Y. Liu *et al.* (2024) fabricaron un catalizador de RuO₂ dopado con paladio (Pd) usando el método de una plantilla de sal compuesta por nanohojas bidimensionales formadas por nanopartículas apiladas. El catalizador fue mezclado con agua e isopropanol para producir la tinta catalítica (Ink), que posteriormente fue aplicada sobre la membrana Nafion™ 115 utilizando un aerógrafo. La función principal de la incorporación del Pd, fue la de proteger los átomos de Ru de una sobre oxidación, agregación y/o disolución en medio ácido, y la función de utilizar como sustrato estructuras bidimensionales, fue la de preservar los sitios activos del catalizador y de esta forma, aumentar su actividad catalítica.

A pesar de que en la literatura se reportan diversos métodos de síntesis para la obtención de electrocatalizadores anódicos de rutenio, el método de síntesis PPM, como una adaptación del método sol-gel, se presenta como una alternativa viable y eficiente. Este método no solo facilita la fabricación de ánodos tipo DSA de óxidos de rutenio, sino también ofrece ventajas como una elevada ECSA, una alta actividad catalítica, depósitos homogéneos y una buena estabilidad en medio ácido (Palma-Goyes *et al.*, 2016; Rodríguez *et al.*, 2018). Adicionalmente, permite la síntesis de ánodos con características controladas en cuanto a estequiometría y homogeneidad (Santos *et al.*, 2014), de fácil implementación, al no afectarse fácilmente por la presencia de agua durante el proceso (Terezo & Pereira, 2002).

1.7.1 Método del precursor polimérico (PPM o Pechini)

El método del precursor polimérico (PPM, Polymeric Precursor Method), consiste en producir una solución polimérica conformada por poliésteres de citrato de rutenio y agua, disolviendo la sal metálica de cloruro de rutenio (RuCl₃) en una mezcla previamente calentada a 80 °C, entre ácido cítrico (C₆H₈O₇·H₂O) como agente quelante, y etilenglicol (C₂H₆O₂) como agente solvente de la reacción de polimerización. Posteriormente la solución precursora se aplica sobre el sustrato de titanio, que luego se seca en un horno a temperatura moderada y finalmente, se descompone térmicamente a través de un proceso de calcinación a temperaturas

elevadas. Este proceso favorece la oxidación térmica de los iones rutenio (Ru^{3+}) contenidos en la solución precursora para obtener óxidos de rutenio (RuO_2) que se depositan sobre el sustrato (Palma-Goyes *et al.*, 2015; Rodríguez *et al.*, 2018). La relación molar recomendada es de 0.0296:0.12:16 entre RuCl_3 , el $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ y el $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ (o $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_3$) respectivamente (Yañez-Rios, 2020).

La calcinación es un etapa fundamental del método porque descomponete la fracción orgánica de la solución precursora y permite la oxidación del Ru^{3+} a Ru^{4+} , estado de oxidación característico del Ru en los óxidos cristalinos de RuO_2 . Diversos estudios han analizado la descomposición térmica de las soluciones precursoras, por ejemplo, Terezo & Pereira (2002) analizaron la solución precursora a través de un análisis termogravimétrico y un análisis térmico diferencial (TGA-DTA) encontrando que a una temperatura mayor de 200 °C la materia orgánica es completamente degradada, entre los 320 °C y los 410 °C se oxidan los iones Ru^{3+} hacia Ru^{4+} y entre los 410° C y los 1,100 °C ya no se registran más pérdidas de peso. Este análisis permitió identificar que la temperatura mínima de calcinación debería ser de 410 °C, siendo suficiente para favorecer la aparición de los RuO_2 . De igual forma, Santos *et al.* (2014) determinaron a través de un análisis TGA-DTA, que para degradar la materia orgánica en su totalidad, requiere una temperatura mínima de 380 °C, y Yañez-Rios & *et al.* (2020) determinaron que la temperatura de calcinación óptima sería de 550 °C.

La fabricación de ánodos tipo DSA mediante el método PPM, debe controlarse en función de diferentes variables como el número de capas, la temperatura y el tiempo de calcinación. S. Hou *et al.* (2022) encontraron que a mayor temperatura de calcinación, se aumenta el tamaño del grano, incrementa su grado de cristalinidad (mayor presencia de iones Ru^{4+}), disminuye el volumen del poro, disminuye el ECSA y por consiguiente, su actividad catalítica. Adicionalmente, catalizadores sintetizados a menor temperatura, presentan más vacancias de oxígeno, por lo que es más probable que se encuentren más átomos de rutenio en un estado de oxidación Ru^{3+} , es decir, en niveles de oxidación inferiores. Esta condición favorece

los fenómenos de absorción y desorción de la OER y evita la sobre oxidación del Ru^{4+} , la disolución y/o pérdida de la capa catalítica.

En la Figura 14 se muestra un esquema del método PPM, particularmente para la formación de óxidos de rutenio a partir de sales de cloruro de rutenio. Las etapas principales del método son:

- 1) Disociación del cloruro de rutenio.
- 2) Desprotonación y complejación del ácido cítrico.
- 3) Polimerización con el etilenglicol (o dietilenglicol).
- 4) Calcinación.

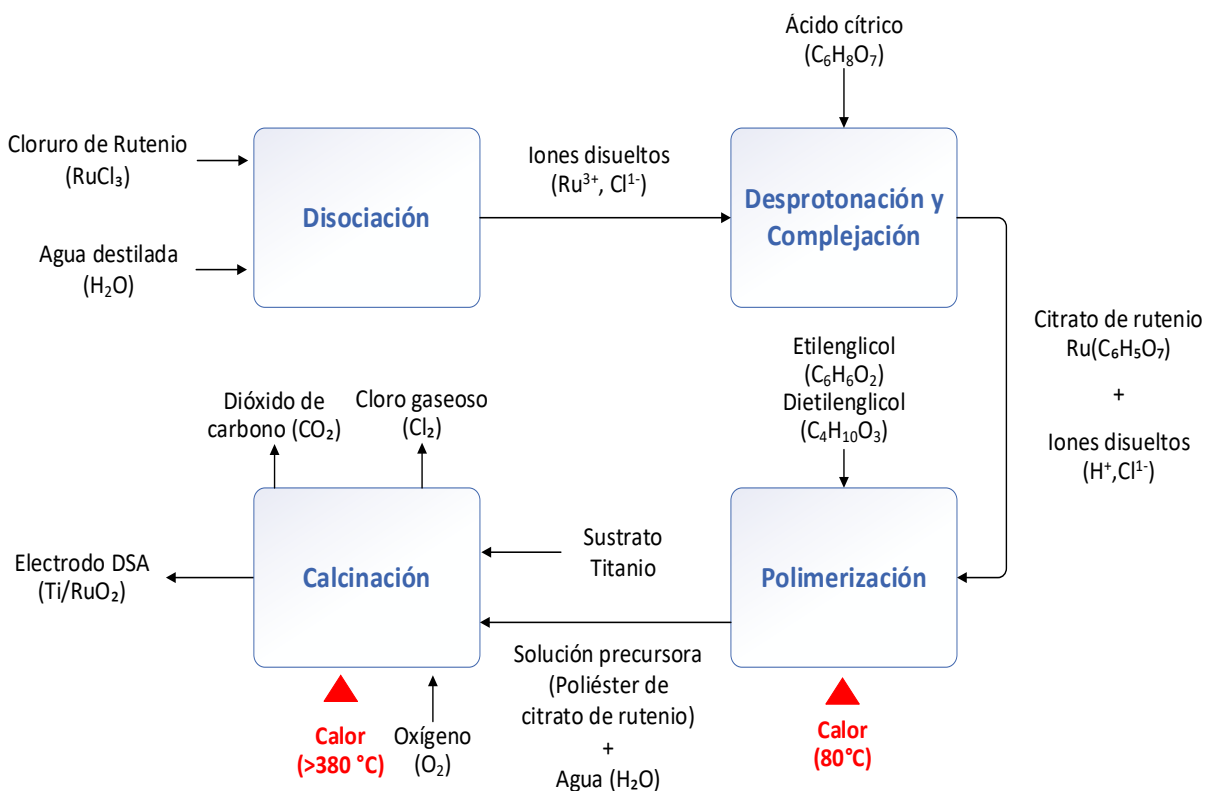


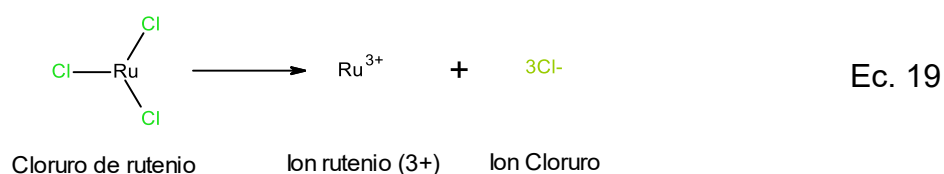
Figura 14. Procedimiento del método de síntesis PPM.

Fuente: Elaboración propia.

Las reacciones químicas que ocurren en cada una de las etapas se explican a continuación:

1) Disociación

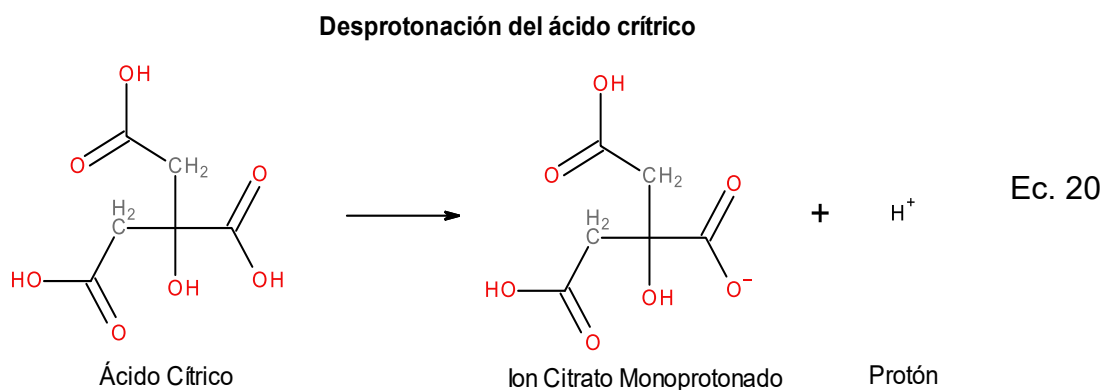
Cuando el cloruro de rutenio (RuCl_3) es disuelto en agua, se disocia en el ion rutenio III (Ru^{3+}) y en el ion cloruro (Cl^-) como se muestra en la ecuación Ec. 19.



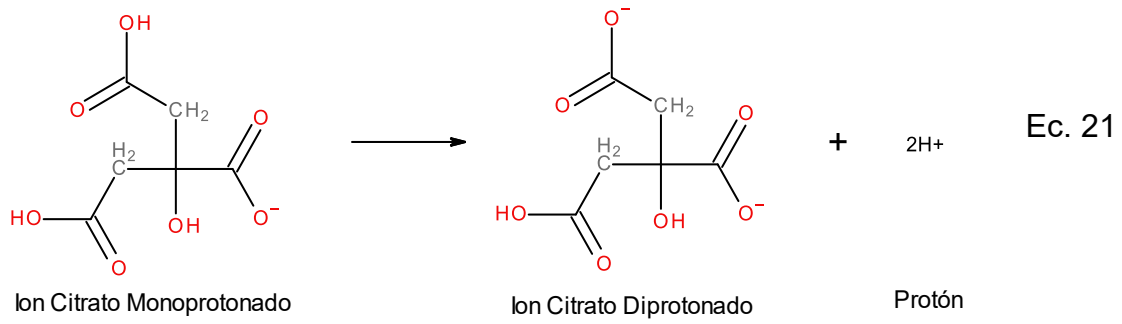
2) Complejación

Posteriormente se adiciona ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$), donde ocurren dos fenómenos: el primero corresponde a la desprotonación del ácido cítrico para obtener el Ion Citrato (Ec. 20, Ec. 21 y Ec. 22), y el segundo corresponde a la complejación del rutenio mediante enlaces coordinados para obtener el citrato de rutenio (Ec. 23).

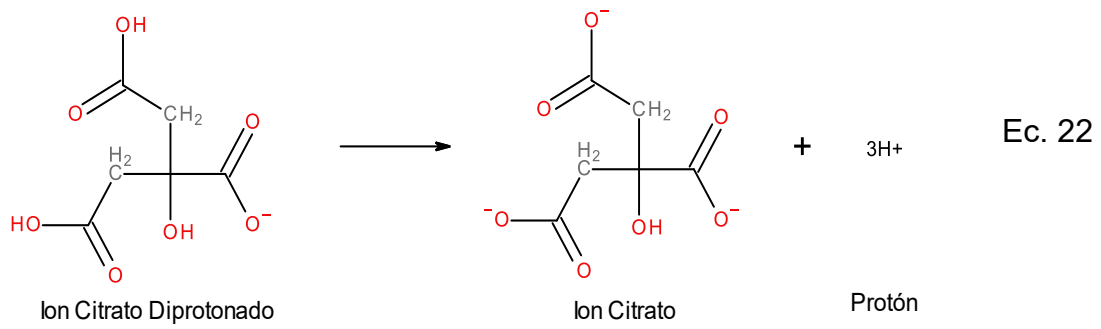
a) Desprotonación del ácido cítrico



Desprotonación del Ion citrato monoprotonado

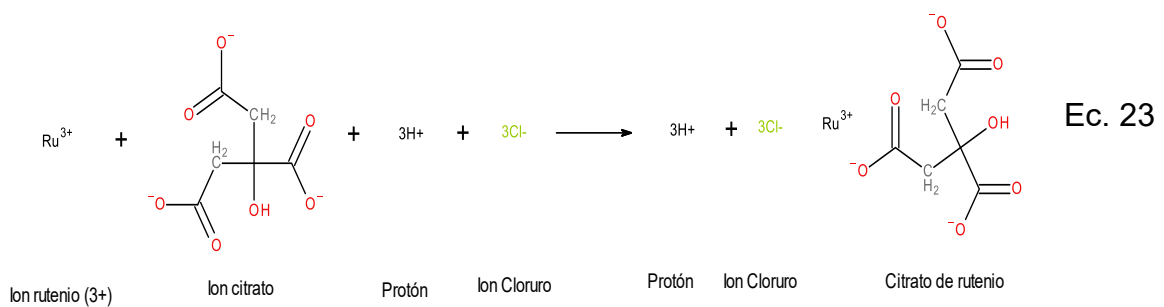


Desprotonación del Ion citrato diprotonado



b) Complejación del citrato de rutenio

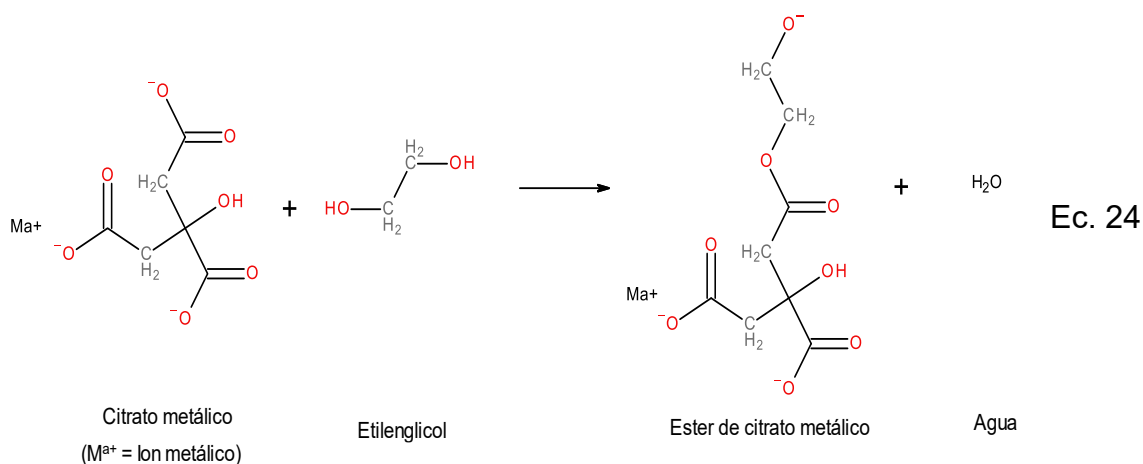
Formación del citrato de rutenio



La complejación del citrato de rutenio se lleva a cabo a temperatura ambiente y en medio acuoso, lo que propicia que los iones cloruro (Cl^-) permanezcan disociados y no formen otros productos con los protones (H^+) libres en la solución, como por ejemplo el ácido clorhídrico (HCl).

3) Polimerización

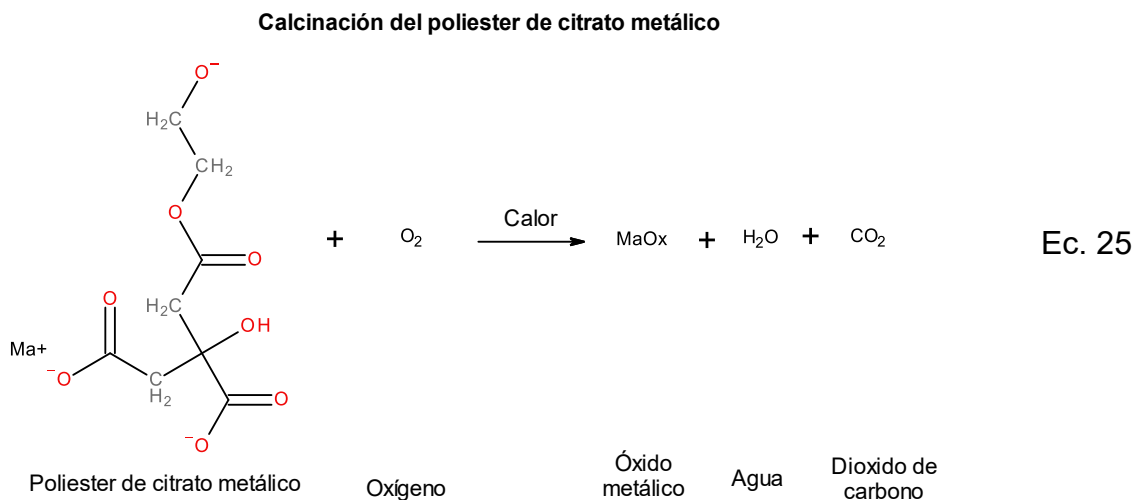
En la etapa de la polimerización, se lleva a cabo la reacción de esterificación donde el citrato de rutenio reacciona con el etilenglicol ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$) o dietilenglicol ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_3$) para formar ésteres de citrato de rutenio y agua a una temperatura de $80\text{ }^\circ\text{C}$ (Ec. 24). La reacción de esterificación crea redes tridimensionales de ésteres de citrato de rutenio donde el rutenio se comporta como un nodo.



En la etapa de polimerización, los iones cloruro (Cl^-) permanecerán estables y en equilibrio en su estado iónico en la solución a $80\text{ }^\circ\text{C}$, por lo tanto, los iones cloruro son considerados contaminantes de la solución precursora y se podrán observar picos pequeños en los difractogramas de rayos X (técnica DRX) (Santos *et al.*, 2014).

4) Calcinación

En la calcinación se llevan a cabo dos procesos principales: el primero, corresponde a la degradación de poliéster para formar agua y dióxido de carbono (CO₂), y el segundo, corresponde a la oxidación del ion Ru³⁺ para formar óxidos de rutenio (RuO₂). Un esquema general de la reacción que ocurre en la calcinación se presenta en la Ec. 25.



1.8 Sistemas de energía alimentados con hidrógeno

En los últimos años, se han implementado diferentes tecnologías para la obtención de energía a partir de hidrógeno. Su alta energía específica, lo hacen un vector energético ideal en aplicaciones de movilidad, calefacción y generación de energía eléctrica (Parra *et al.*, 2019; Yue *et al.*, 2021). No obstante, su desempeño y durabilidad están altamente relacionados con la calidad y la pureza del hidrógeno (Bacquart *et al.*, 2024).

En el sector de transporte terrestre, se han desarrollado diferentes tecnologías basadas en celdas de combustible (fuel cells, por sus siglas en inglés) que transforman la energía química del hidrógeno en energía eléctrica (Murugaiah &

Shahgaldi, 2024). Para el año 2022, fueron fabricados un total de 72,100 vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV, Fuel Cell Electric Vehicles), y construidas un total de 1,020 estaciones de servicio de hidrógeno en el mundo (International Energy Agency - IEA, 2023). Particularmente, la empresa Toyota ha incursionado en los FCEV con su modelo Toyota Mirai de segunda generación, alcanzando un rendimiento de hasta 402 millas conducidas con un tanque de hidrógeno de 5.6 kg de hidrógeno comprimido a una presión de 700 bar (Toyota Motor Corporation, 2024). Sin embargo, su desempeño y durabilidad están altamente relacionados con la pureza del hidrógeno (Bacquart *et al.*, 2024).

En noviembre del año 2024, el proyecto FCH2RAIL completó con éxito las pruebas del primer tren de hidrógeno en España. Es un proyecto que combina las celdas de combustible de hidrógeno, baterías y tanques de almacenamiento conocido como "Fuel Cell Hybrid PowerPack". Es un proyecto enfocado en aquellos tramos de rieles que no están electrificados y suelen usar diésel como combustible (FCH2RAIL, 2024). Aunque es una tecnología que pretende escalarse a países como Portugal, aún cuenta con algunos desafíos relacionados con el tiempo de carga de hidrógeno. Uno de ellos está relacionado con el aumento de la temperatura en el proceso de reabastecimiento del hidrógeno debido a la compresión del gas, el cual no debe exceder los 85 °C por seguridad. De igual forma, se ha encontrado que la temperatura ambiente afecta considerablemente el tiempo de carga, aumentándolo hasta tres veces más cuando se alcanzan temperaturas de hasta 30 °C (Wieser *et al.*, 2024).

También se han implementado sistemas de propulsión eléctrica alimentados con hidrógeno para el transporte aéreo. La aviación aporta el 2.5 % de emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) y ha contribuido en un 4.0 % al calentamiento global (Our World in Data, 2024). Para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas de emisiones de CO₂ para el año 2050 (Hoelzen *et al.*, 2025), en la actualidad, existen varias empresas que trabajan en la creación de sistemas integrados de energía alimentados con hidrógeno para aeronaves. La empresa Airbus con su sede principal en Francia, lidera el proyecto ZeroE para desarrollar aviones a gran escala

para el 2035. Su enfoque se basa tanto en la combustión del hidrógeno, usando turbinas de combustión con inyectores modificados, como también en las celdas de combustible de hidrógeno, acoplados a motores eléctricos de propulsión (Airbus, 2024). La empresa ZeroAvia de Reino Unido, ha desarrollado varios modelos de aeronaves utilizando un sistema de propulsión hidrógeno-eléctrico con celdas de combustión de hidrógeno (ZeroAvia, 2024a). El modelo ZA600, cuenta con una capacidad de entre 10 y 20 pasajeros para rutas regionales o remotas, y el modelo ZA2000, tiene una capacidad de entre 40 y 80 pasajeros y está destinado para rutas de mayor alcance (ZeroAvia, 2024b).

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO ELECTROQUÍMICO

2.1 Ecuación de Nernst

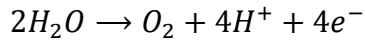
Es un modelo matemático que describe el potencial de equilibrio de un electrodo en función de las condiciones en las que es utilizado en un sistema electroquímico (Godula-Jopek, 2015). Describe la variación de su potencial bajo cambios en la concentración de los iones involucrados, el pH y la temperatura del medio en que se desarrolla una reacción de oxido-reducción (Ec. 26).

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln(Q) \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

- E = Potencial del electrodo en condiciones no estándar (V).
- E° = Potencial estándar del electrodo medido a condiciones estándar, 1 M, 1 atm, 25°C (V).
- R = Constante de los gases ideales (8.314 J mol⁻¹ K⁻¹).
- T = Temperatura (K).
- n = Número de electrones transferidos en la reacción reducción-oxidación.
- F = Constante de Faraday (96,485.33 C mol⁻¹).
- Q = Cociente de reacción, entre las concentraciones (o actividades) de los productos y los reactivos elevados a sus respectivos coeficientes estequiométricos.

La ecuación de Nernst se utiliza para hallar el potencial en equilibrio (E_{eq}) del electrocatalizador anódico en la OER (Ec. 27), el cual varía con el pH de la solución y la concentración de oxígeno producido. Su potencial estándar de oxidación es de -1.23 V/SHE, lo que indica que la reacción es no espontánea y requiere de un suministro de energía para proceder.



$$E^\circ = -1.23 \text{ V / SHE}$$

Ec. 27

La determinación del potencial en equilibrio (E_{eq}) es fundamental para el cálculo del sobrepotencial (η), ya que permite cuantificar el potencial extra necesario para que el electrodo transfiera electrones en la interfaz electrodo-electrolito y promueva la OER (Jesus Alberto Cruz Flores, 2024). El sobrepotencial se calcula a través de la diferencia entre el potencial experimental (E) y el potencial en equilibrio (E_{eq}) como se observa en la Ec. 28.

$$\eta = E - E_{eq}$$

Ec. 28

Si el sobrepotencial es bajo, indica que el potencial experimental (E) es cercano al potencial en equilibrio (E_{eq}) y el proceso es más eficiente.

2.2 Ecuación de Butler-Volmer

Es un modelo matemático que describe la cinética de la transferencia de carga, en donde se relacionan tanto la densidad de corriente (j) como el sobrepotencial (η) en una reacción electroquímica (Bessarabov & Millet, 2018). El modelo se muestra en la Ec. 29.

$$j = j_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_a n F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1 - \alpha_a) n F \eta}{RT}\right) \right]$$

Ec. 29

Donde:

- j = Densidad de corriente ($A \text{ m}^{-2}$).
- j_0 = Densidad de corriente de intercambio ($A \text{ m}^{-2}$).

- α_a = Coeficiente de transferencia de carga anódico (Adimensional).
- ($\alpha_c = 1 - \alpha_a$) = Coeficiente de transferencia de carga catódico (Adimensional).
- n = Electrones transferidos paso determinante ($n=1$).
- F = Constante de Faraday ($96,485.33 \text{ C mol}^{-1}$).
- η = Sobrepotencial (V).
- R = Constante de los gases ideales ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).
- T = Temperatura (K)

La ecuación de Butler-Volmer, describe tanto con la contribución anódica como la catódica, como se muestra en la Ec. 30.

$$j = j_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_a n F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha_a) n F \eta}{RT}\right) \right] \quad \text{Ec. 30}$$

Verde = Anódica Azul = Catódica

La evaluación de catalizadores anódicos para la OER ocurre a potenciales altos (E). Esto quiere decir que el sobrepotencial (η) es positivo ($\eta > 0 \text{ V}$), y donde solo predomina la contribución anódica (Ec. 31).

$$j = j_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_a n F \eta}{RT}\right) \right] \quad \text{Ec. 31}$$

2.3 Pendiente de Tafel

Es un modelo matemático que deriva de la ecuación de Butler-Volmer, cuando es aplicada a sobrepotenciales altos (η) (Bard & Faulkner, 2001). El modelo matemático se obtiene después de linealizar la Ec. 31, obtenido una ecuación del sobrepotencial en función de la densidad de corriente. Tafel obtuvo esta relación de manera empírica expresada en la Ec. 32.

$$\eta = a + b \log(j)$$

Ec. 32

Donde:

- η = Sobrepotencial (V).
- j = Densidad de corriente ($A\ cm^{-2}$).
- b = Pendiente de Tafel ($V\ dec^{-1}$).
- a = Ordenada al origen.

La ecuación de Butler-Volmer (Ec. 29) expresada en términos de la Ec. 32, se muestra en la Ec. 33.

$$\eta = \frac{2.303 R T}{\alpha_a n F} \log(j_0) + \frac{2.303 R T}{\alpha_a n F} \log(j)$$

Ec. 33

Donde:

- j = Densidad de corriente ($A\ m^{-2}$).
- j_0 = Densidad de corriente de intercambio ($A\ m^{-2}$).
- α_a = Coeficiente de transferencia de carga anódico (Adimensional).
- n = Electrones transferidos paso determinante ($n=1$).
- F = Constante de Faraday ($96,485.33\ C\ mol^{-1}$).
- η = Sobrepotencial (V).
- R = Constante de los gases ideales ($8.314\ J\ mol^{-1}\ K^{-1}$).
- T = Temperatura (K).

La determinación de la pendiente de Tafel se calcula usando el segundo término de la Ec. 33, y apoyándose de un gráfico que se obtiene de la Voltamperometría de

Barrido Lineal (LSV) (J. Hou & Yang, 2025), lo que resultaría específicamente en la Ec. 34.

$$b = \frac{2.303 R T}{\alpha_A n F} \quad \text{Ec. 34}$$

2.4 Leyes de Faraday

Se conocen como la primera y la segunda ley de Faraday, a la relación que existe entre la cantidad de electricidad que es utilizada a través de una celda electrolítica y la cantidad de sustancia que se consume o se produce en los electrodos.

2.4.1 Primera ley de Faraday

“La masa en gramos de una sustancia depositada o generada en la electrólisis, es directamente proporcional a la intensidad de corriente consumida y al tiempo que dura la electrólisis” (Ec. 35) (Burbano de Ercilla, 2003).

$$m = E I t = E Q \quad \text{Ec. 35}$$

Donde:

- m = Masa de la sustancia producida (g).
- E = Equivalente electroquímico (Eq-(g)).
- I = Intensidad de corriente (A).
- t = Tiempo de la electrólisis (s).
- Q = Carga eléctrica, $Q = I \cdot t$ (C).

El equivalente electroquímico (E), es igual a la masa en gramos de un mol de sustancia depositada o producida (peso atómico o molecular, M) sobre el cambio en el número de oxidación o moles de electrones transferidos (n) (Ec. 36).

$$E = \frac{M}{n} \quad \text{Ec. 36}$$

2.4.2 Segunda ley de Faraday

“La masa en gramos de una sustancia depositada o producida en la electrólisis, es directamente proporcional a su equivalente químico” (Burbano de Ercilla, 2003). En resumen, al relacionar la primera y la segunda ley de Faraday se obtiene la Ec. 37.

$$m = \frac{I t M}{n F} \quad \text{Ec. 37}$$

Donde:

- m = Masa de la sustancia producida (g).
- I = Intensidad de corriente (A).
- t = Tiempo de la electrólisis (s).
- M = Masa atómica o molecular de la sustancia producida (g mol⁻¹).
- n = Cambio en el número de oxidación o número de moles de electrones transferidos en la reacción.
- F = Constante de Faraday (96,485.33 C mol⁻¹).

Para el caso específico de la OER, la masa molecular (M) de la sustancia producida es de 32.0 g mol⁻¹ de oxígeno (O₂) y el número de moles de electrones transferidos (n) es igual a 4.

2.5 Ecuación de Randles - Sevcik

Es utilizada en la técnica electroquímica Voltamperometría Cíclica (CV) para evaluar procesos gobernados por difusión. Esta expresión relaciona la corriente pico (i_p) con la velocidad de barrido (ν), y permite estimar parámetros electroquímicos clave como por ejemplo, el coeficiente de difusión (D) y el área superficial electrocatalítica activa (A o ECSA). En la Ec. 38 se muestra la expresión matemática que permite estimar dichos parámetros electroquímicos utilizando datos experimentales obtenidos en la CV (Bard & Faulkner, 2001).

$$i_p = (2.69 \times 10^5) n^{\frac{3}{2}} A D^{\frac{1}{2}} C \nu^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

- i_p = Corriente pico (A).
- n = Número de electrones transferidos.
- A = Área superficial electrocatalítica activa (cm^2).
- D = Coeficiente de difusión del analito ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$).
- C = Concentración del analito en solución (mol cm^{-3}).
- ν = Velocidad de barrido (V s^{-1}).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Descripción de la metodología

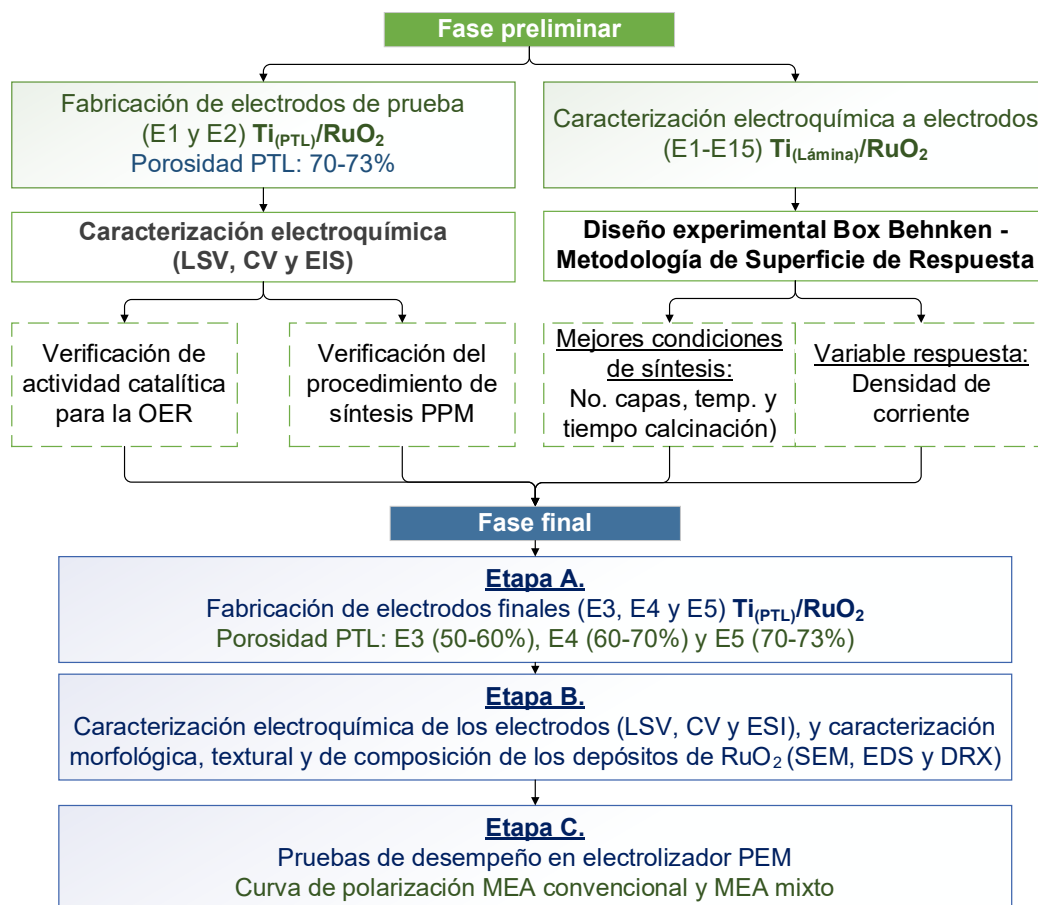


Figura 15. Diagrama general de la metodología experimental.

En la Figura 15 se observa el diagrama general del proyecto de investigación, el cual está compuesto por una fase preliminar y una fase final. En la fase preliminar, se fabricaron los electrodos de prueba E1 y E2 ($Ti_{(PTL)}/RuO_2$) utilizando como sustrato la capa de transporte porosa (PTL) de porosidad 70-73 %, los cuales fueron evaluados mediante pruebas electroquímicas con el objetivo de confirmar su actividad catalítica hacia la OER y evaluar la eficacia del procedimiento de síntesis del método PPM sobre el fieltro de titanio (PTL). De igual forma, en esta fase se realizaron pruebas electroquímicas hacia la OER a quince electrodos de $Ti_{(Lámina)}/RuO_2$, los cuales fueron fabricados bajo el mismo método de síntesis PPM

en trabajos previos del grupo de investigación, con el fin de realizar un diseño de experimentos Box-Behnken a través de la metodología de superficie de respuesta y determinar las mejores condiciones de síntesis de electrocatalizadores de RuO₂ a través del método PPM empleados en la OER. El diseño de experimentos se realizó tomando tres factores como variables de entrada, el número de capas, la temperatura y el tiempo de calcinación, y como variable de respuesta la densidad de corriente a un potencial determinado. Posteriormente, la fase final, se dividió en tres etapas: la etapa A, corresponde a la fabricación de los electrodos finales E3, E4 y E5 (Ti_(PTL)/RuO₂) utilizando las mejores condiciones de síntesis encontradas en la fase preliminar, la etapa B, se enfocó en la caracterización electroquímica de los electrodos mediante técnicas como LSV, CV y EIS, y en la caracterización de morfología, textura y composición mediante técnicas analíticas como SEM, EDS y DRX. Finalmente, la etapa C, se enfocó en la evaluación de los electrodos anódicos de RuO₂ sintetizados sobre la PTL, integrándolos en un ensamble membrana-electrodos (MEA) mixto en un electrolizador de prueba tipo PEM con un área geométrica de 5 cm² mediante curvas de polarización.

a) Procedimiento para la preparación de la solución precursora

El procedimiento para la preparación de la solución precursora es el mismo tanto en la fase preliminar como en la fase final, por lo tanto, en esta sección se explicará el procedimiento utilizado de forma general. Los reactivos utilizados se relacionan en la Tabla 7 y la función específica de cada uno de los reactivos utilizados se muestra a continuación.

- **Precursor metálico:** Cloruro de rutenio (RuCl₃) que aporta los iones Ru³⁺.
- **Agente quelante:** Ácido cítrico monohidratado (C₆H₈O₇·H₂O).
- **Solvente:** Monoetilenglicol (C₂H₆O₂) utilizado como solvente en la fase preliminar, y dietilenglicol (C₄H₁₀O₃) utilizado en la fase final.

Tabla 7. Reactivos utilizados para la preparación de la solución precursora.

Reactivo	Función	Formula molecular	Peso molecular (g mol ⁻¹)	Pureza (%)	Viscosidad (mPa.s) @ 25 °C	No. CAS	Fabricante
Cloruro de rutenio hidratado	Aporta los iones Ru ³⁺	RuCl ₃ .xH ₂ O	207.43	99.98	99.98	14898-67-0	SIGMA ALDRICH
Ácido Cítrico Monohidratado	Agente quelante	C ₆ H ₈ O ₇ .H ₂ O	210.14	95-100	95-100	5949-29-1	MEYER
Etilenglicol	Solvente	C ₂ H ₆ O ₂	62.07	95-100	12.9	107-21-1	MEYER
Dietilenglicol	Solvente	C ₄ H ₁₀ O ₃	106.22	95-100	29.3	111-46-6	MEYER

Inicialmente el RuCl₃ fue disuelto en 50 mL de agua destilada para disociar los iones Ru³⁺ y Cl⁻¹ de la sal metálica. Posteriormente la solución de RuCl₃ es mezclada con el C₆H₈O₇.H₂O y el C₂H₆O₂ (o C₄H₁₀O₃) a una temperatura de 80 °C, asegurando entre ellos una relación molar de 0.0296:0.12:16 entre el RuCl₃, el C₆H₈O₇.H₂O y el C₂H₆O₂ (o C₄H₁₀O₃) respectivamente (Yañez-Rios, 2020). Posteriormente la solución es agitada constantemente por un tiempo adicional de 30 minutos, para asegurar la formación del poliéster de citrato de rutenio (Figura 16). El ácido cítrico actúa como agente quelante, para capturar el ion Ru³⁺ mediante enlaces coordinados, y el etilenglicol (o dietilenglicol) actúa como solvente para dispersar y homogenizar el ion Ru³⁺ en la solución precursora polimérica.

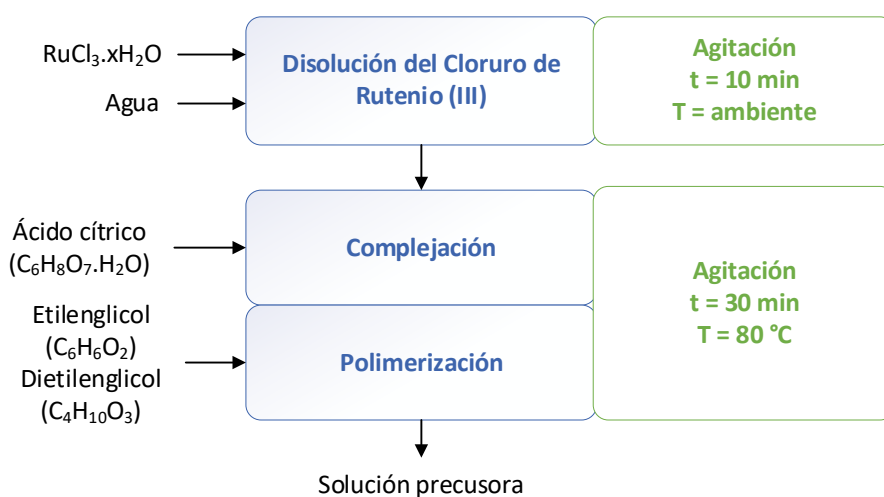


Figura 16. Preparación de la solución precursora.

La solución precursora tiene apariencia oscura y se muestra en la Figura 17.

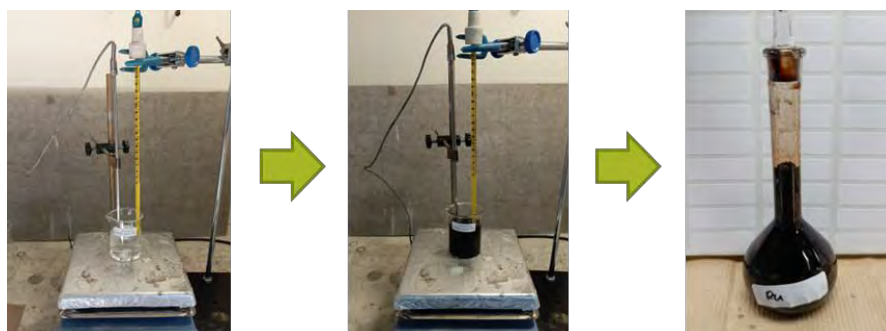


Figura 17. Registro fotográfico de la apariencia de la solución precursora.

b) Procedimiento para la fabricación de los electrodos utilizando método de síntesis PPM

La fabricación de los electrodos con electrocatalizadores de RuO_2 tanto en la fase preliminar como en la fase final, se realizó mediante el método PPM. Como sustrato se empleó un fieltro de titanio de alta pureza compuesto por fibras entrecruzadas, también conocido como capa de transporte porosa (PTL), con un área geométrica de 5 cm^2 (Figura 18) y de distintas porosidades (baja: 50-60 %, media: 60-70 % y alta: 70-73 %).

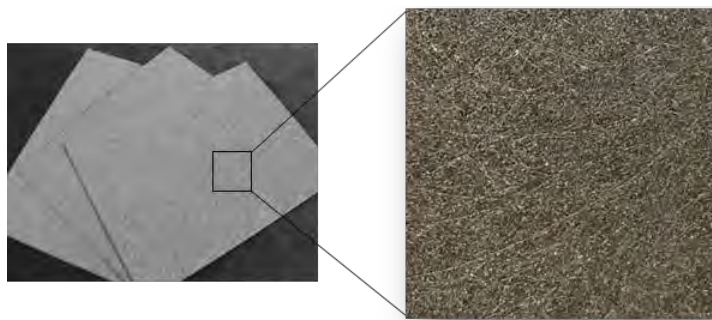


Figura 18. Sustrato tipo fieltro de titanio (PTL).

En la en Figura 19 se muestra el procedimiento del método de síntesis PPM utilizado en el laboratorio.

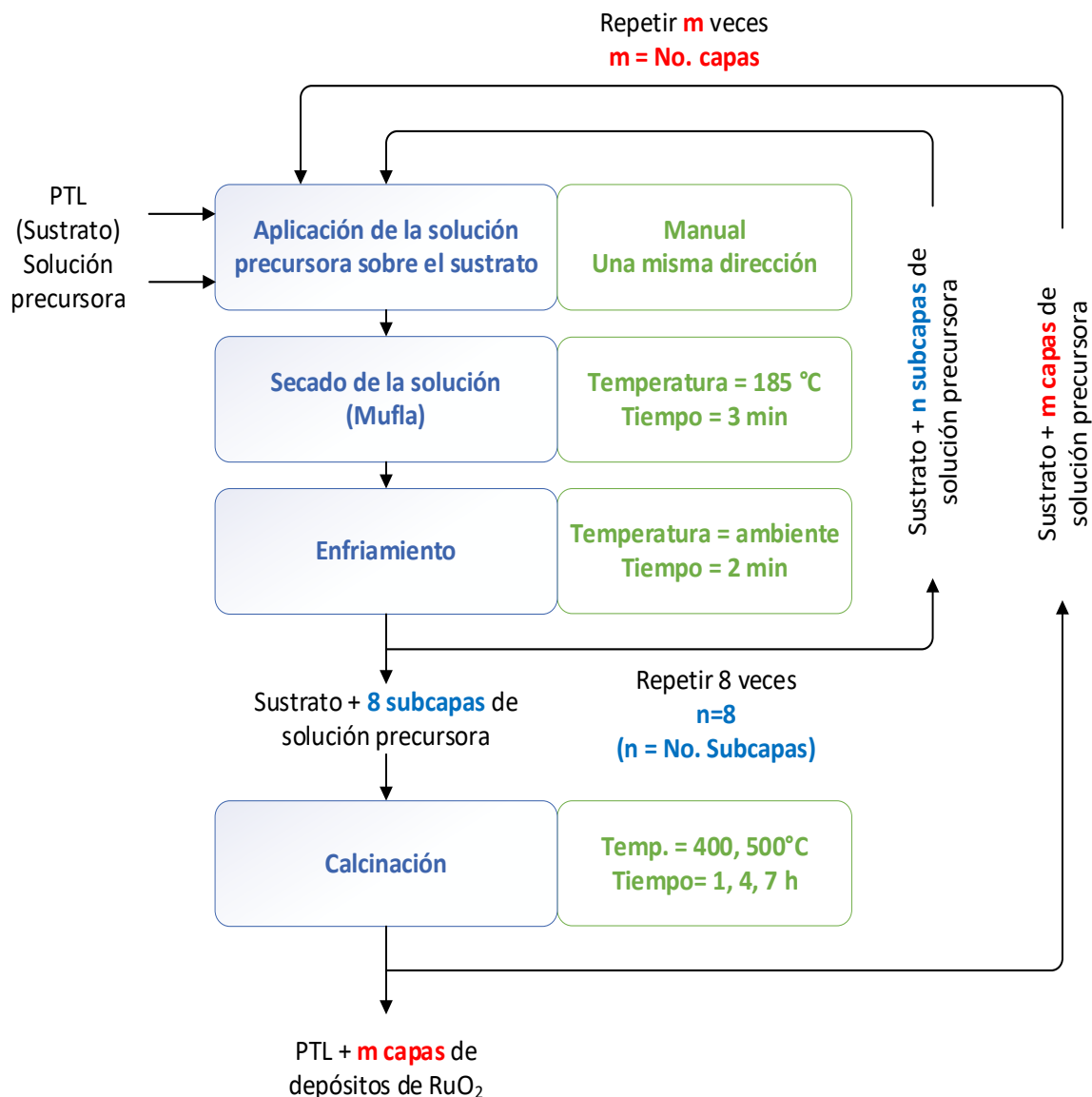


Figura 19. Procedimiento del método de síntesis PPM.

Inicialmente la solución precursora se agitó a 400 rpm y 25 °C para asegurar una buena dispersión de los iones Ru³⁺ en la matriz polimérica. Posteriormente se aplicó de forma manual sobre la PTL (sustrato) utilizando una brocha de pelo de camello.

Este proceso se realizó con movimientos en una sola dirección, para asegurar homogeneidad en la aplicación. Posteriormente, la PTL es ubicado en una mufla a una temperatura de 185 °C por un tiempo de 3 minutos con el fin de evaporar tanto el agua como el exceso de etilenglicol (o dietilenglicol) de la solución, y luego se deja en reposo a temperatura ambiente por un tiempo de 2 minutos. Finalizada esta parte del procedimiento, la PTL tendría aplicada 1 sola subcapa no calcinada de la solución precursora. Ese mismo procedimiento se repitió por 8 veces más para completar un total de 8 subcapas ($m = 8$) de solución precursora no calcinada sobre el sustrato, que equivalen a 1 capa de solución precursora ($n = 1$). Posteriormente la PTL es sometido a un proceso de calcinación para degradar térmicamente la solución precursora en una mufla a las temperaturas y tiempos de calcinación deseados. En este proceso se transforman los iones Ru^{3+} en depósitos de RuO_2 sobre las fibras entrecruzadas de la PTL. En este punto, la PTL tendría 1 sola capa de depósitos de óxidos de rutenio. El proceso anterior se repitió un total de n veces, de acuerdo con el número de capas requerido para cada electrodo. Un esquema del electrodo después de la síntesis se puede apreciar en la Figura 20.

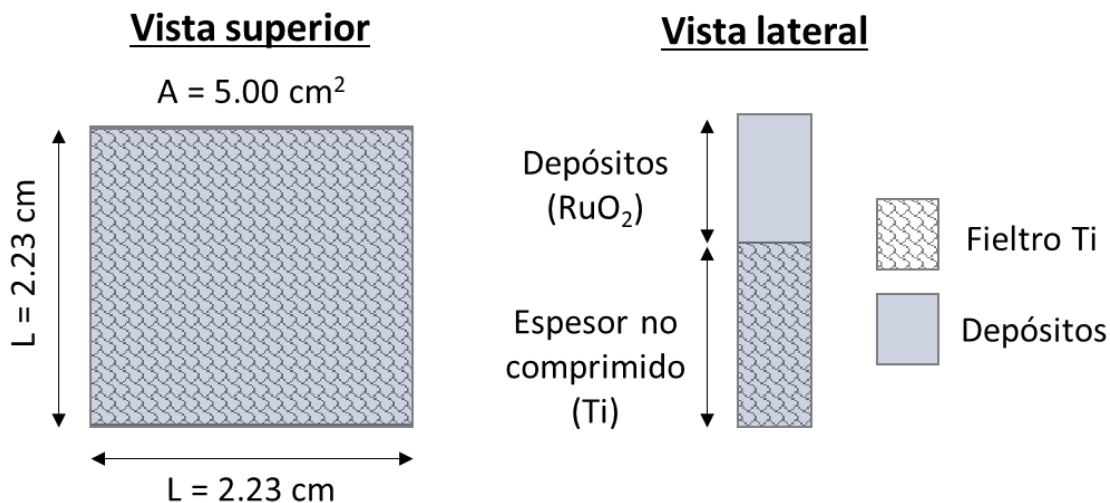


Figura 20. Representación del electrodo anódico $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$

c) Pruebas electroquímicas

Los electrodos con electrocatalizador base Ru, tanto de la fase preliminar como de la de final, fueron evaluados mediante las siguientes pruebas electroquímicas: Voltamperometría de Barrido Lineal (LSV), Voltamperometría Cíclica (CV) y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS). Un esquema de las pruebas electroquímicas aplicadas junto con su objetivo se muestra en la Figura 21.

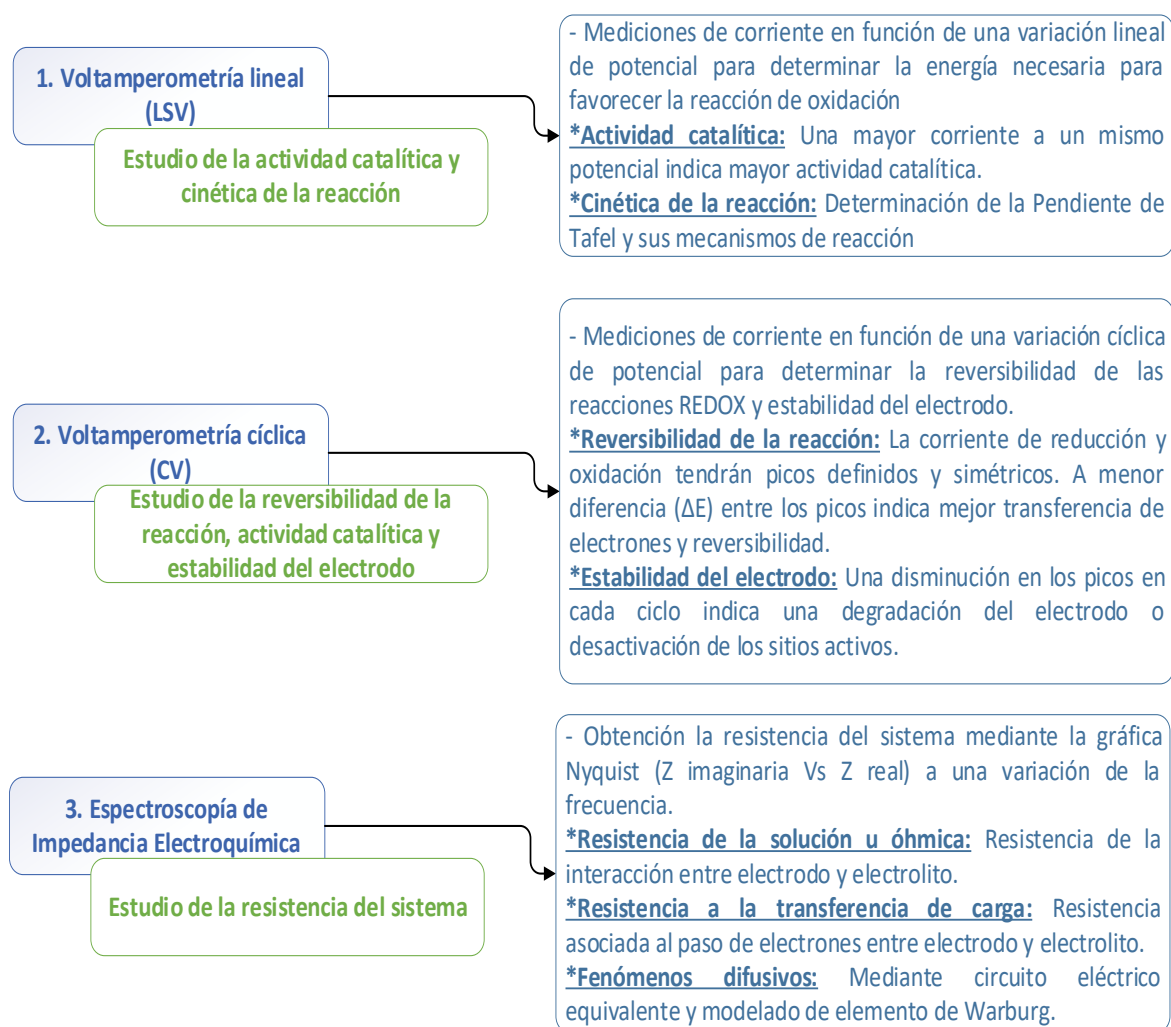


Figura 21. Técnicas de caracterización electroquímica.

El equipo utilizado para las pruebas electroquímicas fue un potenciostato-galvanostato de 4 canales, de referencia VMP2 Multichannel Potentiostat de la marca Biologic (Figura 22). Se utilizó un electrodo de referencia de Ag/AgCl (3 M NaCl) con un potencial estándar de +0.209 V/SHE, un contraelectrodo de malla de Ti/Pt y una solución electrolítica de 0.5 M H₂SO₄.

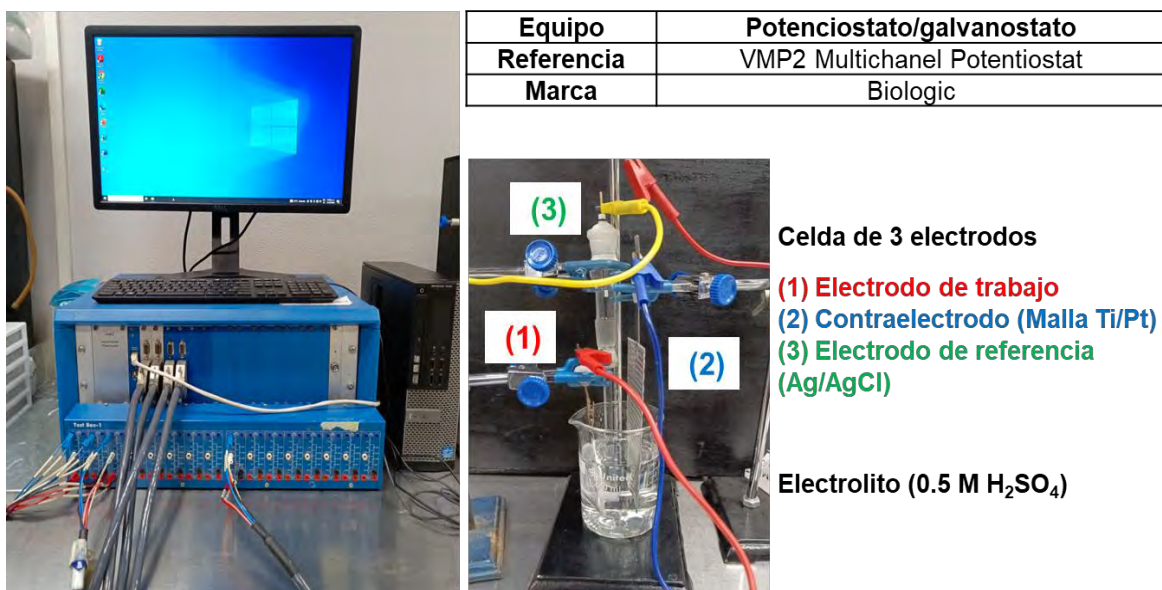


Figura 22. Equipo potenciostato-galvanostato CMP+L.

3.2 Fase preliminar

3.2.1 Fabricación de los electrodos de prueba Ti_(PTL)/RuO₂

Fueron fabricados dos electrodos de prueba (E1 y E2) utilizando monoetilenglicol como solvente, bajo las siguientes condiciones que se muestran en la Tabla 8. El primero fue denominado como E1 y se sintetizó con un total de 8 capas, a 400 °C y 1 hora de calcinación. El segundo fue denominado como E2 y se sintetizó con un

total de 8 capas, a 500 °C y 4 horas de calcinación. Ambos electrodos fueron sintetizados usando una PTL con una porosidad de 70-73 %.

Tabla 8. Condiciones de síntesis de los electrodos de prueba (E1 y E2)

Electrodo	Porosidad (%)	Número de capas	Temperatura de calcinación (°C)	Tiempo de calcinación (h)
E1	70-73	8	400	1
E2	70-73	8	500	4

Para la realización de las pruebas electroquímicas, los electrodos fueron aislados en su cara opuesta con teflón (Figura 23), asegurando que una sola cara del electrodo, aquella en la que se depositaron los RuO₂, se colocara de manera frontal al electrodo de referencia. Además, esta práctica permitió conocer el área geométrica de evaluación del electrodo, para normalizar los resultados obtenidos en cada técnica de caracterización con respecto al área en unidades de cm².

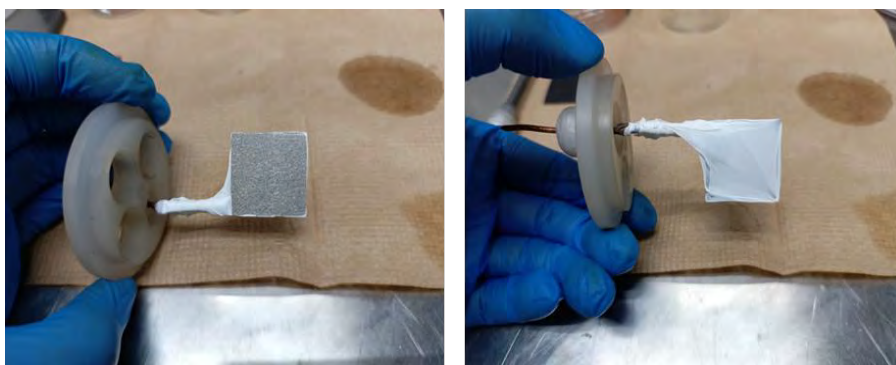


Figura 23. Preparación de los electrodos para las pruebas electroquímicas en la celda de tres electrodos.

Las pruebas electroquímicas fueron realizadas bajo las siguientes condiciones:

- a) **LSV**: Un potencial máximo de 1.4 V/Ag/AgCl y una velocidad de barrido de 1 mV s⁻¹.
- b) **CV**: Un rango de potencial desde -0.3 V/Ag/AgCl a 1.4 V/Ag/AgCl, una velocidad de barrido de 10 mV s⁻¹ y 10 ciclos.
- c) **EIS**: Un potencial constante de 1.2 V/Ag/AgCl (1.409 V/SHE) al inicio de la OER, y un potencial constante de 1.3 V/Ag/AgCl (1.509 V/SHE) en la región de la OER, y un rango de frecuencia de 1 MHz a 0.01 Hz. Los potenciales fueron seleccionados con base en las curvas de LSV, correspondiendo a valores previos al potencial de inicio de la corriente farádica, es decir, al potencial en el que se inicia la reacción de evolución de oxígeno (OER).

3.2.2 Caracterización electroquímica a los electrodos de Ti_(Lámina)/RuO₂

Los electrodos de Ti_(Lámina)/RuO₂ evaluados en esta parte del proyecto, fueron fabricados previamente en un trabajo de investigación del grupo de investigación, mediante el método PPM (Figura 24) (Castro Navarro, 2023). Los electrodos fueron sintetizados a diferentes condiciones de número de capas, temperatura y tiempo de calcinación, las cuales se muestran en la Tabla 9.

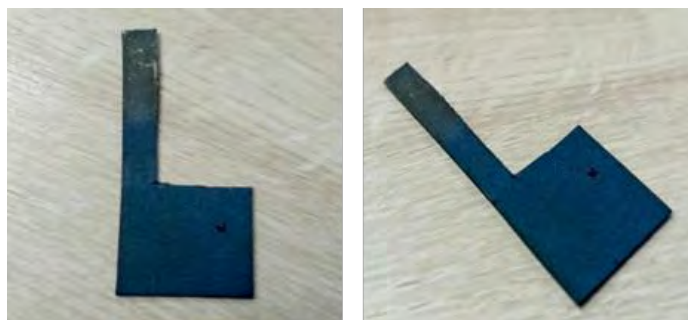


Figura 24. Electrodos de RuO₂ depositados sobre láminas de titanio Ti_(Lámina)/RuO₂.

Tabla 9. Condiciones de síntesis de los electrodos Ti_(Lámina)/RuO₂.

Electrodo	Número de capas	Temperatura de calcinación (°C)	Tiempo de calcinación (h)
1	4	500	1
2	12	500	1
3	8	400	1
4	8	600	1
5	8	500	4
6	8	500	4
7	8	500	4
8	4	400	4
9	12	400	4
10	4	600	4
11	12	600	4
12	4	500	7
13	12	500	7
14	8	400	7
15	8	600	7

Tomada de: (Castro Navarro, 2023).

Las pruebas electroquímicas fueron realizadas bajo las siguientes condiciones:

- a) **LSV**: Un potencial máximo de 1.6 V/Ag/AgCl y una velocidad de barrido de 1 mV s⁻¹.
- b) **CV**: Un rango de potencial desde 0.0 V/Ag/AgCl a 0.8 V/Ag/AgCl, una velocidad de barrido de 10 mV s⁻¹ y 10 ciclos.

- c) **EIS:** Un potencial constante de 1.2 V/Ag/AgCl (1.409 V/SHE) al inicio de la OER, y un potencial constante de 1.3 V/Ag/AgCl (1.509 V/SHE) en la región de la OER. Todas las pruebas se realizaron en un rango de frecuencia de 1 MHz a 0.01 Hz. El potencial fue seleccionado con base en la prueba LSV, tomando como referencia el potencial de inicio de la OER (inicio en la aparición de la corriente farádica).

Con base en los datos obtenidos, se realizó un diseño experimental Box-Behnken a través de la metodología de superficie de respuesta, utilizando como variables de entrada el número de capas, el tiempo y la temperatura de calcinación, y como variable de salida la densidad de corriente. Posteriormente, se optimizó la variable de respuesta, para encontrar las mejores condiciones de síntesis que maximizaran la densidad de corriente a un potencial específico.

3.3 Fase final

3.3.1 Etapa A: Fabricación de los electrodos finales $Ti_{(PTL)}/RuO_2$

Los electrodos finales (E3, E4 y E5) fueron fabricados de acuerdo con las mejores condiciones de síntesis obtenidas en la fase preliminar (Tabla 10). En esta fase se utilizó dietilenglicol como solvente en el método PPM.

Tabla 10. Condiciones de síntesis de electrodos finales $Ti_{(PTL)}/RuO_2$.

Electrodo	Porosidad (%)	Número de capas	Temperatura de calcinación (°C)	Tiempo de calcinación (h)
E3	50-60	12	400	7
E4	60-70	12	400	7
E5	70-73	12	400	7

En esta etapa se fabricaron tres electrodos distintos variando las porosidades de la PTL, es decir, el electrodo E3 se fabricó utilizando una PTL con una porosidad de 50-60 %, el E4 utilizó una PTL con porosidad de 60-70 %, y finalmente el E5 utilizó una PTL con porosidad 70-73 %. Cabe resaltar, que el E5 se fabricó utilizando la misma PTL con la que se fabricaron los electrodos E1 y E2 en la fase preliminar (porosidad de 70-73 %). Además, cada uno de los electrodos fue fabricado por triplicado, con el fin de disponer de muestras destinadas tanto a las pruebas electroquímicas como a las pruebas de caracterización y de desempeño.

3.3.2 Etapa B: Caracterización electroquímica y caracterización morfológica, textural y de composición de los electrodos fabricados

a) Caracterización electroquímica

Las pruebas electroquímicas fueron realizadas bajo las condiciones que se muestran a continuación:

- **LSV:** Un potencial máximo de 1.4 V/Ag/AgCl y una velocidad de barrido de 1 mV s⁻¹.
- **CV:** Un rango de potencial desde -0.3 V/Ag/AgCl a 1.4 V/Ag/AgCl, una velocidad de barrido de 10 mV s⁻¹ y 10 ciclos.
- **EIS:** Un potencial constante de 1.2 V/Ag/AgCl (1.409 V/SHE) al inicio de la OER, y un potencial constante de 1.3 V/Ag/AgCl (1.509 V/SHE) en la región de la OER. Todas las pruebas se realizaron en un rango de frecuencia de 1 MHz a 0.01 Hz. Los potenciales fueron seleccionados con base en las curvas de LSV, correspondiendo a valores previos al potencial de inicio de la

corriente farádica, es decir, al potencial en el que se inicia la reacción de evolución de oxígeno (OER).

b) Caracterización morfológica, textural y de composición

Los electrodos fueron analizados mediante las técnicas analíticas como SEM, EDS y DRX. En la Figura 25 se relaciona el objetivo de cada técnica aplicada.

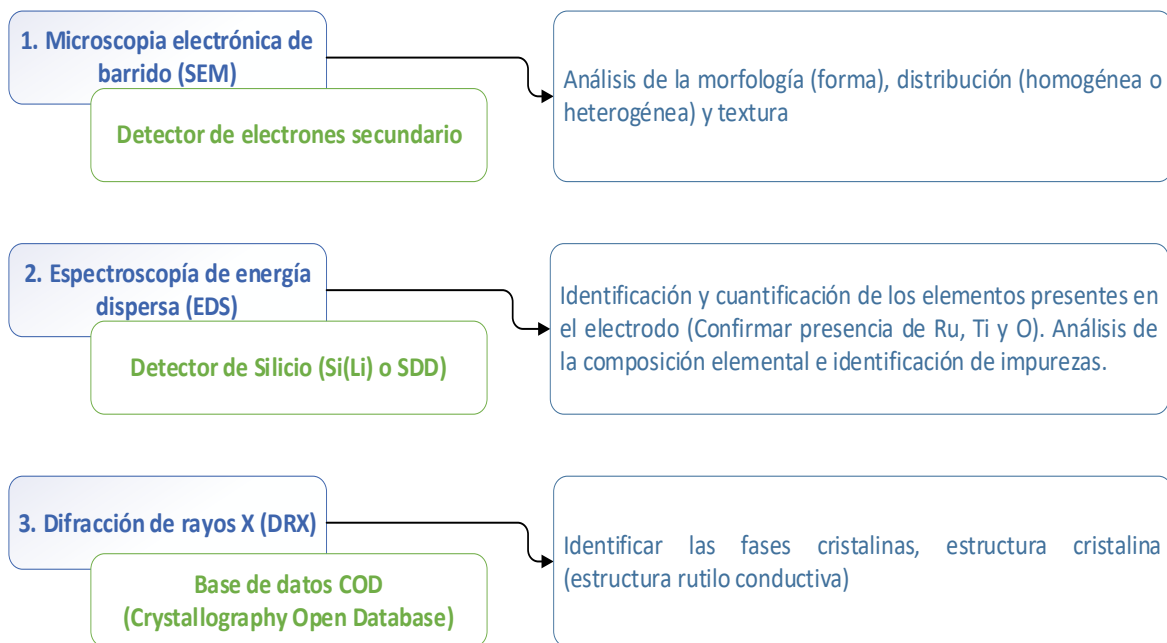


Figura 25. Técnicas de caracterización química.

La técnica analítica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) se realizó utilizando un microscopio CARLS ZEISS SUPRA 55-VP con un detector de electrones secundarios y una detector de Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS). Esta técnica permitió identificar la morfología de los depósitos de RuO₂ sobre la PTL, analizar su morfología, distribución y cuantificar la proporción de los elementos e impurezas en el depósito. Adicionalmente, los

electrocatalizadores también fueron analizados mediante Difracción de Rayos X (DRX) para identificar la presencia de cristales de RuO_2 , y sus respectivas fases y planos característicos. El equipo utilizó una radiación $k\alpha$ de 1.542 \AA a través un ánodo de cobre (Cu) en configuración Bragg-Bretano y un barrido de ángulos de dispersión 2θ entre 20 y 80 grados. El análisis de los difractogramas e identificación de las fases se realizó mediante el software Match! Versión 4 (Crystal Impact), utilizando la base de datos COD (Crystallography Open Database).

3.3.3 Etapa C: Pruebas de desempeño en el electrolizador PEM

En la etapa C del proyecto, se evaluaron los electrodos fabricados al integrarlos en un ensamble membrana-electrodos (MEA) mixto en un electrolizador de prueba tipo PEM con un área geométrica de 5 cm^2 . En la Figura 26 se muestra el electrolizador PEM, el cual fue diseñado por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) y la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) del Instituto Politécnico Nacional (IPN).



Figura 26. Electrolizador tipo PEM con un área geométrica de 5 cm^2 diseñado por ESIME-ESIQIE.

Tomada de: (Navarro Castillo, 2025).

En la Figura 27 se presenta el diseño base del prototipo de electrolizador PEM y sus respectivos componentes internos.

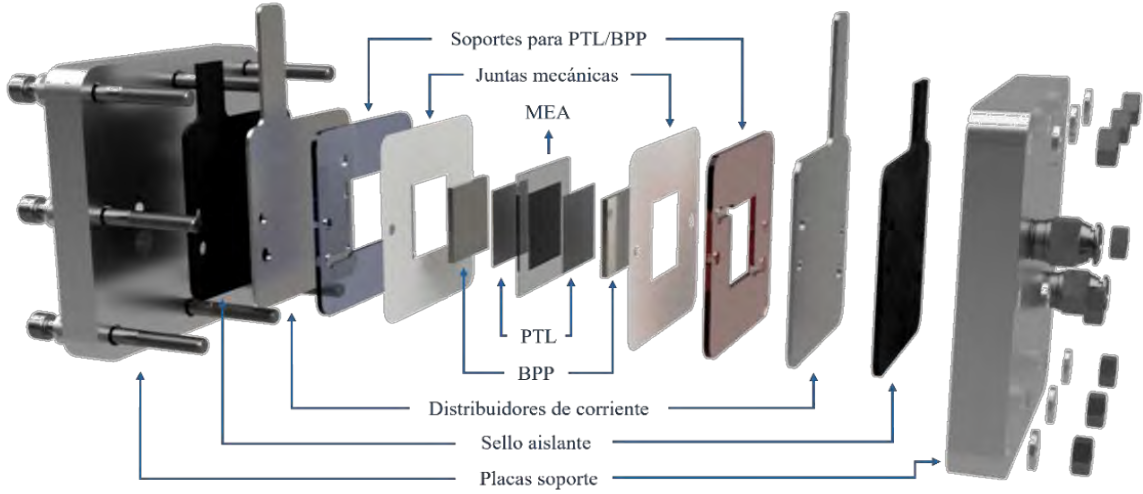





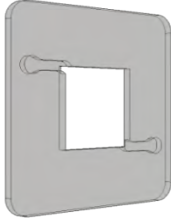



Figura 27. Componentes del electrolizador de prueba tipo PEM (área geométrica de 5 cm²).

Tomada de: (Jesus Alberto Cruz Flores, 2024).

En la Tabla 11 se listan cada uno de los componentes del electrolizador PEM, junto con su material de fabricación y un esquema del componente.

Tabla 11. Componentes y materiales del electrolizador de prueba tipo PEM.

Componente	Esquema	Componente	Esquema
Placas soporte (Al 6061-T6)		Junta aislante (Nitrilo)	

<p>Distribuidor de corriente (Ti grado 2)</p>		<p>Marco soporte (Metacrilato)</p>	
<p>Plato bipolar (Ti grado 2)</p>		<p>Capa de transporte porosa (PTL) (Ti/Pt)</p>	
<p>Junta mecánica (Etileno Propileno Dieno Monómero)</p>			

Adaptada de: (Jesus Alberto Cruz Flores, 2024).

En esta etapa se realizaron curvas de polarización, las cuales permitieron evaluar el desempeño del electrolizador PEM, al relacionar el potencial de celda en función de la densidad de corriente aplicada, donde una menor demanda de potencial a una densidad de corriente específica indica que el electrolizador es más eficiente. Se realizaron curvas de polarización con un MEA convencional, utilizando dos membranas Nafion™ 115 con catalizadores anódicos a una concentración del 100 % de RuO₂, las cuáles fueron llamadas como M1 y M2 en este proyecto, y también

fueron realizadas curvas de polarización utilizando un MEA mixto, al integrar cada uno de los electrodos sintetizados en este proyecto (E1, E2, E3, E4 y E5).

En la Figura 28, se muestra el MEA convencional utilizado en el electrolizador de prueba tipo PEM, el cual está compuesto básicamente por la membrana Nafion™ donde en su lado anódico, tiene los depósitos de RuO₂ impregnados con tinta catalítica, y en su lado catódico, tiene la tela de carbono con platino al 40 % en peso. En ambos lados se utiliza una PTL de titanio platinado para mejorar la conductividad y transferencia de masa.

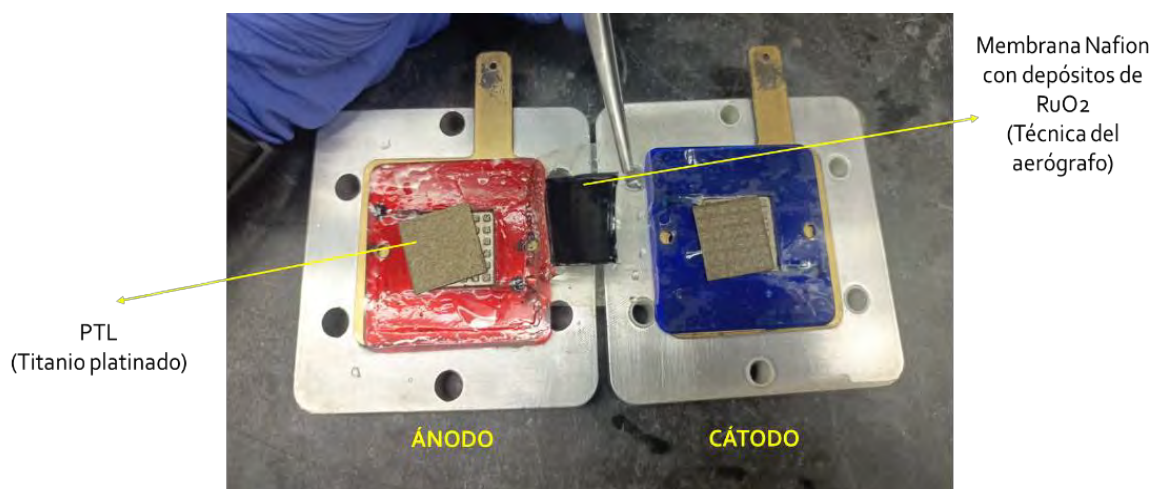


Figura 28. MEA convencional empleado en el electrolizador de prueba tipo PEM.

En la Figura 29 se muestra el MEA mixto utilizado en el electrolizador de prueba tipo PEM, el cual, básicamente fue ensamblado de la misma forma del MEA convencional, pero en este caso, la PTL de la zona anódica es intercambiada por los electrodos con electrocatalizadores de RuO₂ fabricados en este proyecto. De esta forma, se extiende la capa catalítica anódica desde la membrana Nafion™ hasta la PTL adyacente. Los electrodos E1, E2 y E3 fueron evaluados utilizando un MEA mixto con la membrana M1, mientras que los electrodos E4 y E5 fueron evaluados en un MEA mixto usando la membrana M2.

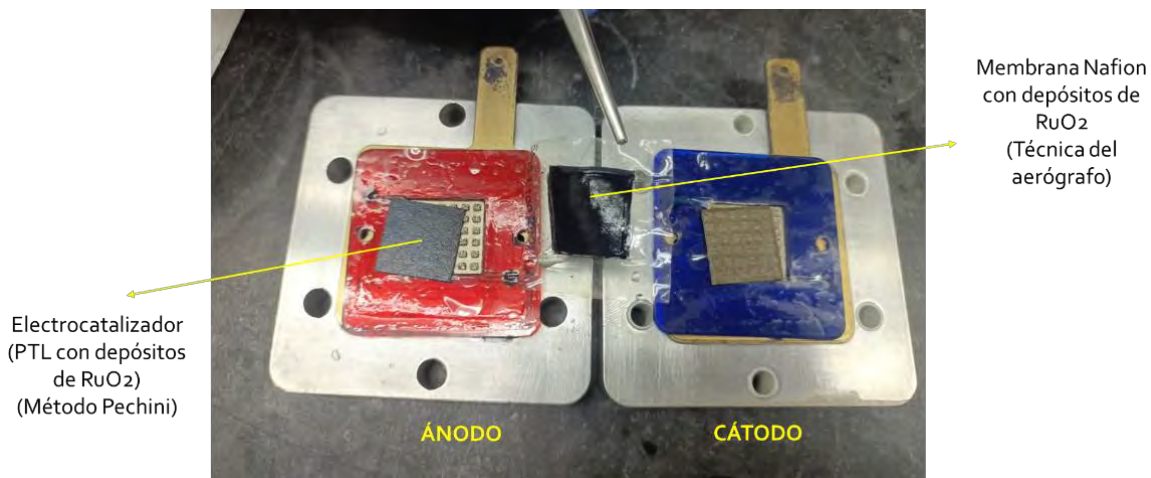


Figura 29. MEA mixto empleado en el electrolizador de prueba tipo PEM.

El banco de pruebas utilizado para las pruebas de desempeño del electrolizador PEM se muestra en la Figura 30, el cual está conformado por los siguientes equipos: un baño térmico para mantener la temperatura de operación de la celda en un valor de 80 °C, una fuente de poder, una bomba peristáltica para el control del flujo de agua, un separador de fases para la separación de los gases producidos en el electrolizador PEM y un multímetro para medir el potencial de celda.



Figura 30. Banco de pruebas del electrolizador de prueba tipo PEM.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Fase preliminar

4.1.1 Fabricación de electrodos de prueba $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$

La síntesis de los electrocatalizadores de RuO_2 sobre la PTL de porosidad de 70-73 %, se realizó con las siguientes condiciones:

- **Solvente:** Monoetilenglicol.
- **Sustrato:** PTL (Filtro de titanio de porosidad de 70-73 %).
- **E1** se sintetizó con 8 capas, a 400 °C y 1 hora de calcinación.
- **E2** se sintetizó con 8 capas, a 500 °C y 4 horas de calcinación.

En la Figura 31, se muestra el proceso de fabricación de los dos electrodos de prueba fabricados en el laboratorio. De izquierda a derecha se observa el proceso de deposición gradual de los depósitos de RuO_2 desde la capa 1 hasta la capa 8. En la capa 1, el electrodo presenta una gama de colores pasteles y plateados indicando heterogeneidad y baja deposición de RuO_2 , y en la capa 8, la PTL tiene una coloración más homogénea entre morada y azul, característicos de los depósitos de RuO_2 .

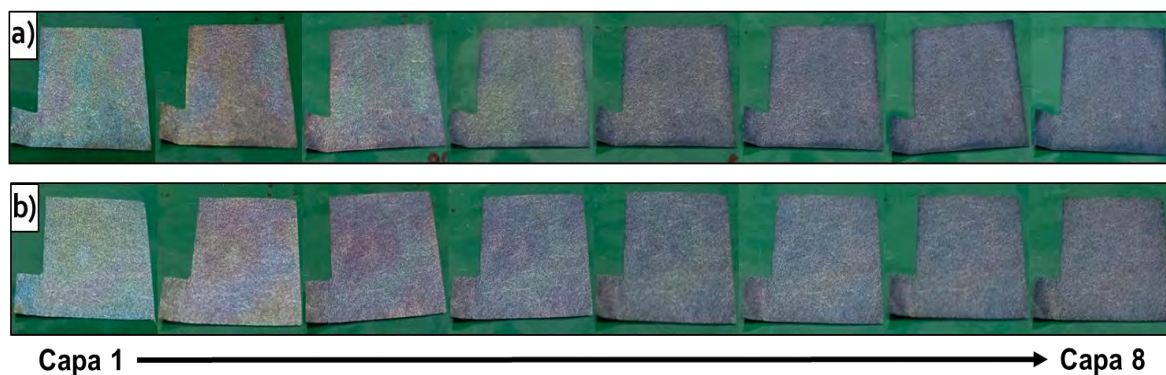


Figura 31. Proceso de fabricación de los electrodos de prueba $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$. Las figuras corresponden a: E1 (a) y E2 (b).

Es importante destacar que el color de los electrodos cambia a medida que el número de capas aumenta. Este cambio en la colorimetría es una medida cualitativa de la presencia de depósitos de RuO_2 sobre las fibras entrecruzadas de titanio. Entre la primera y cuarta capa, se aprecia que el color no es homogéneo en toda la superficie de la PTL, indicando que la deposición de RuO_2 se ha efectuado de forma heterogénea. A partir de la quinta capa, la tonalidad se ve más homogénea y uniforme. De acuerdo con las observaciones tomadas en la experimentación, se identifican las siguientes causas, las cuales se asocian a diversos factores presentes durante la aplicación de la solución precursora:

- **Temperatura de la solución precursora:** El método PPM sugiere aplicar la solución a una temperatura de $60\text{ }^\circ\text{C}$ sobre superficies planas tipo lámina, por lo que, entre la primera y cuarta capa, la solución precursora fue aplicada a esa temperatura haciendo que la solución se filtrara a través del sustrato tipo fieltro. Como consecuencia, se observa un depósito no homogéneo en las primeras capas. A partir de la quinta capa se decidió aplicar la solución precursora a una temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$, lo que aumentó su retención superficial sobre las fibras entrecruzadas de la PTL, logrando una mayor retención superficial y homogeneidad en el color.
- **Viscosidad de la solución precursora:** Experimentalmente se observó que en la aplicación de la solución precursora a una temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$ aún prevalece la tendencia a filtrarse a través de la PTL. Por lo tanto, se planteó utilizar dietilenglicol como solvente en la preparación de la solución precursora en la fase final, ya que tiene una mayor viscosidad con un valor de $29.3\text{ mPa}\cdot\text{m}$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$ con respecto a la viscosidad del monoetilenglicol que es considerablemente menor, con un valor de $12.9\text{ mPa}\cdot\text{s}$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$. Este planteamiento es válido, ya que el solvente se utiliza en exceso de acuerdo con la relación molar descrita en la metodología (Sección 3.1), y por consiguiente, la viscosidad de la solución precursora está principalmente dominada por la viscosidad del solvente usado.

4.1.2 Caracterización electroquímica de electrodos de prueba Ti_(PTL)/RuO₂

a) Voltamperometría de Barrido Lineal (LSV)

En la Figura 32 se muestran las curvas voltamperométricas de los dos electrodos de prueba (E1 y E2). La línea de color negra, hace referencia a la curva LSV con base en el electrodo de referencia Ag/AgCl (electrodo de referencia utilizado en la experimentación). No obstante, la literatura maneja al electrodo estándar de hidrógeno como electrodo de comparación (SHE, Standard Hydrogen Electrode), el cual se calcula con la Ec. 39 y cuya curva de LSV se muestra en color rojo. Asimismo, el término SHE-iR se refiere al electrodo estándar de hidrógeno corregido por la caída óhmica (iR), el cual se calcula mediante la Ec. 40 y cuya curva de LSV se presenta de color azul. La resistencia de la solución (R_s) se determinó a partir de las prueba EIS realizadas para cada uno de los electrodos fabricados, las cuales se pueden consultar en el Anexo 1.

$$E_{SHE} = E_{medido_{Ag/AgCl}} + E_{Ag/AgCl}^{\circ} \quad \text{Ec. 39}$$

$$E_{SHE-iR} = E_{SHE} - (I * R_s) \quad \text{Ec. 40}$$

Las curvas LSV de ambos electrodos muestran actividad catalítica para la OER en el rango de aplicación de la prueba. Por un lado, el E1 presenta un potencial de 1.43 V/SHE-iR y un sobrepotencial de 0.317 V a 10 mA cm⁻², y el E2 presenta un valor de 1.42 V/SHE-iR y un sobrepotencial de 0.304 V a 10 mA cm⁻² (Tabla 12).

Tabla 12. Parámetros LSV de los electrodos de prueba E1 y E2.

Electrodos	E/SHE-iR @10 mA cm ⁻² [V]	η/SHE-iR @10 mA cm ⁻² [V]
E1	1.43	0.317
E2	1.42	0.304

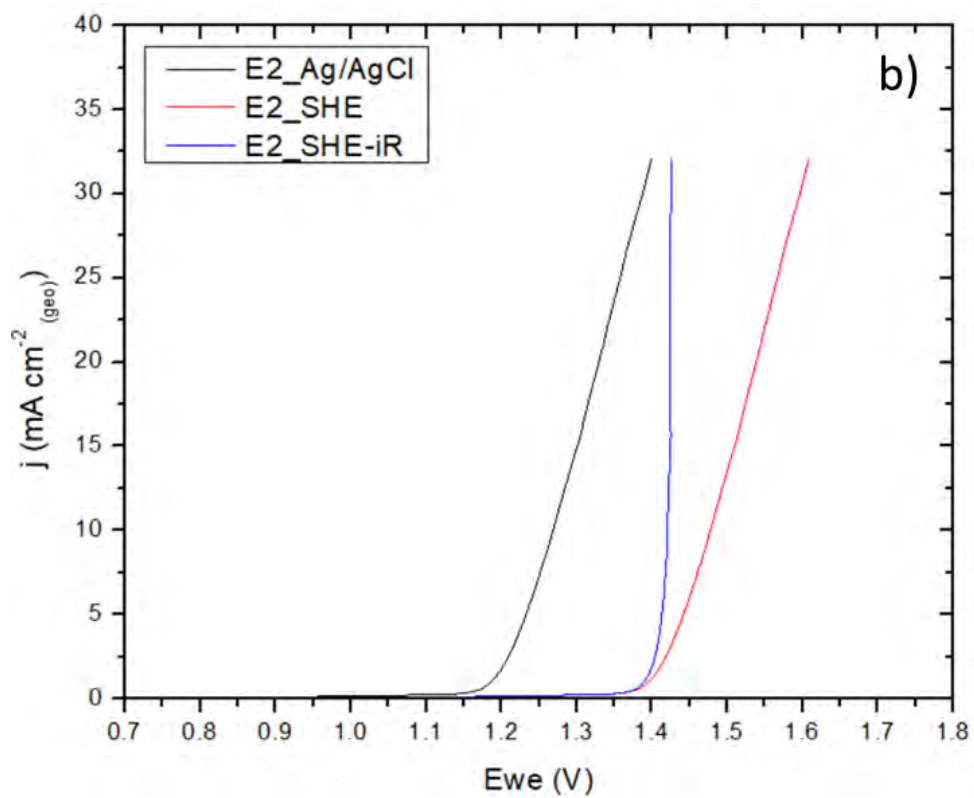
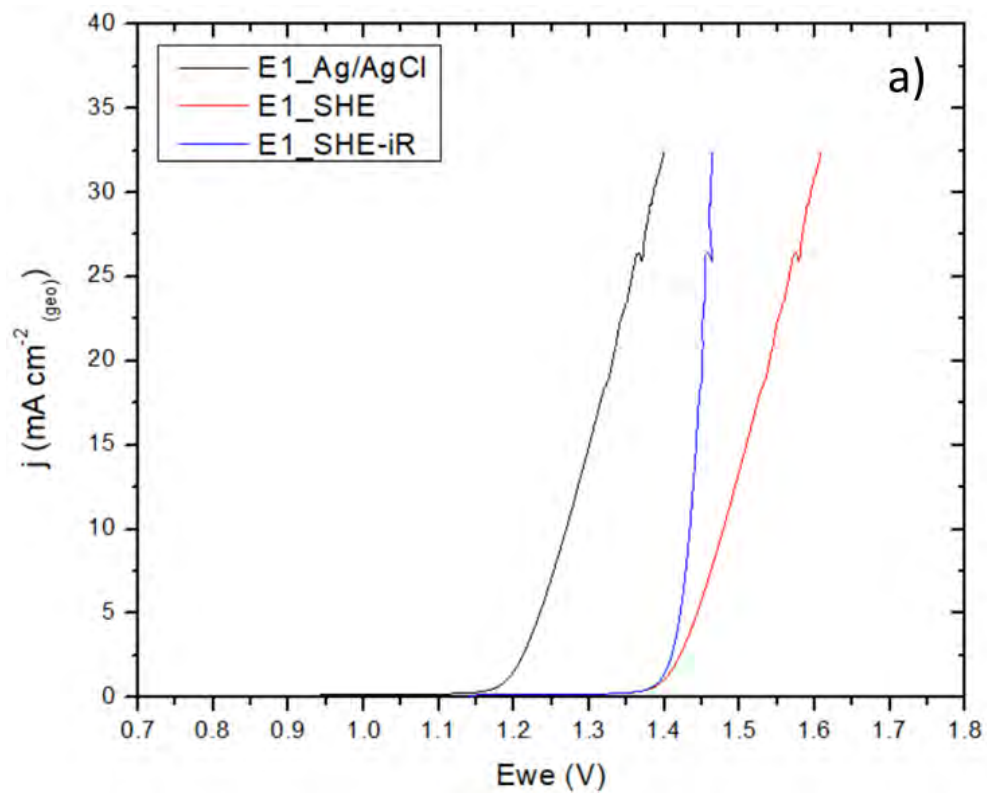
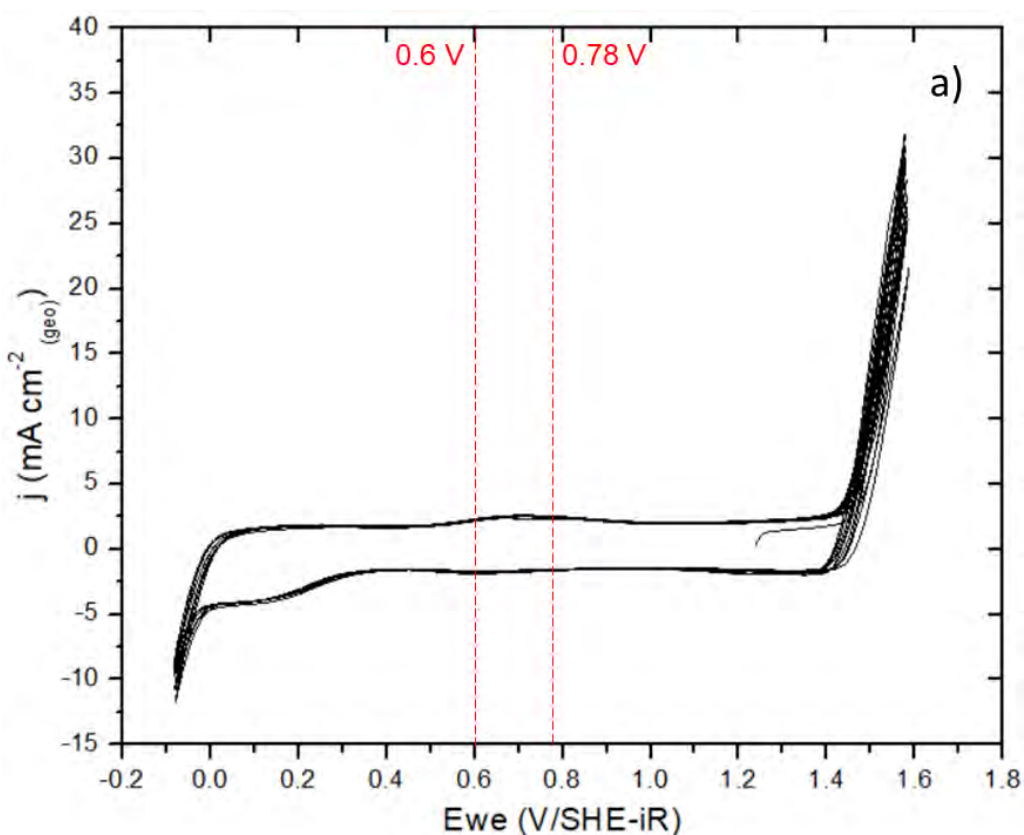


Figura 32. Curvas LSV de los electrodos de prueba: E1 (a) y E2 (b).

b) Voltamperometría Cíclica (CV)

En la Figura 33 se muestran las curvas voltamperométricas de los dos electrodos de pruebas (E1 y E2) sometidos a 10 ciclos. En ambos voltamperogramas es posible observar dos señales, una a 0.6 V y otra a 0.78 V/SHE, característicos de las transiciones redox Ru(III)/Ru(IV) y Ru(IV)/Ru(VI) respectivamente (Y. Liu *et al.*, 2024; Martínez-Séptimo *et al.*, 2021). Adicionalmente, se aprecia que el E2 presenta mejor estabilidad a potenciales mayores de 1.6 V/SHE ya que las señales se sobrepone al incremento de los ciclos (Figura 33b), caso aparte con el E1 que a potenciales mayores 1.6 V/SHE muestra un desplazamiento de los picos conforme incrementan los ciclos (Figura 33a).



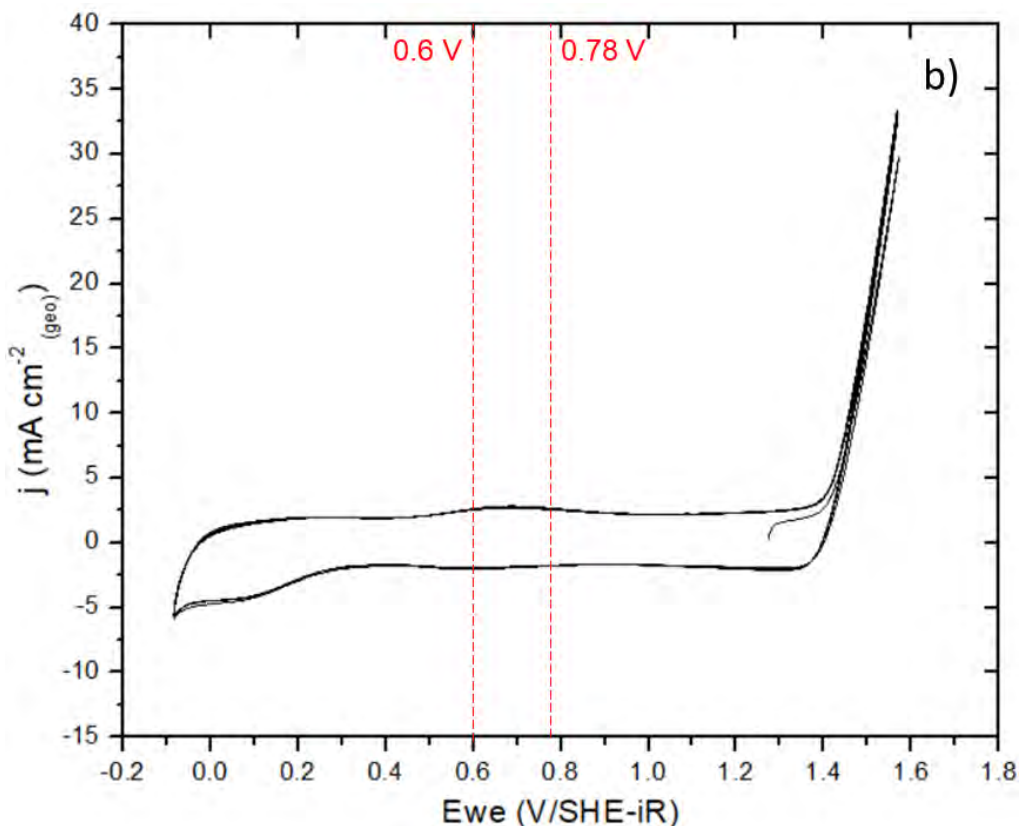


Figura 33. Curvas CV de los electrodos de prueba: E1 (a) y E2 (b).

4.1.3 Caracterización electroquímica a electrodos $\text{Ti}_{(\text{Lámina})}/\text{RuO}_2$

Con el objetivo de determinar las mejores condiciones de síntesis para la OER, se realizaron Voltamperometrías de Barrido Lineal (LSV) a 15 electrodos de RuO_2 que previamente fueron sintetizados sobre un sustrato tipo lámina de Ti pertenecientes a estudios previos en el grupo de investigación. Las curvas LSV se muestran en la Figura 34, donde se evidencia que los electrodos que alcanzaron una mayor densidad de corriente a un potencial de 1.6V/Ag/Cl fueron: $E9 > E13 > E8 > E12 > E3$. Es importante destacar que los electrodos con mayor densidad de corriente fueron sintetizados aplicando 12 capas de solución precursora (Tabla 13).

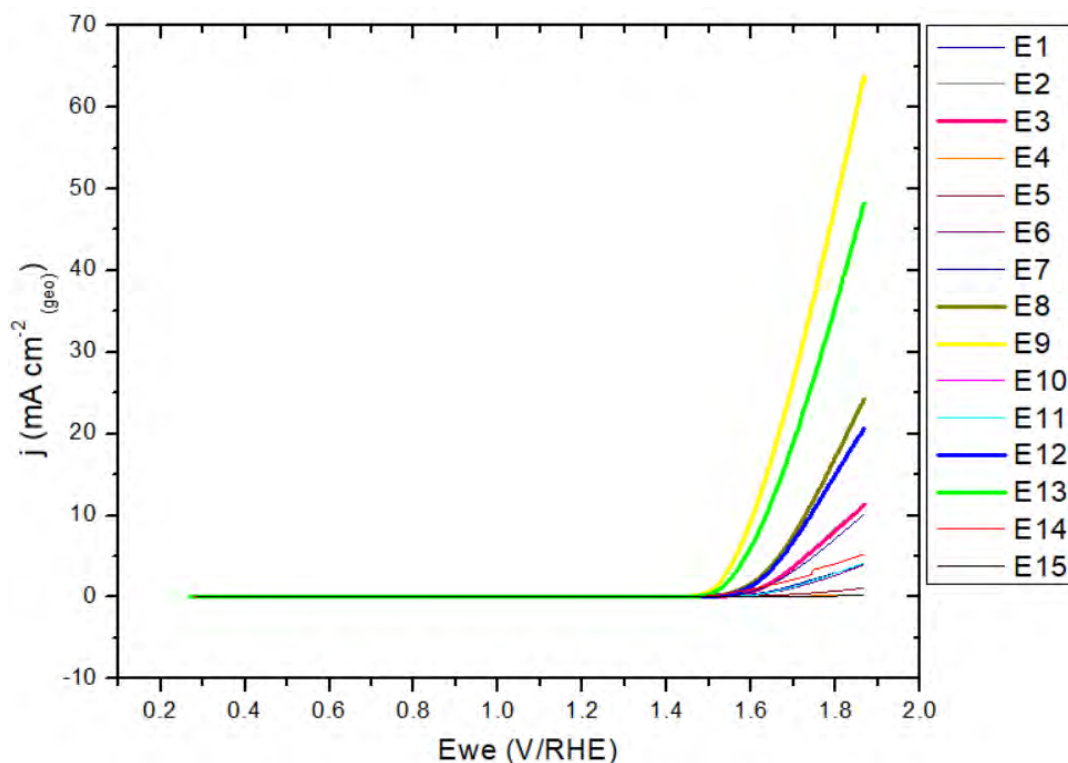


Figura 34. Curvas LSV de electrodos $\text{Ti}_{(\text{Lámina})}/\text{RuO}_2$.

Posteriormente, se realiza un diseño experimental Box-Behnken usando el software Minitab 19, aplicando la metodología de superficie de respuesta de la siguiente forma:

- **Tres factores:** Factor A) número de capas, factor B) tiempo de calcinación en horas , y factor C) temperatura de calcinación en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
- **Variable de respuesta:** Densidad de corriente debido a su relación directa con el desempeño electroquímico de los electrodos. Las densidades de corriente fueron tomadas a un potencial de 1.6 V/Ag/Cl en unidades de mA cm^{-2} .
- **Niveles:** Cada factor fue variado en tres niveles: bajo (-1), medio (0) y alto (+1), para un total de 15 experimentos. Las variaciones realizadas de cada factor se listan en la Tabla 13.

Tabla 13. Variables de entrada y salida utilizados en el diseño experimental Box-Behnken, utilizando la actividad catalítica de los electrodos $\text{Ti}_{(\text{Lámina})}/\text{RuO}_2$.

Electrodos	Variables de entrada			Variable de salida
	Número de capas	t (h)	T (°C)	j (mA cm^{-2})
E1	4	1	500	4.025910433
E2	12	1	500	11.35931933
E3	8	1	400	11.31159937
E4	8	1	600	0.21919405
E5	8	4	500	1.093410752
E6	8	4	500	3.978406693
E7	8	4	500	10.11339919
E8	4	4	400	24.19249665
E9	12	4	400	63.76303818
E10	4	4	600	0.053735865
E11	12	4	600	4.176576288
E12	4	7	500	20.63895732
E13	12	7	500	48.18627511
E14	8	7	400	5.223712088
E15	8	7	600	0.170139172

Se realizó un análisis de varianza (Tabla 14) evidenciando que el modelo tiene un valor p de 0.228 y un valor F de 2.02, indicando que no es estadísticamente significativo al 95 %, es decir, el valor p no alcanza el umbral de significancia de $\alpha = 0.05$. Este resultado indica que la interacción de los tres factores (número de capas, tiempo y temperatura de calcinación) en función de la variable de respuesta (densidad de corriente), es un sistema complejo con alta variabilidad. Por lo tanto, el modelo se utiliza en este proyecto, únicamente para exploración y optimización de las condiciones de síntesis de los electrodos finales en pro de maximizar la densidad de corriente. No obstante, es imperativo enunciar que en el ajuste lineal, la temperatura es el factor más influyente debido a que tiene el valor F más alto (5.84) y el valor p más bajo (0.060) con respecto a los demás factores. Asimismo, el término cuadrático del número de capas correspondiente al ajuste cuadrado, sugiere un óptimo, al poseer un valor p relativamente pequeño de 0.071. Lo anterior

muestra que la densidad de corriente está influenciada principalmente por la temperatura y el número de capas utilizadas en el proceso de síntesis mediante el método PPM, sin embargo, es un modelo complejo que depende más de la combinación global que de una interacción específica de algún factor.

Tabla 14. Análisis de varianza del modelo ajustado mediante el diseño Box-Behnken de los electrodos $\text{Ti}_{(\text{Lámina})}/\text{RuO}_2$.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	3871.18	430.13	2.02	0.228
Lineal	3	2298.22	766.07	3.59	0.101
Capas	1	771.74	771.74	3.62	0.116
Tiempo (h)	1	279.70	279.70	1.31	0.304
Temperatura (°C)	1	1246.78	1246.78	5.84	0.060
Cuadrado	3	1147.56	382.52	1.79	0.265
Capas*Capas	1	1118.28	1118.28	5.24	0.071
Tiempo (h)*Tiempo (h)	1	7.36	7.36	0.03	0.860
Temperatura (°C)*Temperatura (°C)	1	1.25	1.25	0.01	0.942
Interacción de 2 factores	3	425.40	141.80	0.66	0.609
Capas*Tiempo (h)	1	102.15	102.15	0.48	0.520
Capas*Temperatura (°C)	1	314.13	314.13	1.47	0.279
Tiempo (h)*Temperatura (°C)	1	9.12	9.12	0.04	0.844
Error	5	1066.69	213.34		
Falta de ajuste	3	1024.25	341.42	16.09	0.059
Error puro	2	42.44	21.22		
Total	14	4937.87			

Las mejores condiciones de síntesis del método PPM se obtienen aplicando una “optimización de respuesta” en pro de maximizar la densidad de corriente, utilizando la función de deseabilidad compuesta (Tabla 15). Se encontró una combinación óptima de factores correspondiente a un número de 12 capas, 7 horas de calcinación y una temperatura de 400 °C. Bajo estas condiciones, el modelo predice una densidad de corriente de 62.285 mA cm⁻² con una deseabilidad compuesta de 0.976, siendo relativamente alta al estar cercana a la unidad.

Tabla 15. Condiciones óptimas de síntesis obtenidas a partir de la optimización de la variable de respuesta (densidad de corriente) de los electrodos $Ti_{(Lámina)}/RuO_2$

Solución	Capas	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Densidad de corriente (mA/cm ²) Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	12	7	400	62.2585	0.976384

En consecuencia, se puede deducir que para obtener una mayor densidad de corriente, basta con aumentar el número de capas hasta su límite máximo de 12 capas, aumentar el tiempo de calcinación hasta su límite máximo de 7 horas y disminuir la temperatura de calcinación hasta su límite mínimo de 400 °C. Las gráficas de contorno que se muestran en la Figura 35 muestran de forma visual el comportamiento anteriormente explicado.

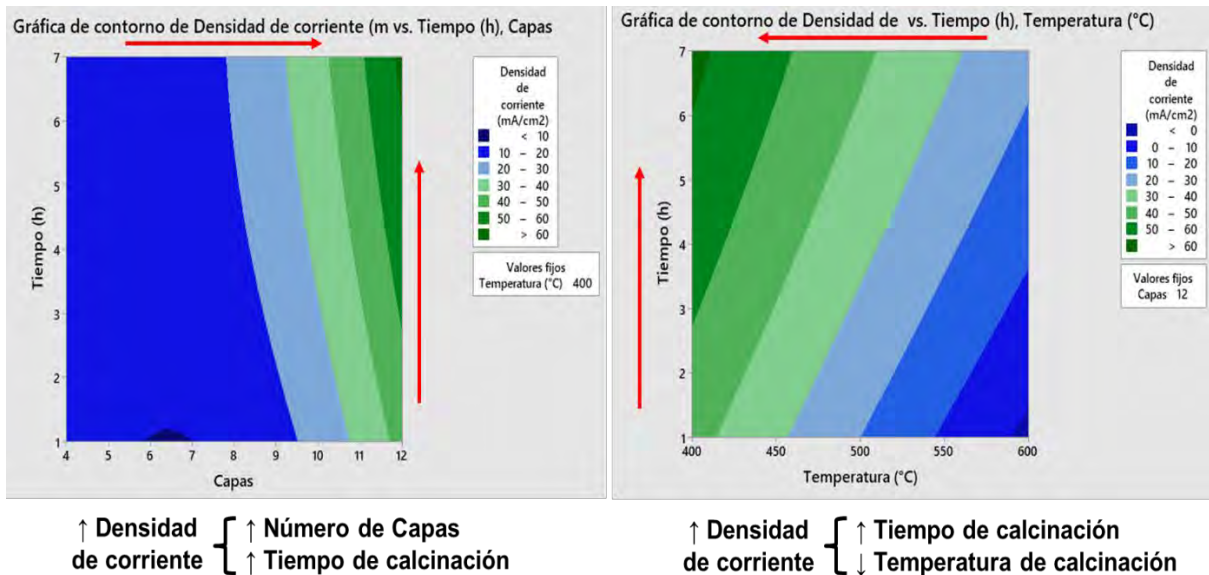


Figura 35. Gráficas de contorno obtenidas a partir de la optimización de la variable de respuesta (densidad de corriente) de los electrodos $Ti_{(Lámina)}/RuO_2$.

4.2 Fase final

4.2.1 Etapa A: Fabricación de los electrodos finales $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$

De acuerdo con los resultados obtenidos en la fase preliminar, la síntesis de los electrodos finales (E3, E4 y E5) se realizó con las siguientes condiciones:

- **Solvente:** Dietilenglicol debido a que tiene una mayor viscosidad.
- **Sustrato de Ti:** Se utilizaron 3 distintas porosidades de la PTL:
 - 1) E3 (Porosidad baja: 50-60 %).
 - 2) E4 (Porosidad media: 60-70 %).
 - 3) E5 (Porosidad alta: 70-73 %).
- **Condiciones de síntesis:** 12 capas, 400 °C y 7 horas de calcinación.
- Se sintetizaron tres electrodos de cada porosidad: uno para realizar pruebas electroquímicas, el segundo para la ejecución de las pruebas de caracterización química y el tercero para la ejecución de las pruebas de desempeño en el electrolizador de prueba tipo PEM. En total se sintetizaron 9 electrodos con electrocatalizadores base RuO_2 .

En la Figura 36 se muestra el proceso secuencial de fabricación de los nueve electrodos utilizando una PTL de diferentes porosidades. Al igual que en los electrodos de la fase preliminar, se observa una variación en la tonalidad a medida que se incrementa el número de capas de óxidos de rutenio. Sin embargo, en estos se observa que desde la primera capa se obtuvo una gama de coloración más homogénea para cada una de los sustratos utilizados evidenciando que al utilizar dietilenglicol como solvente, la deposición de los RuO_2 sobre la PTL se realizó de manera más homogénea. No obstante, cabe resaltar que al aumentar el número de

capas aplicadas de la solución precursora, específicamente a partir de la séptima capa, las PTL comenzaron a mostrar nuevamente una notable heterogeneidad en su color, principalmente con zonas de color más oscuras localizadas tanto en los bordes como en algunas regiones aleatorias de la parte central. Este comportamiento posiblemente se debe a un patrón de calcinación que posiblemente inicia en los bordes de la PTL, asociado al uso de una loseta cerámica como soporte durante el tratamiento térmico en la mufla, lo que provoca que los bordes de la PTL estén expuestos al calor de manera más rápida y durante mayor tiempo en comparación con las regiones de la parte central.

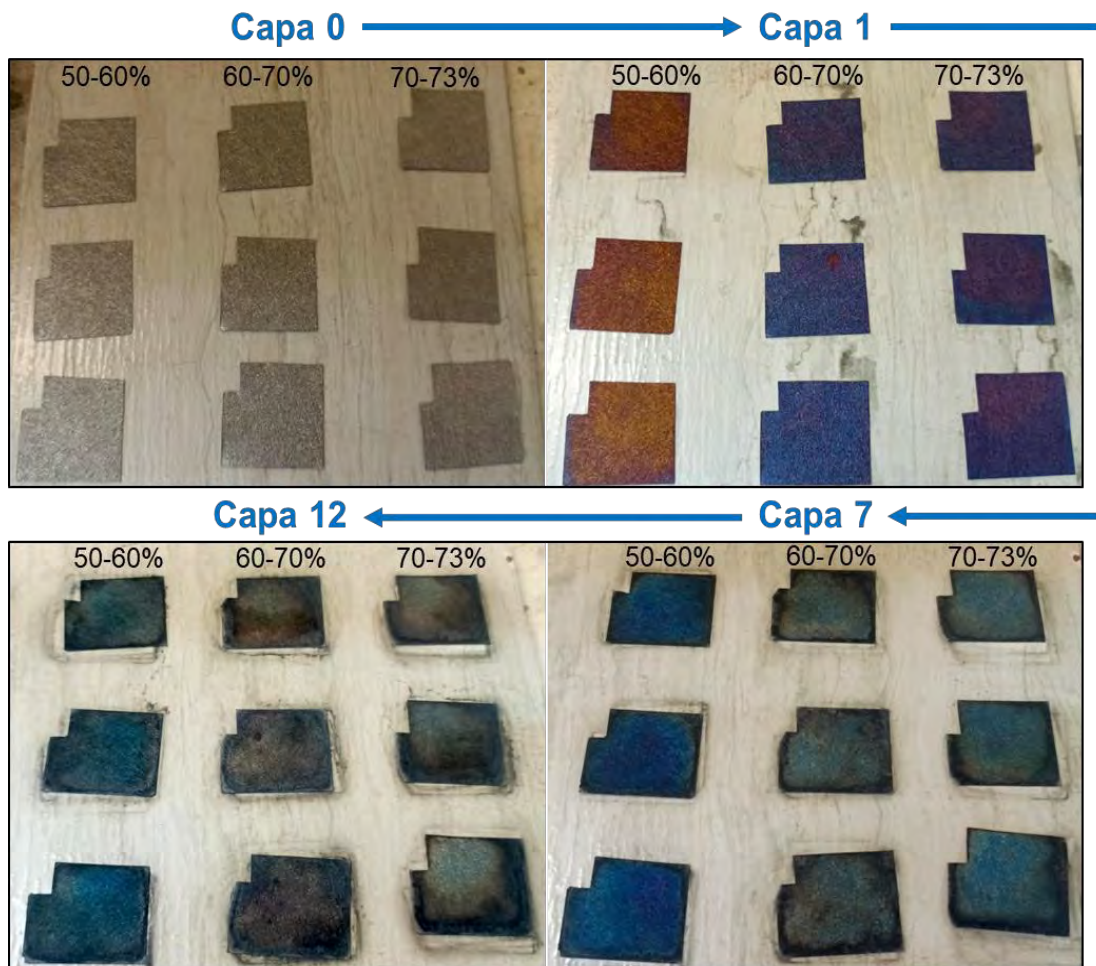
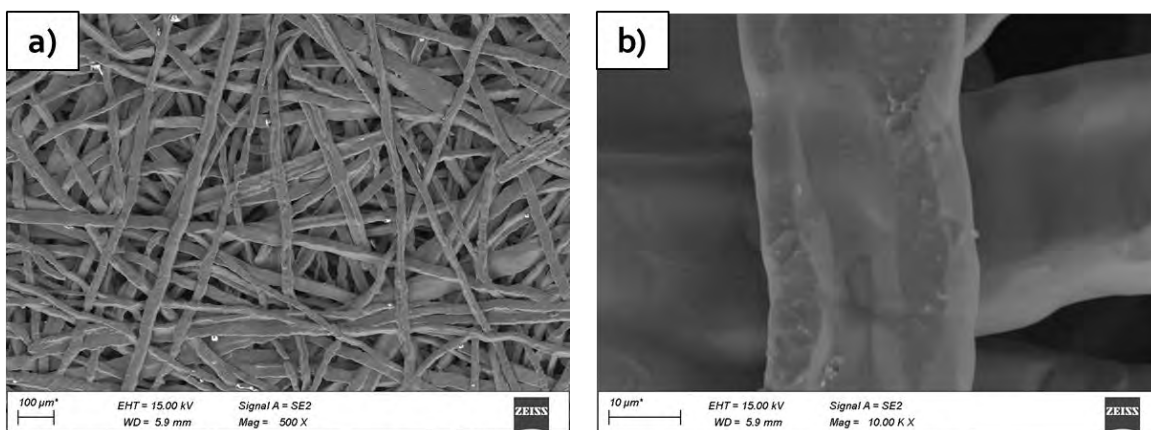


Figura 36. Proceso de fabricación de los electrodos finales $Ti_{(PTL)}/RuO_2$ (E3, E4 y E5) utilizando diferentes porosidades de la PTL (50-60 %, 60-70 % y 70-73 %).

4.2.2 Etapa B: Caracterización electroquímica, morfológica, textural y de composición de los electrodos finales

a) Caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Los óxidos de rutenio fueron depositados sobre superficies tipo fieltro, las cuales se caracterizan por ser estructuras tridimensionales porosas formadas por fibras de titanio entrecruzadas de forma aleatoria. En la Figura 37 se pueden apreciar diferentes micrografías SEM de los tres electrodos finales sintetizados (E3, E4 y E5). Las figuras a, c y e fueron tomadas con una magnificación de 500 X, mientras que las figuras b, d y f corresponden a una magnificación de 10,000 X. Las figuras a-b, c-d y e-f muestran el fieltro de Ti (PTL) utilizado para la fabricación de los electrodos E3, E4 y E5, respectivamente. Cabe resaltar que las micrografías e-f, también corresponden a la PTL empleada en la fabricación de los electrodos E1 y E2 en la fase preliminar. Aunque en términos generales, las micrografías con magnificación de 10,000 X muestran que todos los fieltros presentan fibras entrecruzadas limpias y lisas, es decir, sin depósitos, cabe resaltar que en la figura d, se observa un aplastamiento localizado de una fibra, evidenciado por un contorno definido y la presencia de algunos ahuellamientos leves en su superficie. No obstante, dicha condición no representa ningún problema en el proceso de síntesis.



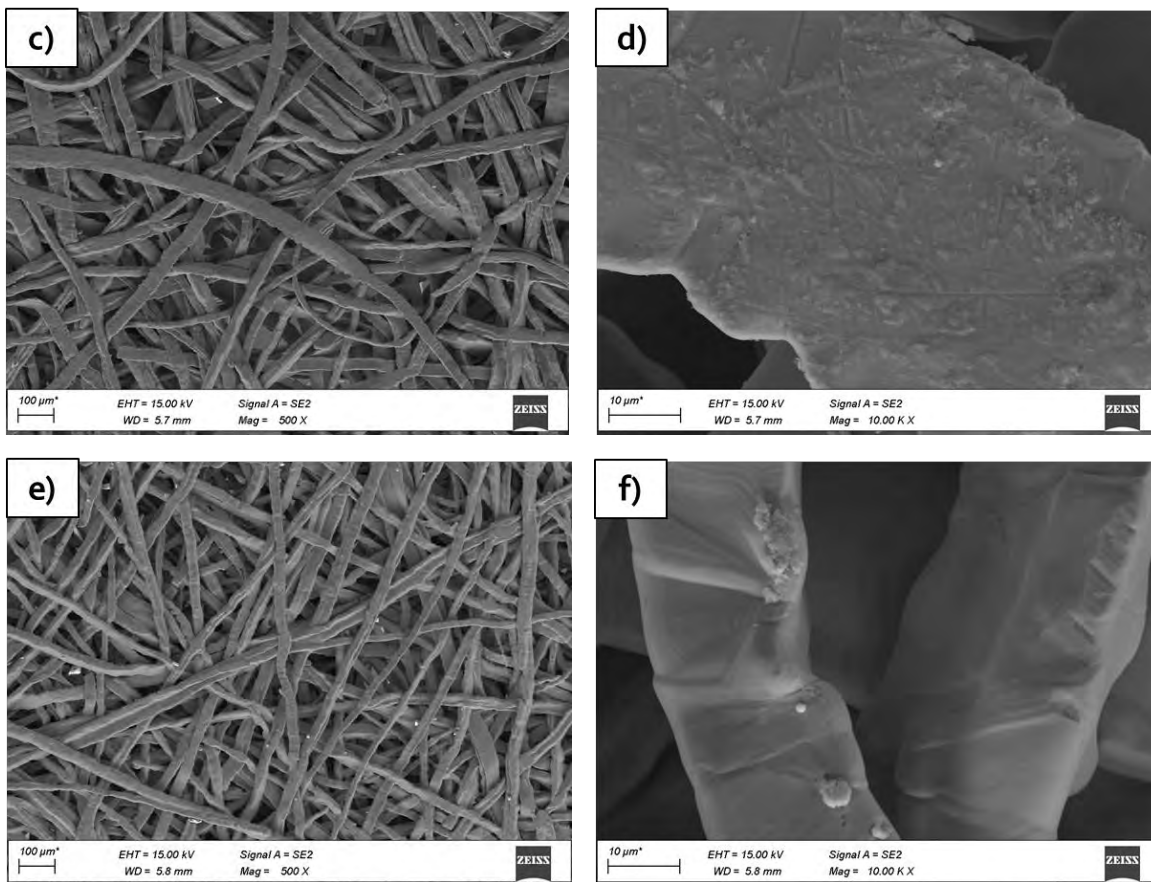


Figura 37. Micrografías SEM de las PTL de titanio, obtenidas con detector de electrones secundarios a magnificaciones de 500 X y 10,000 X. Figuras a y b corresponden a porosidad baja: 50-60 %, figuras b y c corresponden a porosidad media: 60-70 %, y figuras e y f corresponden porosidad baja: 70-73 %.

En contraste, la Figura 38 muestra las micrografías SEM de todos los electrodos E1-E5 fabricados en este proyecto a una magnificación de 10,000 X. Las figuras a, b y e corresponden a los electrodos E1, E2 y E5, respectivamente, mientras que las micrografías c y d corresponden a los electrodos E3 y E4, respectivamente. Las micrografías permiten confirmar la presencia de depósitos de RuO_2 sobre las fibras entrecruzadas de Ti, no obstante, no se aprecian diferencias considerables en su morfología y textura. En todos los electrodos se aprecian partículas segregadas y distribuidas sobre la superficie de las fibras de titanio.

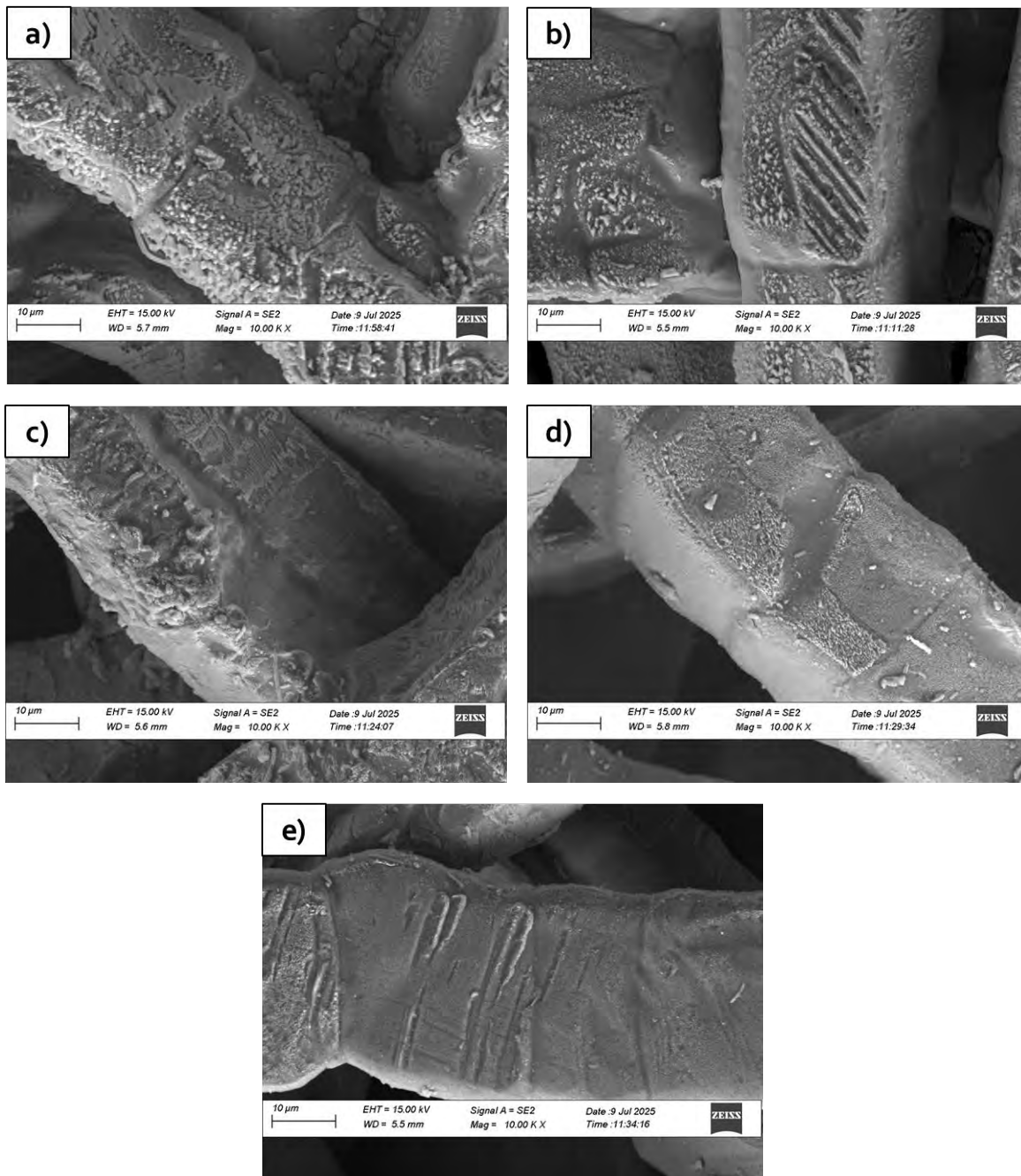


Figura 38. Micrográficas SEM de los electrodos $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$ (E1–E5) obtenidas con detector de electrones secundarios a una magnificación de 10,000 X. Las figuras corresponden a: E1 (a), E2 (b), E3 (c), E4 (d) y E5 (e).

b) Caracterización por Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS)

Se utilizó la técnica analítica EDS para analizar la composición elemental de las PTL utilizadas como sustrato y de los electrodos E1-E5 fabricados, considerando un área de análisis de 110 μm X 80 μm para cada muestra. En la Tabla 16 se puede apreciar que los fieltros de titanio emitieron principalmente radiaciones correspondientes a átomos de titanio y oxígeno. En todas las PTL de distintas porosidades predomina la concentración de titanio, superior al 94.0 % en peso, lo cual confirma que el material de las PTL utilizadas como sustrato está compuesto principalmente por titanio.

Tabla 16. Composición elemental cuantificada por EDS de las PTL.

PTL tipo fieltro	Porosidad (%)	% en peso	
		Ti	O
1	50-60	94.90	5.10
2	60-70	94.60	5.40
3	70-73	95.20	4.80

Por otra parte, en la Tabla 17 se muestran los resultados del análisis EDS realizado a los electrodos E1-E5, los cuales muestran que todos los electrodos están compuestos principalmente por átomos de titanio, oxígeno y rutenio. Cabe resaltar que, aunque los electrodos E1 y E2 utilizaron el mismo número de capas de solución precursora (8 capas), y los electrodos E3, E4 y E5 utilizaron 12 capas, se observan diferencias significativas en la concentración de rutenio entre ellos.

Tabla 17. Composición elemental cuantificada por EDS de los electrodos E1-E5.

Electrodo	Porosidad (%)	% en peso			
		Ti	Ru	O	Zn
E1	70-73	43.25	29.23	26.84	-
E2	70-73	54.55	18.01	27.45	-
E3	50-60	53.74	21.60	22.75	1.90
E4	60-70	57.07	18.73	22.96	1.24
E5	70-73	61.42	16.51	22.07	-

Por un lado, el electrodo E2 presenta una menor concentración aparente de átomos de Ru respecto al electrodo E1, aun cuando fueron fabricados utilizando el mismo número de capas y la misma porosidad del fieltro de titanio (70-73 %). Esto puede atribuirse a procesos de redistribución superficial y sinterización del Ru, los cuales son principalmente favorecidos por la mayor temperatura (500 °C) y el mayor tiempo de calcinación (4 h) al que fue sometido este electrodo. Las condiciones más severas de calcinación tienden a incrementar la cristalinidad y redistribución de los átomos de rutenio en el sustrato.

Con respecto a los electrodos E3, E4 y E5, que fueron sintetizadas bajo las mismas condiciones de número de capas, tiempo y temperatura de calcinación, también se observan diferencias en la concentración aparente del Ru. Se aprecia que el electrodo E3, que tiene una menor porosidad (50-60 %), cuenta con la mayor concentración de átomos de Ru con un valor de 21.60 % en peso, mientras que el electrodo E5, que tiene una mayor porosidad (70-73 %), cuenta con la menor concentración de átomos de Ru con un valor de 16.51 % en peso. Este resultado puede atribuirse a que el sustrato utilizado en la fabricación del electrodo E3, tiene una mayor área de Ti metálico en el que se pueden depositar mayor cantidad de RuO₂ durante el proceso de síntesis. También es importante resaltar, que los

electrodos E4 y E5, mostraron la presencia de átomos de zinc (Zn) a muy bajas concentraciones (1.90 % en peso y 1.24 % en peso, respectivamente), lo cual puede atribuirse a alguna contaminación cruzada en el proceso de síntesis en la mufla, no obstante, son concentraciones bajas, menores de 2.0 % en peso, por lo que no representa ningún efecto considerable en el desempeño electroquímico de los electrodos

Adicionalmente, la distribución espacial de los átomos de Ti, O y Ru se analizó mediante mapas elementales para cada uno de los electrodos sintetizados, los cuales se presentan de la siguiente forma: E1 (Figura 39), E2 (Figura 40), E3 (Figura 41), E4 (Figura 42) y E5 (Figura 43). En términos generales, se aprecia que los átomos de titanio (color rojo), átomos de oxígeno (color azul claro) y átomos de rutenio (color verde) tienen una buena segregación y dispersión espacial sobre las fibras entrecruzadas de las PTL para cada uno de los electrodos fabricados.

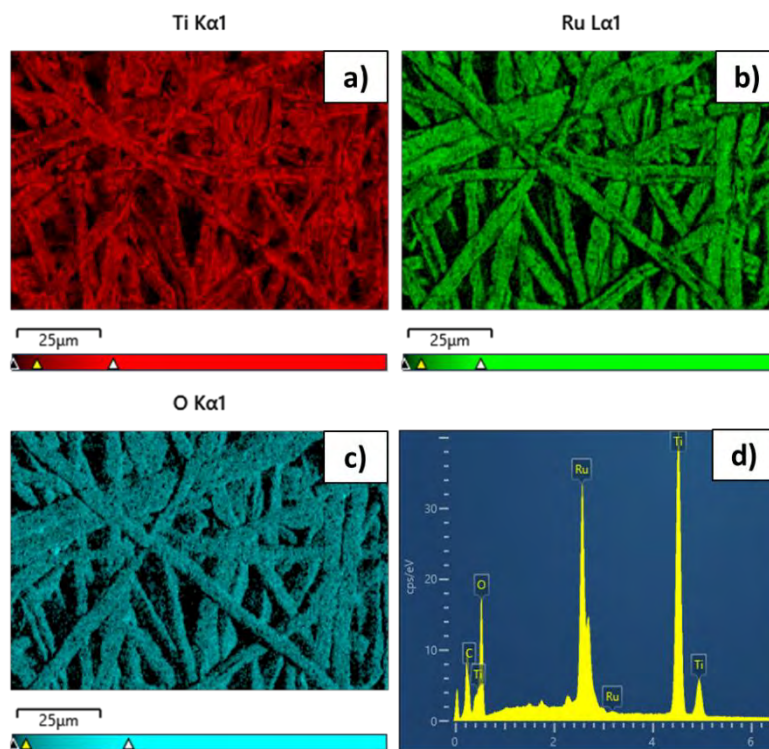


Figura 39. Mapeo elemental por EDS del electrodo E1.

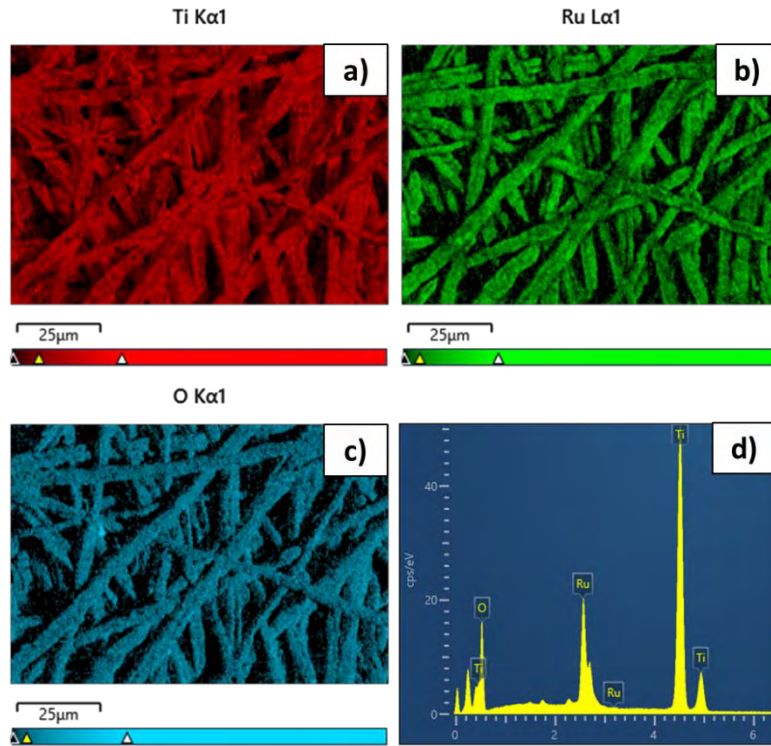


Figura 40. Mapeo elemental por EDS del electrodo E2.

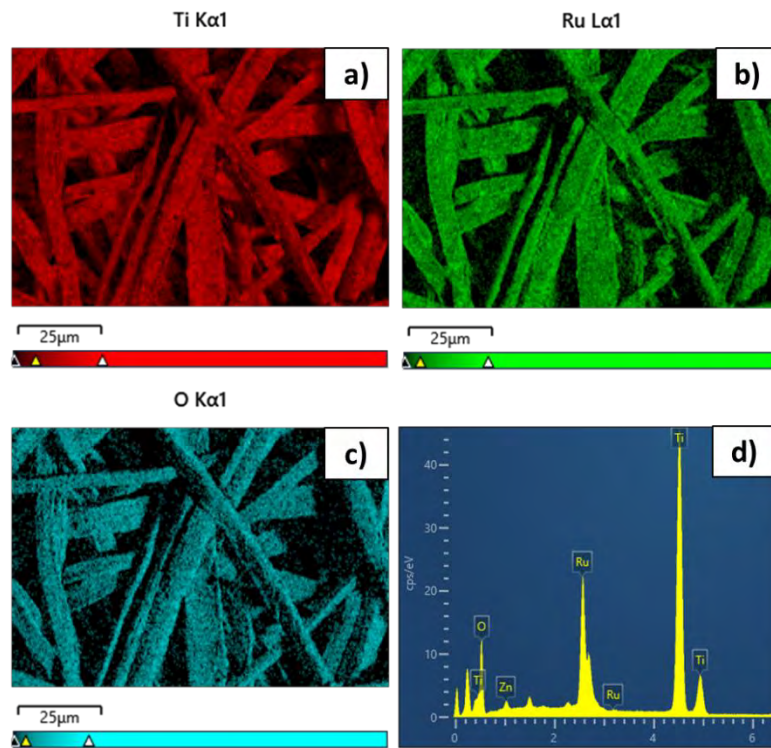


Figura 41. Mapeo elemental por EDS del electrodo E3.

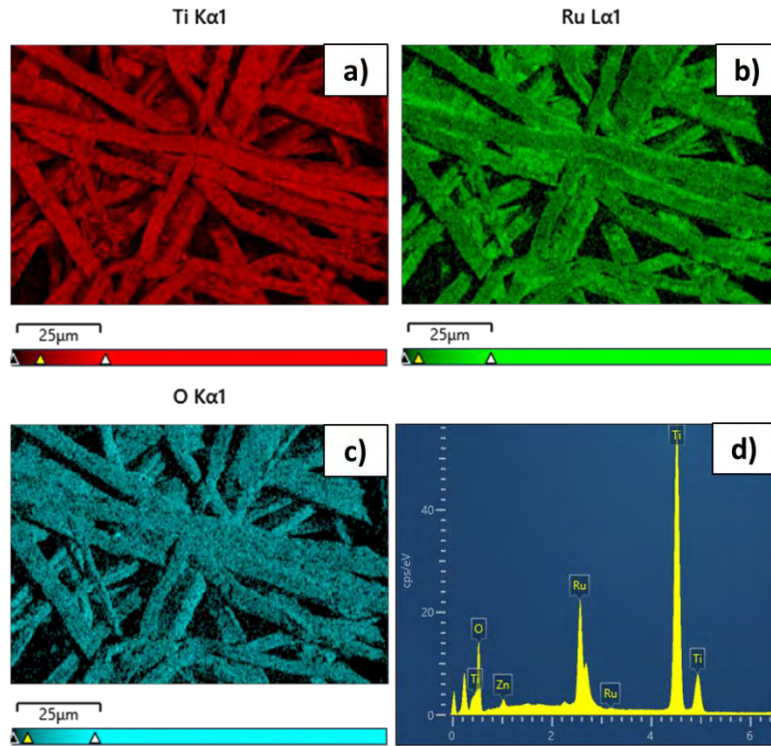


Figura 42. Mapeo elemental por EDS del electrodo E4.

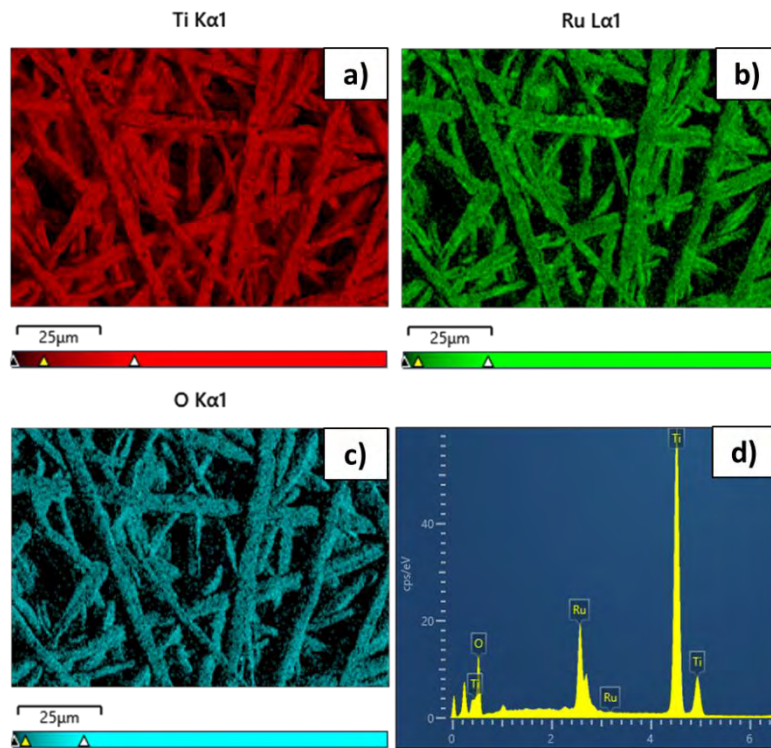


Figura 43. Mapeo elemental por EDS del electrodo E5.

c) Caracterización por Difracción de Rayos X (DRX)

Los difractogramas de los electrodos E1 y E2 que se fabricaron en la fase preliminar se muestran en la Figura 44, y los electrodos E3, E4 y E5 que se fabricaron en la fase final se muestran en la Figura 45. En todos los difractogramas se evidencia la coexistencia de tres contribuciones: la primera asociada al titanio metálico (Ti, COD 96-900-8518, P63/mmc, $a=2.950 \text{ \AA}$, $c=4.686 \text{ \AA}$) aportado por el fieltro utilizado como sustrato, la segunda al dióxido de titanio (TiO_2 , COD 96-410-2356, P42/mnm, $a=4.5888 \text{ \AA}$, $c=2.9576 \text{ \AA}$) el cual se forma cuando el fieltro es sometido a tratamientos térmicos a tiempos y temperaturas elevadas, y la tercera al óxido de rutenio (RuO_2 , COD 96-210-1931, P42/mnm, $a=4.4931 \text{ \AA}$, $c=3.1064 \text{ \AA}$) asociada a los depósitos obtenidos por el método de síntesis PPM.

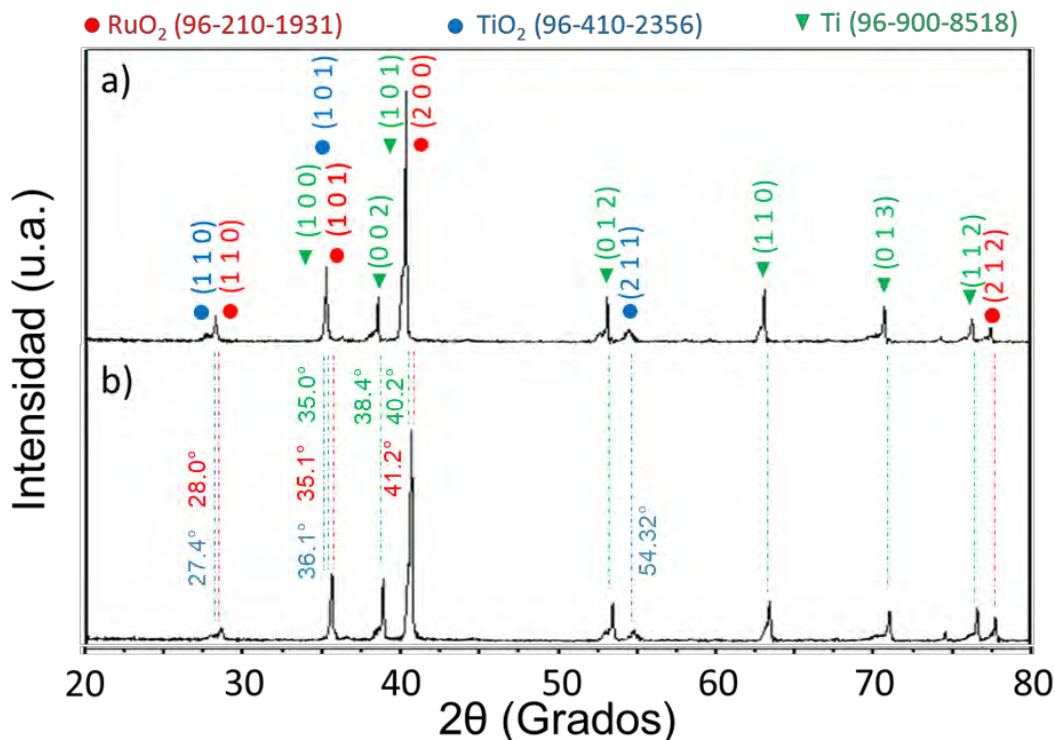


Figura 44. Difractogramas DRX y sus planos característicos de las fases RuO_2 (●), Ti metálico (▼) y TiO_2 (●) de los electrodos E1 (a) y E2 (b).

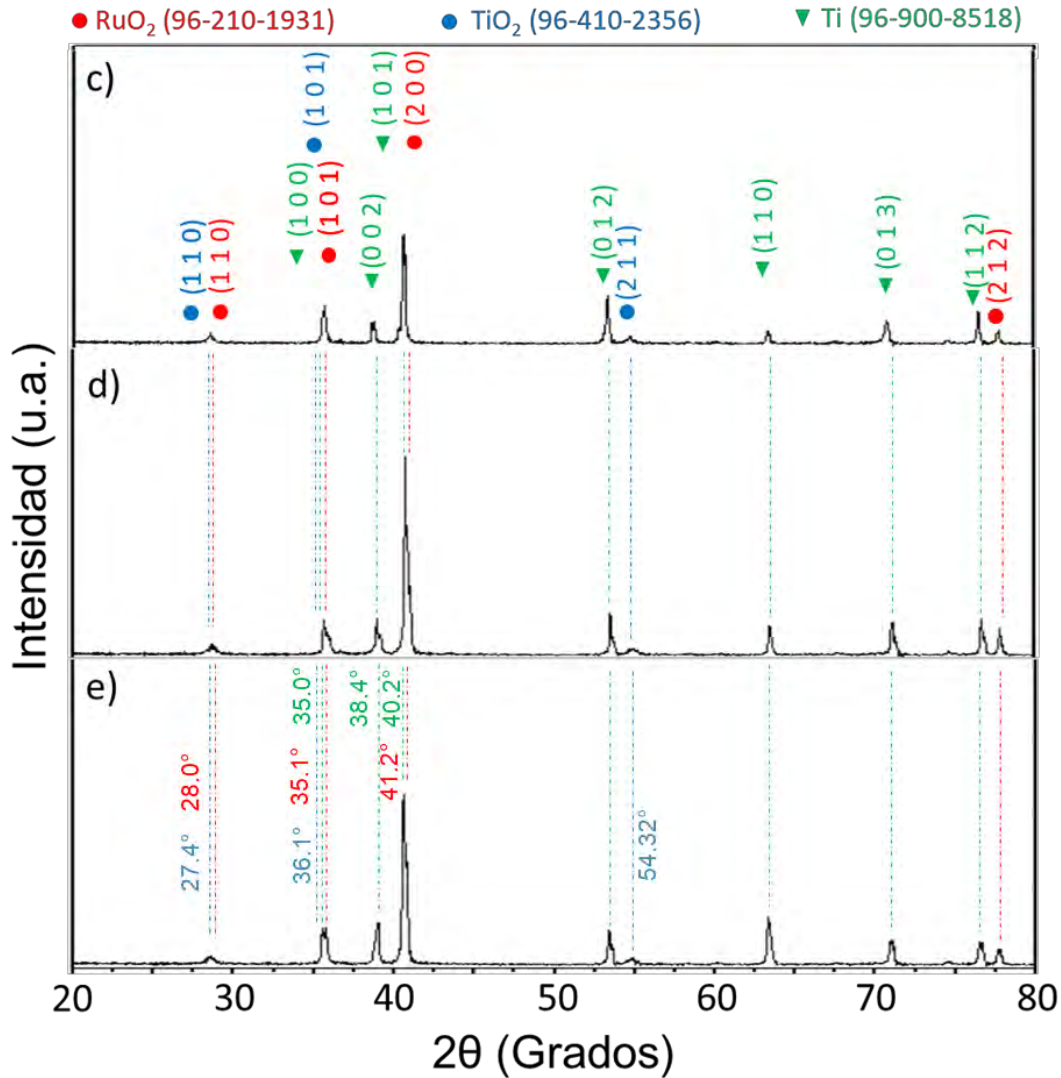


Figura 45. Difractogramas DRX y sus planos característicos de las fases RuO₂ (●), Ti metálico (▼) y TiO₂ (●) de los electrodos E3 (a), E4 (b) y E5 (c).

De acuerdo con la base de datos COD, el Ti metálico presenta una fase hexagonal, la cual suele tener los siguientes planos cristalográficos predominantes: (100) en 35.0°, (002) en 38.4°, (101) en 40.2°. Particularmente, todos los electrodos muestran planos cristalográficos en los ángulos de dispersión 2θ esperados para el Ti metálico. El pico de mayor intensidad en el difractograma corresponde al plano (101) localizado en 40.1°, seguido de los planos (100) y (002) localizados en 35.2° y 38.3° respectivamente.

Para el caso de los depósitos de RuO_2 , se identifica que pertenecen a la fase rutilo tetragonal, y suele tener los siguientes planos predominantes: (110) en 28.0° , (101) en 35.1° y (200) en 41.2° , los cuáles también aparecen en las muestras analizadas; no obstante, presentan diferencias entre cada una de ellas. Por un lado, el plano (101) localizado en 35.2° para el electrodo E1 (Figura 44a), tiene forma más delgada y presenta una mayor intensidad con respecto a los demás electrodos. Esto supone que tiene un mayor grado de cristalinidad y cristalitas de mayor tamaño, lo cual se confirma con la micrografía SEM de la Figura 38a, donde se aprecian aglomeraciones y partículas de mayor tamaño. Este resultado es opuesto a lo esperado, ya que el electrodo E2, se sintetizó a una mayor temperatura de 500°C y debería resultar en depósitos más cristalinos en comparación con el electrodo E1, que fue sintetizado a menor temperatura de 400°C .

Los difractogramas también muestran la presencia de TiO_2 tetragonal (color azul) donde suele tener los siguientes planos predominantes: (110) en 27.4° , (101) en 36.1° y (211) en 54.32° . Dichos planos también aparecen en todos los electrodos analizados; no obstante, el plano (110) aparece únicamente en el electrodo E1 (Figura 44a) con un pequeño pico en 27.5° . En los demás electrodos, al parecer, ocurre un traslape de picos debido a que la fase rutilo tetragonal tanto del TiO_2 como del RuO_2 suelen localizarse en un ángulo de dispersión 2θ similar. De igual forma, el plano (101) tiene un traslape triple con el Ti metálico y el RuO_2 por la misma razón.

Finalmente, los electrodos E3, E4 y E5, que fueron sintetizados bajo las mismas condiciones, presentan las mismas fases para el Ti, RuO_2 y el TiO_2 , salvo algunas variaciones leves en términos de la intensidad y anchura de los planos identificados. Esta diferencia en la intensidad de los picos podría atribuirse a que los electrodos fueron fabricados con un sustrato tipo fieltro poroso, compuesto por fibras entrecruzadas, lo que implica que la superficie no sea plana. Esto puede provocar un efecto de textura, donde los planos cristalográficos no se alinean de forma uniforme con el haz de rayos X, causando ligeros cambios en la intensidad y anchura de los picos.

d) Caracterización por Voltamperometría de Barrido Lineal (LSV)

En la Figura 46 se muestran las curvas de LSV de los cinco electrodos E1-E5 fabricados sobre un sustrato tipo PTL, analizados a una velocidad de barrido de 1 mV s^{-1} , en una solución de 0.5 M de H_2SO_4 . También se muestra la curva LSV del E9 fabricado con un sustrato de Ti tipo lámina, ya que fue el electrodo con mejor desempeño en las pruebas electroquímicas realizadas en la sección 4.1.3. Todos los electrodos fueron analizados en una ventana de potencial positiva hacia oxidación, hasta un potencial máximo de 1.4 V/Ag/AgCl . Adicionalmente, todas las curvas fueron transformadas al electrodo estándar de hidrógeno (SHE) con su respectiva corrección por caída óhmica (iR) aplicando la Ec. 40, en donde la resistencia óhmica (R_Ω) para cada uno de los electrodos fue determinada a partir las pruebas EIS que se muestran en el Anexo 2. Como consecuencia cada curva tiene un potencial máximo diferente versus el SHE- iR .

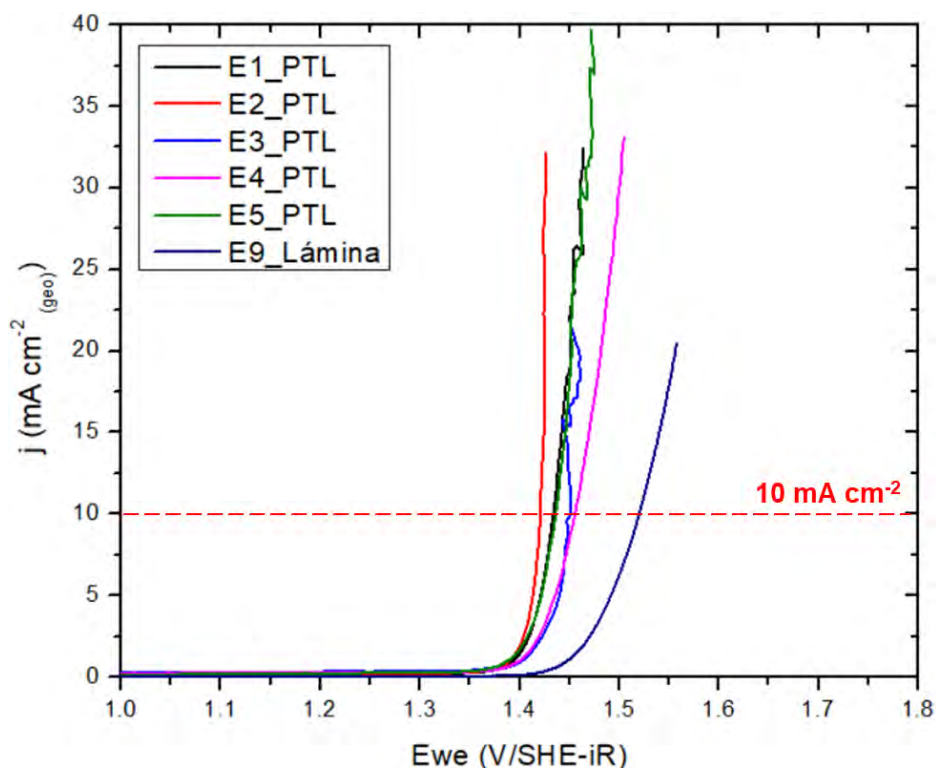


Figura 46. Curvas LSV de los electrodos E1-E5 sobre sustrato PTL de Ti y E9 sobre sustrato tipo lámina de Ti.

Se puede apreciar que todos los electrodos que fueron fabricados sobre un sustrato PTL tipo fieltro (E1-E5) mostraron mejor respuesta catalítica que el electrodo fabricado sobre un sustrato tipo lámina (E9), ya que demandan un menor potencial a una determinada densidad de corriente (curva se desplaza más hacia la izquierda). En la Tabla 18 se relacionan los potenciales demandados a una densidad de corriente de 10 mA cm^{-2} para cada uno de los electrodos fabricados. Se aprecia que el electrodo E9 demanda el mayor potencial con un valor de $1.52 \text{ V/SHE-iR @ } 10 \text{ mA cm}^{-2}$ en comparación con los demás. Adicionalmente, al comparar el potencial demandado entre los electrodos fabricados sobre el sustrato PTL, se observa que el electrodo E2 presenta el menor potencial (1.42 V/SHE-iR), mientras que E4 requiere el mayor valor (1.46 V/SHE-iR). No obstante, la diferencia de potencial entre ambos electrodos es relativamente pequeña; por lo tanto, se puede concluir que todos los electrodos exhiben un desempeño electroquímico favorable hacia la OER, requiriendo potenciales similares a una misma densidad de corriente de 10 mA cm^{-2} .

Tabla 18. Potencial y sobrepotencial de los electrodos E1-E5 $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$ y del electrodo E9 $\text{Ti}_{(\text{Lámina})}/\text{RuO}_2$ a una densidad de corriente de 10 mA cm^{-2} .

Electrodo	E/SHE-iR @ 10 mA cm^{-2} (V)	η /SHE-iR @ 10 mA cm^{-2} (V)
E1	1.43	0.317
E2	1.42	0.304
E3	1.45	0.334
E4	1.46	0.339
E5	1.44	0.320
E9_Lámina	1.52	0.403

La pendiente de Tafel fue calculada para cada uno de los electrodos sintetizados a partir de las curvas de Voltamperometría de Barrido Lineal (Figura 46) obtenidas previamente. Este parámetro electroquímico proporciona información sobre la cinética de la reacción, indicando la rapidez con la que la densidad de corriente aumenta en respuesta a un incremento del sobrepotencial. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 19, donde se observa que todos los ajustes lineales de la ecuación de la pendiente de Tafel mostrada en la Ec. 32, presentan un excelente grado de correlación con coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.99.

Tabla 19. Parámetros de la pendiente de Tafel de los electrodos E1-E5 $Ti_{(PTL)}/RuO_2$ y del electrodo E9 $Ti_{(Lámina)}/RuO_2$.

Electrodo	Pendiente Tafel ($mV\ dec^{-1}$)	Rango de ajuste, η (V)	$\eta = a + b \log(j)$		R^2
			a (mV)	b ($mV\ dec^{-1}$)	
E1	39.2	0.275 - 0.300	a = 277 b = 39.2	0.9995	
E2	32.5	0.275 - 0.300	a = 274 b = 32.5	0.9975	
E3	51.0	0.275 - 0.332	a = 286 b = 51.0	0.9945	
E4	51.0	0.275 - 0.320	a = 283 b = 51.0	0.9995	
E5	46.9	0.275 - 0.320	a = 272 b = 46.9	0.9994	
E9_Lámina	56.3	0.310 - 0.370	a = 332 b = 56.3	0.9965	

De igual forma, en la Figura 47 se muestran las pendientes de Tafel en una gráfica que relaciona el sobrepotencial (η) en función del logaritmo de la densidad de corriente obtenida en los experimentos previos. Se puede apreciar que los

electrodos E1 y E2 muestran un mejor comportamiento catalítico hacia la OER, al tener las pendientes de Tafel más bajas con respecto a los demás, con valores de 32.5 mV dec^{-1} y 39.2 mV dec^{-1} , respectivamente. Esto quiere decir que los electrodos E1 y E2, requieren un menor incremento de sobrepotencial para aumentar la densidad de corriente en un orden de magnitud. De igual forma, se observa que todos los electrodos fabricados usando como sustrato las PTL (E1-E5), muestran una menor pendiente de Tafel con respecto al electrodo E9 que fue fabricado sobre una lámina de Ti, reflejando nuevamente que el electrodo E9, tiene una cinética de reacción más desfavorable hacia la OER en comparación con los demás.

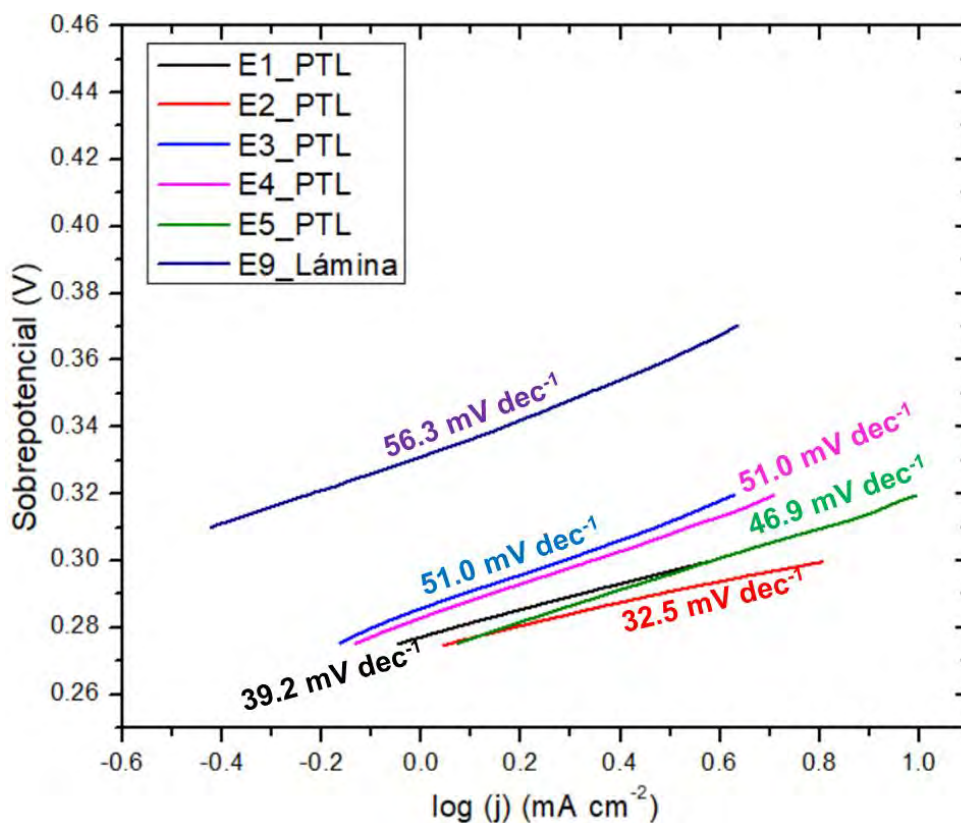


Figura 47. Pendiente de Tafel de los de los electrodos E1-E5 $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$ y del electrodo E9 $\text{Ti}_{(\text{Lámina})}/\text{RuO}_2$.

Pese a las diferencias de la pendiente de Tafel entre los electrodos fabricados en este proyecto, cabe resaltar que todos se encuentran dentro del rango esperado para los electrocatalizadores de RuO₂, el cual está comprendido entre 30 y 60 mV dec⁻¹ (Fang & Liu, 2010). En la Figura 48 se muestra la comparación entre cada una de las pendientes de Tafel con respecto al rango esperado por la literatura.

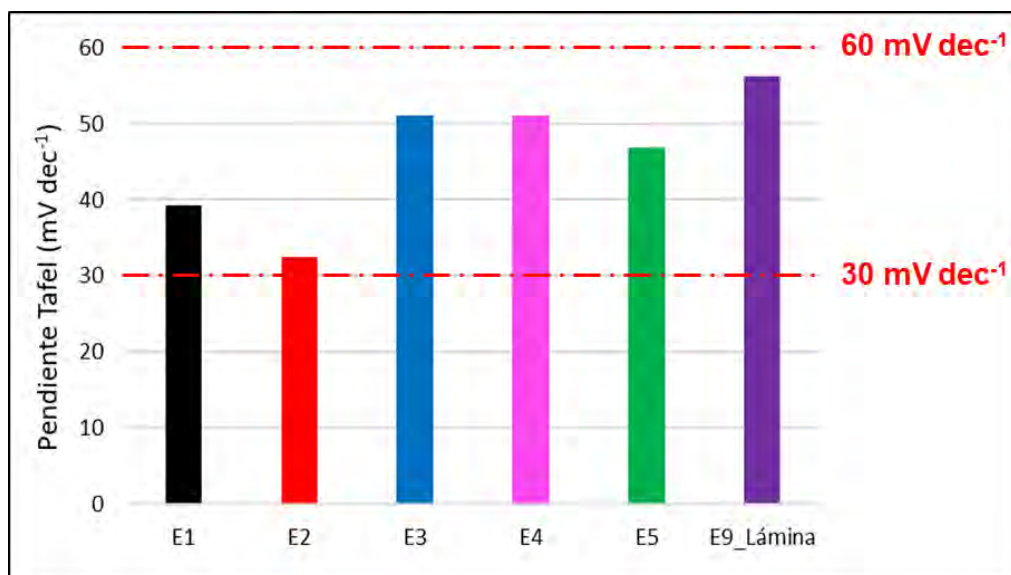


Figura 48. Comparación de la pendiente de Tafel de los electrodos E1-E5 Ti_(PTL)/RuO₂ y del electrodo E9 Ti_(Lámina)/RuO₂.

Adicionalmente, en la Tabla 20 se hace una comparación entre las pendientes de Tafel de los electrodos E1-E5 fabricados con electrocatalizadores de RuO₂, con respecto a otros electrocatalizadores a base de Ru encontrados en la literatura. Es válido resaltar que, en términos generales, los electrodos E1-E5 (iluminados de color verde) tienen una menor pendiente de Tafel con respecto a los demás que fueron fabricados a partir de diferentes rutas de síntesis, con el objetivo de mejorar su desempeño catalítico hacia la OER, como por ejemplo, en trabajos de investigación donde utilizan dopamiento con paladio (Pd) (Y. Liu *et al.*, 2024), métodos de síntesis enfocados en la incorporación de otros metales como el boro (B) (Chen *et al.*, 2020), la incorporación de metales nobles como el iridio (Ir) en una

estructura tipo corteza/núcleo (Teng *et al.*, 2023), o en trabajos donde sintetizan electrocatalizadores de IrRuOx sobre sustratos tipo polvo como el TiO₂ para aumentar el ECSA (Martínez-Séptimo *et al.*, 2021).

Tabla 20. Comparación de las pendientes de Tafel de los electrodos E1-E5 Ti_(PTL)/RuO₂ con respecto a otros trabajos de investigación.

Catalizador	Pendiente de Tafel (mV Dec ⁻¹)	Referencias
E2	32.5	Este trabajo (Ti_PTL)
E1	39.2	Este trabajo (Ti_PTL)
RuB₂	39.8	Chen et al., 2020
E5	46.9	Este trabajo (Ti_PTL)
RuO₂ Comercial	48.3	Dehkordi et al., 2024
E3	51.0	Este trabajo (Ti_PTL)
E4	51.0	Este trabajo (Ti_PTL)
Pd_{0.08}Ru_{0.92}O₂	51.7	Y. Liu et al., 2024
RuOx-400	55.0	(S. Hou et al., 2022
E9_Lámina	56.3	Este trabajo (Ti_Lámina)
RuO₂@IrO₂ 300°C	57.2	Teng et al., 2023
RuOx-350	61.0	(S. Hou et al., 2022
IrO₂-RuO₂	66.0	Martínez-Séptimo et al., 2021
IrRuOx/TNT	68.9	Dehkordi et al., 2024
IrRuO_x/TiO₂	71.0	Martínez-Séptimo et al., 2021
RuOx-450	79.0	(S. Hou et al., 2022

Adicionalmente, la pendiente de Tafel permite estimar cuál es el paso determinante de la velocidad de reacción de la OER, donde su mecanismo de reacción se muestra en la sección 1.5. En consecuencia, el tercer paso donde se forma el oxígeno adsorbido (Ec. 17) se asocia a los electrodos E1 y E2, y el segundo paso donde el hidroxilo cambia de estado de energía de M*OH* a M*OH (Ec. 16) se asocia a los electrodos E3, E4 y E5.

e) Caracterización por Voltamperometría Cíclica (CV)

En la Figura 49 se muestran las curvas CV realizadas a los cinco electrodos E1-E5 fabricados, aplicando una velocidad de barrido de 10 mV s^{-1} y 10 ciclos, en una solución de 0.5 M de H_2SO_4 . Las gráficas relacionan la densidad de corriente versus el potencial, que fue ajustado con respecto al electrodo estándar de hidrógeno (SHE) y su respectiva corrección por caída óhmica (iR). Dada la misma naturaleza de los electrocatalizadores de RuO_2 sobre el sustrato de Ti, en todos los electrodos fabricados se aprecia un comportamiento similar. En el rango de potenciales de 0.2 a 1.0 V/SHE, se aprecia una densidad de corriente relativamente baja y plana, siendo característica de un comportamiento pseudocapacitivo. En la figura se observan dos líneas punteadas, una a 0.6 V/SHE y la otra a 0.78 V/SHE, las cuales están asociadas a las transiciones Ru(III)/Ru(IV) y Ru(IV)/Ru(VI) , respectivamente. No obstante, cabe resaltar que, aunque son transiciones presentes, estas aparecen poco definidas, es decir, sin picos agudos o ausencia de densidad de corriente a medida que aumentan los ciclos, lo que indicaría que ocurren de forma pseudocapacitiva, característica de recubrimientos heterogéneos, con buena adherencia al PTL y electroquímicamente estables.

A potenciales mayores a 1.4 V/SHE, se aprecia un incremento abrupto en la densidad de corriente anódica en todos los electrodos, marcando el inicio de la OER. No obstante, tomando como referencia el máximo potencial al que fueron analizados (1.4 V/Ag/AgCl), los electrodos E1 y E5, muestran un incremento en la densidad de corriente a medida que incrementan los ciclos, siendo un comportamiento característico de una activación progresiva del electrocatalizador de RuO_2 . Caso opuesto, en caso de que se presente una disminución de la densidad de corriente conforme incrementan el número de ciclos, representaría un deterioro o desactivación del electrocatalizador, situación que no se observa en las curvas. Por otro lado, los electrodos E2, E3 y E4, muestran buena estabilidad al potencial máximo analizado (1.4 V/Ag/AgCl), al mostrar una sobreposición de señales en términos de densidad de carga.

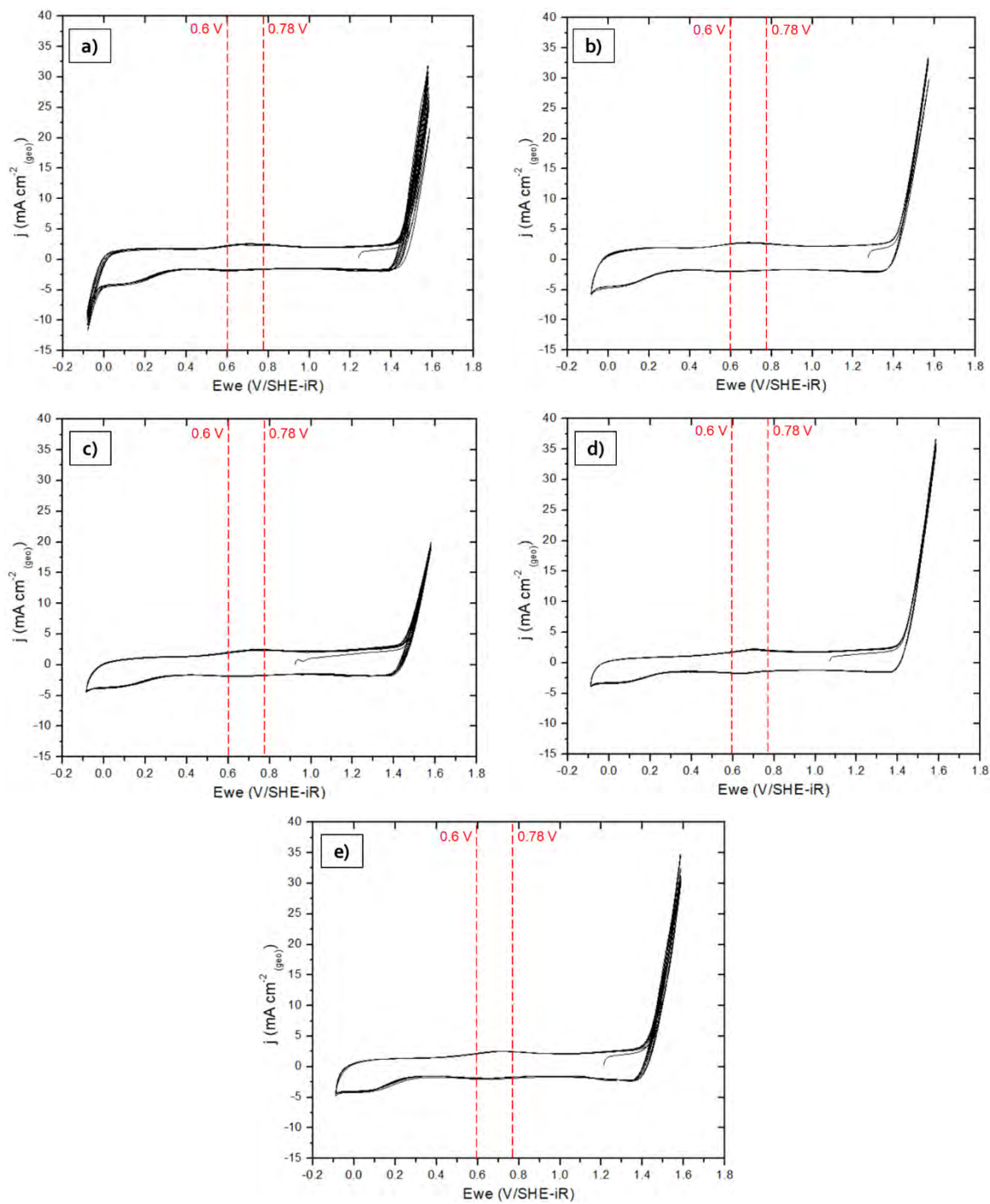


Figura 49. Curva CV de los electrodos E1-E5 $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$. Las figuras corresponden a: E1 (a), E2 (b), E3 (c) E4 (d) y E5 (e).

f) Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

Los electrodos fueron evaluados por medio de la técnica EIS, aplicando un potencial constante frente a una variación de frecuencia de 1 MHz a 0.01 Hz. Se realizaron dos pruebas, la primera, a un potencial de 1.2 V/Ag/AgCl (1.409 V/SHE), y la segunda, a un potencial de 1.3 V/Ag/AgCl (1.509 V/SHE). Los potenciales fueron seleccionados tomando como referencia el potencial de inicio de la OER a partir de las curvas LSV para cada uno de los electrodos.

Los resultados de estas pruebas fueron graficados a través de los diagramas de Nyquist (Anexo 1 y Anexo 2) donde en las abscisas se representa la parte real de la impedancia (Z') en unidades de Ohm cm^2 , y en las ordenadas se representa la parte imaginaria de la impedancia (Z'') en unidades de Ohm cm^2 . Adicionalmente, es importante destacar, que cada punto del gráfico representa una frecuencia distinta (de alta a baja frecuencia). A partir de esta prueba, fue determinada la resistencia óhmica (R_Ω) la cual fue empleada para transformar el potencial medido frente al electrodo de referencia de Ag/AgCl al potencial del electrodo estándar de hidrógeno, con su respectiva corrección por caída óhmica ($\text{SHE}-iR$).

Teniendo en cuenta que durante el análisis de los difractogramas de DRX se identificaron tres fases diferentes en los electrodos, correspondientes a RuO_2 , TiO_2 y el Ti metálico, es posible asumir que dos procesos físicamente diferenciables controlan la respuesta electroquímica de los electrodos E1-E5 hacia la OER. En consecuencia, los resultados EIS fueron ajustados mediante un modelo de circuito eléctrico equivalente con dos constantes de tiempo como el que se muestra en la Figura 50. Cabe resaltar que este modelo ha sido también utilizado por otros autores para el modelado de la OER mediante circuitos equivalentes (Doyle & Lyons, 2013).

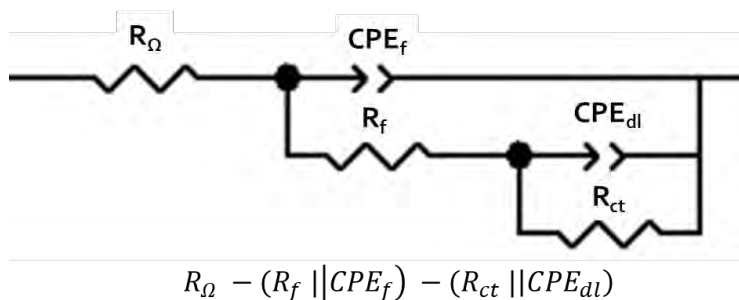


Figura 50. Modelo de ajuste de resultados EIS en un circuito equivalente de dos constantes de tiempo para los electrodos E1-E5 Ti_(PTL)/RuO₂.

De acuerdo con el modelo, la primera constante de tiempo de alta frecuencia, es ($R_f || CPE_f$), y se asocia a la película que se forma entre el electrocatalizador de RuO₂ y el electrolito, y la segunda constante de tiempo de media/baja frecuencia, es ($R_{ct} || CPE_{dl}$), y se asocia a la transferencia de carga y a la cinética de la OER. Alobaid *et al.* (2018) también utilizó un modelo de circuito equivalente de dos constantes de tiempo para la OER, donde la aparición de dos semicírculos en sus experimentos también se asoció tanto a la heterogeneidad de sus depósitos (primer semicírculo a altas frecuencias) como también, a la resistencia a la transferencia de carga en la interfaz electrodo/electrolito (segundo semicírculo a bajas frecuencias). Cabe resaltar que en los resultados EIS para los electrodos E1-E5, no se evidencian resistencias fuertes asociadas al transporte de masa, al no presentarse incrementos drásticos a baja frecuencia característicos de este fenómeno. Los parámetros asociados al modelo se describen a continuación (Godula-Jopek, 2015; Scribner Associates, 2025):

- R_{Ω} , representa la resistencia óhmica asociada a la resistencia de la solución y de los contactos eléctricos de la celda.
- R_f , representa la resistencia interfacial de la película que se forma entre el electrocatalizador de RuO₂ y el electrolito.

- CPE_f , representa un elemento de fase constante no ideal, asociado a la contribución capacitiva distribuida del óxido y heterogeneidad del depósito de RuO_2 .
- R_{ct} , representa la resistencia a la transferencia de carga asociada a la cinética OER e interfase $RuO_2/TiO_2/Ti$.
- CPE_{dl} , representa un elemento de fase constante no ideal, asociado a la doble capa eléctrica, contribución pseudocapacitiva superficial debido a procesos de adsorción en la superficie de los depósitos de RuO_2 .
- Los exponentes $nCPE_f$ y $nCPE_{dl}$, representan qué tan ideal se comporta el elemento de fase constante, mientras más cercano está a la unidad representa mayor idealidad.

El ajuste de los resultados EIS mediante circuitos eléctricos equivalentes se realizó usando el software Zview 4; resultados que se muestra en el Anexo 3 a un potencial de 1.2 V/Ag/AgCl, y en el Anexo 4 a un potencial de 1.3 V/Ag/AgCl. Cabe resaltar que los diagramas de Nyquist muestran la existencia de dos semicírculos, donde el primer semicírculo, asociado a la primera constante de tiempo, se produce debido a la formación de la película entre el electrocatalizador de RuO_2 y el electrolito. El segundo semicírculo, asociado a la segunda constante de tiempo, se atribuye a la transferencia de carga y a la cinética de la OER.

El resumen de los ajustes mediante circuitos eléctricos equivalentes a diferentes potenciales se muestra en la Figura 51. En todas las figuras se aprecia un buen ajuste entre los datos experimentales (color negro y azul) y los datos del modelo (color rojo y rosado), ya que visualmente se aprecia una superposición entre las curvas proporcionadas por el modelo y las curvas obtenidas experimentalmente. De igual forma, en la Tabla 21, que relaciona los parámetros de ajuste del modelo, se aprecia que el chi-cuadrado reducido (X^2_{red}) muestra valores comprendidos en un orden de magnitud de 10^{-6} y 10^{-4} , siendo considerablemente bajos, lo que se traduce en un buen ajuste del modelo.

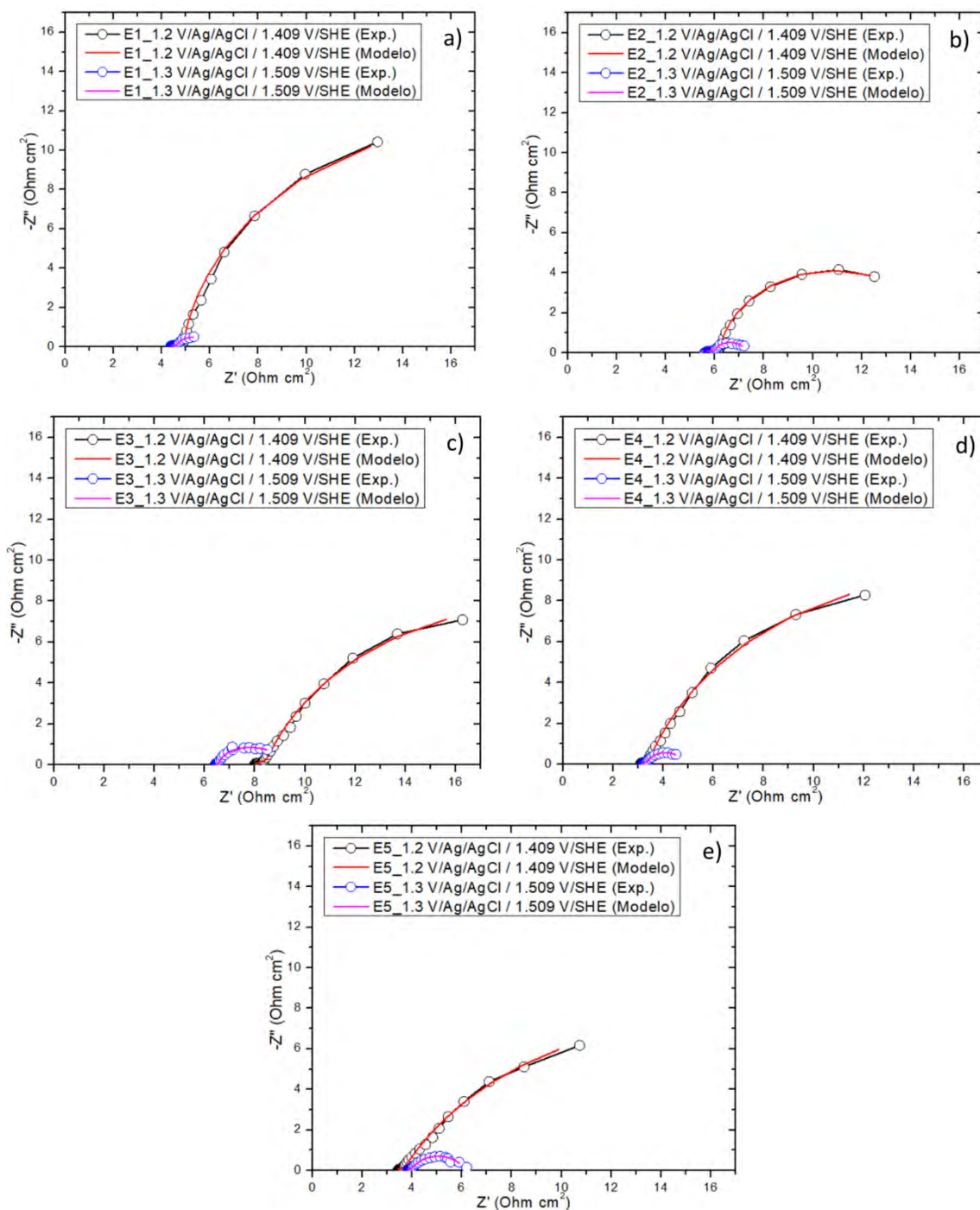


Figura 51. Ajuste de resultados EIS en un circuito eléctrico equivalente de dos constantes de tiempo a 1.2 V/Ag/AgCl y 1.3 V/Ag/AgCl. Las imágenes corresponden a: E1 (a), E2 (b), E3 (c), E4 (d) y E5 (e).

Tabla 21. Resultados del ajuste del EIS a un circuito equivalente con dos constantes de tiempo para la OER y su respectivo error relativo para los electrodos E1-E5 $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$.

Electrodo	E (V/Ag/AgCl V/SHE)	R_{Ω} ($\Omega \text{ cm}^2$)	R_f ($\Omega \text{ cm}^2$)	R_{ct} ($\Omega \text{ cm}^2$)	CEP_f ($\text{F cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	$n\text{CEP}_f$	CEP_{dl} ($\text{F cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	$n\text{CEP}_{dl}$	$\chi^2 \text{ red}$
E1	1.2	4.56 ± 0.04	0.36 ± 0.08	25.61 ± 1.30	0.01 ± 0.02	0.76 ± 0.18	0.17 ± 0.02	0.93 ± 0.03	1.33E-04
	1.409								
E2	1.3	4.34 ± 0.02	0.29 ± 0.04	1.32 ± 0.06	0.02 ± 0.01	0.64 ± 0.08	0.25 ± 0.02	0.81 ± 0.03	6.53E-06
	1.509								
E3	1.2	8.04 ± 0.06	0.46 ± 0.21	21.40 ± 1.17	0.02 ± 0.04	0.75 ± 0.30	0.16 ± 0.04	0.79 ± 0.05	9.89E-05
	1.409								
E4	1.3	3.11 ± 0.03	0.33 ± 0.12	24.84 ± 1.03	0.02 ± 0.03	0.79 ± 0.23	0.15 ± 0.03	0.80 ± 0.03	1.65E-04
	1.509								
E5	1.3	3.17 ± 0.01	0.28 ± 0.10	1.43 ± 0.07	0.05 ± 0.04	0.73 ± 0.12	0.12 ± 0.04	0.83 ± 0.06	6.57E-06
	1.509								
E5	1.2	3.51 ± 0.01	0.34 ± 0.18	23.28 ± 2.08	0.03 ± 0.06	0.67 ± 0.25	0.17 ± 0.06	0.70 ± 0.05	2.81E-04
	1.409								
E5	1.3	3.83 ± 0.06	0.17 ± 0.20	2.15 ± 0.20	0.02 ± 0.08	0.82 ± 0.71	0.16 ± 0.08	0.72 ± 0.05	1.19E-04
	1.509								

Los resultados del ajuste del EIS mostrados en la Tabla 21, muestran que la resistencia óhmica (R_{Ω}) es independiente del potencial aplicado ya que no varía considerablemente en función al potencial aplicado durante la prueba. Esto demuestra que el montaje experimental, principalmente de los electrodos E1, E2, E4 y E5, no contribuyó a un aumento de la resistencia óhmica de la celda electrolítica. No obstante, el electrodo E3, presenta una R_{Ω} de 8.04 $\Omega \text{ cm}^2$ a un potencial de 1.2 V/Ag/AgCl y una R_{Ω} de 6.36 $\Omega \text{ cm}^2$ a un potencial de 1.3 V/Ag/AgCl, diferencia que es atribuida al conexionado eléctrico de la prueba, ya que ambas mediciones fueron realizadas utilizando el mismo electrolito (solución de 0.5 M H_2SO_4) pero con un diferente conexionado experimentalmente.

Con respecto a la primera constante de tiempo ($R_f || CPE_f$), la cual es asociada a la formación de la película entre el electrocatalizador de RuO_2 y el electrolito (primer semicírculo en el diagrama de Nyquist), se observa que la resistencia interfacial (R_f) no tiene una contribución relevante para ningún electrodo evaluado a cualquier potencial aplicado (1.2 V/Ag/Cl y 1.3 V/AgCl), puesto que varía en un rango pequeño entre un valor mínimo de $0.17 \Omega \text{ cm}^2$ para el electrodo E5 y un valor máximo de $0.46 \Omega \text{ cm}^2$ para el electrodo E3. De igual forma, el elemento de fase constante asociado a la contribución capacitiva distribuida del óxido y a la heterogeneidad del depósito de RuO_2 (CPE_f), se observa que presenta valores pequeños comprendidos entre $0.01 \text{ F cm}^{-2} \text{ s}^{n-1}$ para el electrodo E1 y $0.20 \text{ F cm}^{-2} \text{ s}^{n-1}$ para el electrodo E3, siendo valores típicos de capas delgadas de óxido. Este planteamiento también lo hace Palma-Goyes & *et al.* (2016) en su investigación en relación a los depósitos de RuO_2 , donde no son lo suficientemente porosos como para que esta constante de tiempo sea representativa. No obstante, los exponentes ($nCPE_f$) indican que los depósitos están lejos de ser homogéneos (< 1.0), al presentar valores comprendidos entre 0.41 y 0.82, reflejando una latente heterogeneidad y porosidad en los depósitos de RuO_2 , fenómeno que también se observa en las micrografías obtenidas previamente en el análisis SEM.

Caso contrario ocurre con la segunda constante de tiempo, asociada a la transferencia de carga y cinética de la OER (segundo semicírculo predominante), donde la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) predomina en el sistema con los valores más altos con respecto a las demás resistencias. Se aprecia que la R_{ct} tiene un mayor orden de magnitud, alrededor de $\sim 20 \Omega \text{ cm}^2$ a 1.2 V/Ag/AgCl. No obstante, esta disminuye fuertemente un orden de magnitud al incrementar el potencial aplicado. Este comportamiento también ha sido observado por Palma-Goyes & *et al.* (2016), indicando que se debe a una aceleración la cinética de la OER debido al incremento del potencial. Por ejemplo, la R_{ct} del electrodo E1 disminuye de 25.61 a $1.32 \Omega \text{ cm}^2$, conforme a un incremento de potencial de 1.2 a 1.3 V/Ag/AgCl respectivamente. Esta disminución puede significar que la tasa de transferencia electrónica se incrementó de forma proporcional al aumento del

potencial, comportamiento que sigue la ecuación de Butler-Volmer, tal como lo explica Martínez-Séptimo *et al.* (2021) en su investigación.

En términos generales, las pruebas EIS muestran una menor contribución capacitiva (Z'' imaginaria) frente a la contribución resistiva (Z' real), indicando que la OER está limitada principalmente por la resistencia total del sistema (R_{Ω} , R_f y R_{ct}), y no por procesos capacitivos asociados a la heterogeneidad de los depósitos de RuO_2 y/o procesos de adsorción/desorción en la superficie del catalizador (Palma-Goyes & *et al.*, 2016). Aunque los parámetros que se relacionan en la Tabla 21 no tienen diferencias considerables entre cada uno de los electrodos, se observa que el E2, presenta el menor R_{ct} con respecto a lo demás. Este comportamiento implica que la reacción electroquímica para el E2 hacia la OER ocurre más fácilmente, lo cual es coherente con los resultados obtenidos previamente, ya que el E2 presentó la menor pendiente de Tafel (32.5 mV dec^{-1}) y el menor potencial (1.42 V) a una densidad de corriente de 10 mA cm^{-2} .

g) Área Superficial Electrocatalítica Activa (ECSA)

La determinación del ECSA se realizó mediante la técnica CV, utilizando una solución entre ferricianuro de potasio ($\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) al 0.005 M y cloruro de potasio (KCl) al 0.1 M como electrolito soporte. La prueba CV se realizó a diferentes velocidades de barrido (5, 10, 25, 50, 75 y 100 mV/s) y haciendo purgas con nitrógeno (N_2) gaseoso para eliminar el O_2 disuelto en la solución y de esta forma asegurar que la medición sea limpia y reproducible. La prueba consistió en reducir y oxidar cíclicamente el par redox involucrado en la reacción, $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} / ([\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-})$, ya que es reversible y que puede ser reducido y oxidado mediante procesos de transferencia de electrones, evitando otras contribuciones internas debido a su tamaño molecular grande. Teniendo en cuenta que la corriente pico (i_p) tanto anódica como catódica, suele ser proporcional al ECSA, esta fue calculada utilizando la ecuación de Randles-Sevcik (Ec. 38).

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 22, donde se observa que el electrodo E3 exhibe un ECSA mayor, con un valor de 27.6 cm². En orden de mayor a menor ECSA, los electrodos se disponen de la siguiente manera: E3 > E1 > E5 > E4 > E2. Este resultado puede atribuirse a que el sustrato PTL tipo fieltro utilizado para la fabricación del electrodo E3 tiene la menor porosidad (50-60 %) con respecto a los demás electrodos, lo que aportaría mayor área del sustrato en el cual se puedan formar una mayor cantidad de depósitos de RuO₂. Adicionalmente, es acorde con los resultados obtenidos mediante la caracterización EDS donde muestra que el electrodo E3 muestra la mayor proporción de átomos de Ru (Tabla 17).

Tabla 22. ECSA de los E1-E5 Ti_(PTL)/RuO₂ medidas en una solución de ferricianuro de potasio (K₃[Fe(CN)₆] al 0.005 M y cloruro de potasio (KCl) al 0.1 M.

Electrodo	ECSA, cm²
E1	14.4
E2	4.8
E3	27.6
E4	10.3
E5	12.7

Los electrodos fabricados en la fase preliminar de síntesis, mostraron un orden de ECSA de mayor a menor de E1 > E2, lo cual resulta contrario a lo esperado, ya que E2 exhibió una mejor actividad catalítica al presentar una pendiente de Tafel menor (32.5 mV dec⁻¹) frente a 39.2 mV dec⁻¹ de E1, así como un potencial más bajo a 10 mA cm⁻² (1.42 V frente a 1.43 V). Esta discrepancia podría atribuirse a que las muestras fueron analizadas después de su evaluación electroquímica y de otras técnicas analíticas, como SEM, EDS y DRX, lo cual pudo desprender depósitos de

RuO₂ debido a manipulación de la muestra. Por otro lado, los electrodos fabricados en la fase final, presentan un orden de ECSA de mayor a menor de E3 > E5 > E4, lo cual supone que sus diferencias se deben principalmente a la porosidad del sustrato ya que su síntesis se realizó de forma simultánea.

4.2.3 Etapa C: Pruebas de desempeño en el electrolizador PEM

En la etapa C, se integraron y evaluaron los electrodos fabricados en este proyecto utilizando en un ensamble membrana-electrodos (MEA) mixto en el electrolizador de prueba tipo PEM. Sin embargo, para poder comparar el desempeño del MEA mixto, también se realizaron pruebas de desempeño utilizando un MEA convencional, el cual se utilizó como línea base y punto de comparación. Por lo tanto, esta etapa del proyecto se desarrolló siguiendo las siguientes subetapas:

- a) Fabricación de un MEA convencional
- b) Realización de curvas de polarización usando un MEA convencional
- c) Realización de curvas de polarización usando un MEA mixto

a) Fabricación del MEA convencional

La fabricación de un MEA convencional, inició con la activación de la membrana Nafion™ 115 para mejorar la eficiencia electroquímica en el electrolizador PEM y aumentar la conductividad iónica de la celda, es decir, la transferencia de los protones (H⁺) a través de la misma. A grosso modo, las membranas se cortaron con un área geométrica de 6 x 6 cm² y fueron sometidas a una serie de limpiezas consecutivas en inmersión a 80°C utilizando diferentes soluciones. El orden de las soluciones fue el siguiente: solución de ácido nítrico (HNO₃) a 0.1 M, solución de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 3 %v y solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄) a 0.5 M.

Cada lavado se realizó por un tiempo de 1 hora, con pasos intermedios de lavados con agua desionizada en inmersión a 80 °C durante 1 hora.

Posteriormente, se preparó una tinta catalítica a partir de óxidos de rutenio previamente pulverizados, isopropanol, nafion líquido y agua. La tinta obtenida se aplicó sobre el lado anódico de la membrana mediante la técnica de aerografía, depositando RuO₂ como material catalítico. En el lado catódico, se utilizó una tela de carbono/platino al 40 % comercial, la cual fue compactada mediante una prensa de compresión térmica. En este proyecto se fabricaron dos membranas a una concentración del 100 % de RuO₂ como electrocatalizadores anódicos, las cuales fueron llamadas M1 y M2. Una imagen de las membranas se muestra en la Figura 52.

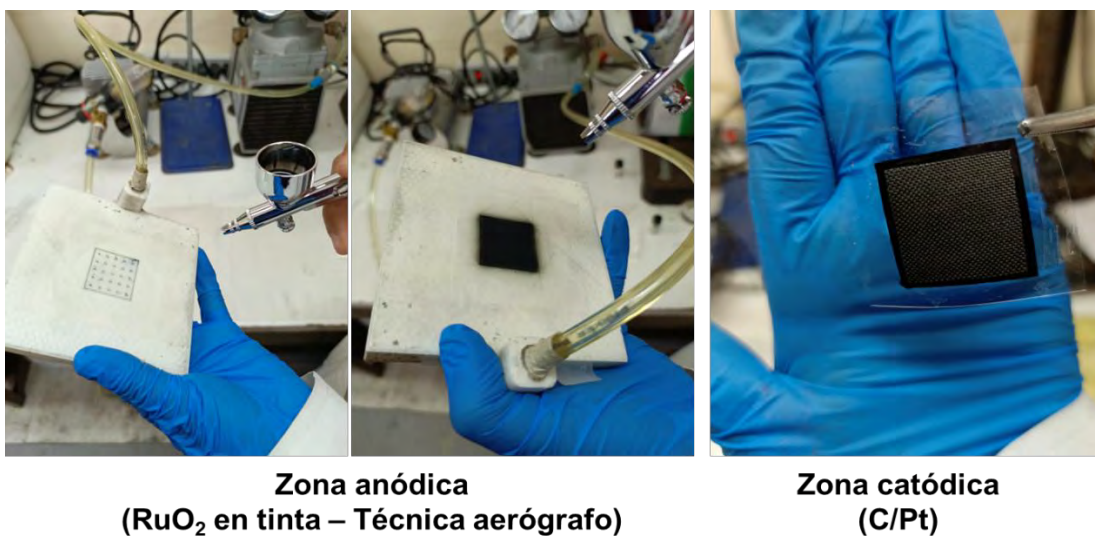


Figura 52. Proceso de fabricación de las membranas M1 y M2: lado anódico (RuO₂) y lado catódico (C/Pt).

Posteriormente, se realizó el ensamble usando un MEA convencional, como se muestra en la Figura 28, compuesto por las membranas M1 y M2 previamente fabricadas (Figura 52) y la incorporación de dos fieltros de titanio/platinado (PTL) a cada lado de la membrana.

b) Curva de polarización del electrolizador PEM - MEA convencional

Las curvas de polarización fueron realizadas en modo galvanostático, es decir, variando la densidad de corriente y midiendo el potencial de celda como variable de respuesta, tal como se recomienda en el método de ensayo estandarizado para la obtención de curvas de polarización de la Unión Europea (Malkow T *et al.*, 2018). Se tomó como potencial máximo un valor de 2.3 V, ya que a potenciales mayores, los catalizadores de Ru comienzan a degradarse, tal como se explicó en la sección 1.4.3. En esta subetapa, las curvas se realizaron por duplicado, con el objetivo de asegurar que la curva de polarización fuese repetible.

Teniendo en cuenta que fueron fabricadas dos membranas (M1 y M2), se procedió a obtener la curva de polarización característica de cada membrana en un MEA convencional de acuerdo con la Figura 28. Por ejemplo, en la Figura 53 se presentan tres curvas de polarización empleando la membrana M1 en un MEA convencional.

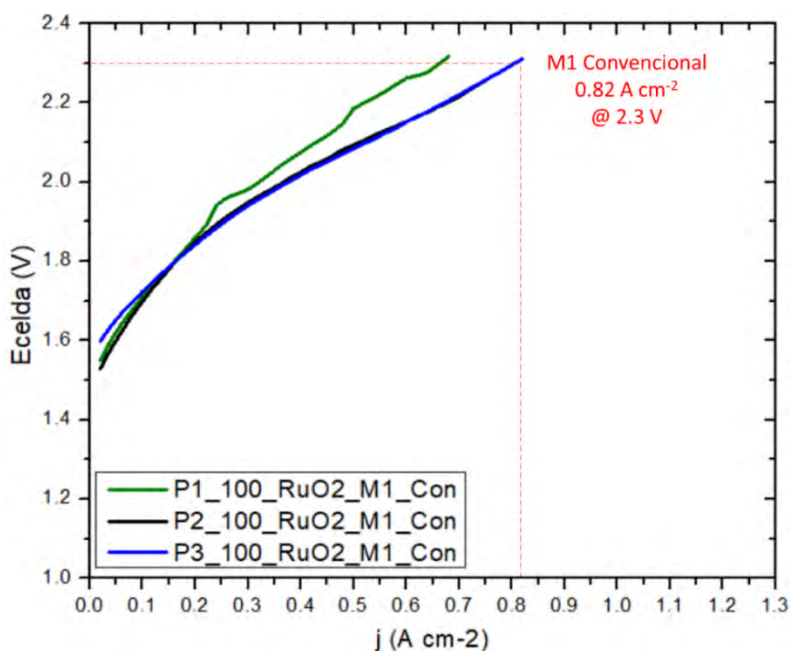


Figura 53. Curvas de polarización de la membrana M1 en un MEA convencional utilizando el electrolizador de prueba tipo PEM.

La curva P1 presenta los valores de potencial de celda más altos en comparación con las curvas P2 y P3, indicando que P1 es la curva menor eficiente. Sin embargo, dado que las tres curvas pertenecen a la misma membrana M1, y que las curvas P2 y P3 se ejecutaron después de la curva P1, se podría decir, que el bajo desempeño de la curva P1, se debe posiblemente a una falta activación. Una vez la membrana se activó completamente, se obtuvieron las curvas P2 y P3, que muestran un desempeño similar alcanzando una densidad de corriente de 0.82 A cm^{-2} a un potencial de celda de 2.3 V. A partir de este análisis, la curva de polarización P3 se tomó como el blanco para la membrana M1 en un MEA convencional. De igual forma, se realizó el mismo procedimiento para la membrana M2 en un MEA convencional, de donde se obtuvo la curva de polarización de referencia P2.

c) Curva de polarización del electrolizador PEM - MEA mixto

Una vez que se definieron las curvas de polarización de referencia de las membranas M1 y M2 en un MEA convencional, se procedió a ensamblar el MEA mixto de acuerdo con la Figura 29. Cabe resaltar que en el MEA mixto, la PTL de la zona anódica, fue intercambiado por los electrodos E1-E5. Las pruebas de desempeño se ejecutan de la siguiente forma:

- **Primera prueba:** Se evalúan los electrodos E1, E2 y E3 en un MEA mixto usando la membrana M1. Cada curva de desempeño se realiza por duplicado.
- **Segunda prueba:** Se evalúan los electrodos E4 y E5 en un MEA mixto usando la membrana M2. Cada curva de desempeño se realiza por duplicado.

La Figura 54 compara las curvas de polarización de los electrodos E1, E2 y E3 en un MEA mixto y la curva de polarización del MEA convencional P3, ambos ensambles usando la membrana M1. Se observa que el electrodo E3 en un MEA mixto, mejora el desempeño del electrolizador PEM, ya que alcanza una densidad

de corriente de 1.08 A cm^{-2} versus 0.82 A cm^{-2} del MEA convencional a un potencial de celda de 2.3 V. En otras palabras, la integración del electrodo E3, de menor porosidad (50-60 %), usando un MEA mixto en el electrolizador PEM, disminuye la demanda de potencial a una densidad de corriente específica, lo que se traduce en menos pérdidas electroquímicas y mayor eficiencia en la celda. Estudios previos han evaluado diferentes porosidades de las PTL tipo fieltro de Ti, encontrando que el de menor porosidad, también demanda un menor potencial de celda a una densidad de corriente específica (Ito *et al.*, 2013). Este resultado, indica que la porosidad de la PTL podría ser una variable importante que impacta considerablemente en el desempeño de los electrolizadores PEM. Por otro lado, las curvas de desempeño de los electrodos E1 y E2 en un MEA mixto, no muestran una mejora en el desempeño del electrolizador PEM: el electrodo E1 en un MEA mixto, demanda un potencial de celda mayor que el MEA convencional a todas las densidades de corriente de la curva, y la integración del electrodo E2 en el MEA mixto, no muestra un cambio considerable con respecto al MEA convencional.

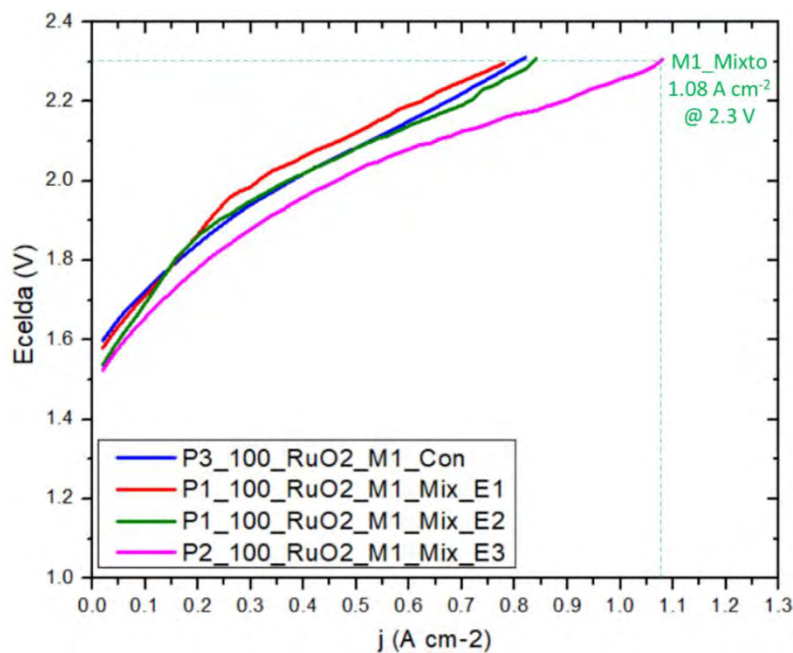


Figura 54. Comparación de las curvas de polarización utilizando la membrana M1 en un MEA convencional y en un MEA mixto con los electrodos E1, E2 y E3.

De la misma forma, en la Figura 55, se comparan las curvas de polarización de los electrodos E4 y E5 en un MEA mixto y la curva de polarización del MEA convencional P2, ambos ensambles usando la membrana M2. Se aprecia que la integración de los electrodos E3 y E4 en un MEA mixto no mejora el desempeño del electrolizador PEM con un MEA convencional. La integración de los electrodos E3 y E4 en un MEA mixto, permitió alcanzar una densidad de corriente de 0.56 A cm^{-2} versus 0.56 A cm^{-2} de un MEA convencional a un potencial de celda de 2.3 V . Este resultado muestra que la integración de los electrodos E4 y E5 no disminuye la demanda de potencial del electrolizador PEM.

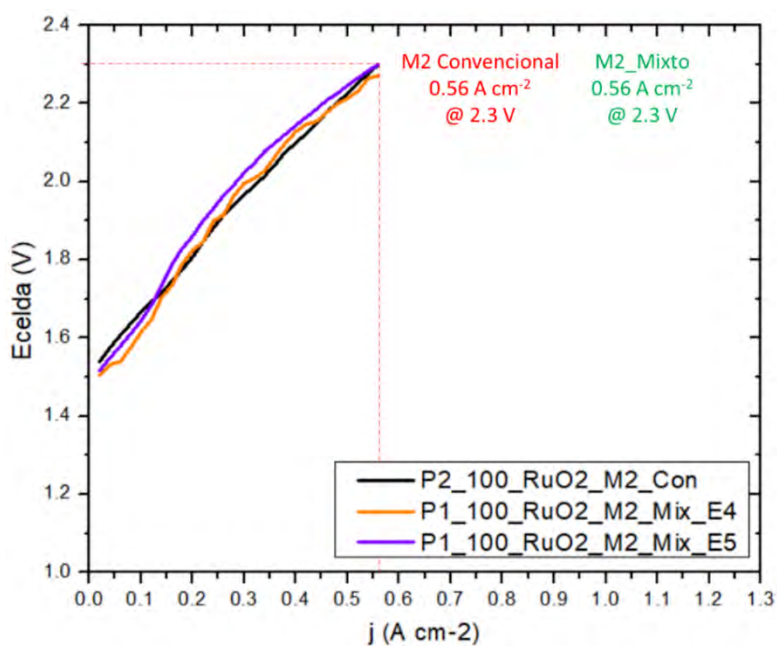


Figura 55. Comparación de las curvas de polarización utilizando la membrana M2 en un MEA convencional y en un MEA mixto con los electrodos E4 y E5.

Aunque el electrodo E2 presentó un comportamiento superior durante la caracterización electroquímica realizada en la fase preliminar (sección 4.1.2), su empleo en un MEA mixto en el electrolizador PEM no proporcionó un mejor desempeño a la celda. Este resultado evidencia que el desempeño del electrolizador

PEM no solo depende de una buena actividad catalítica del electrodo, sino también, de varios factores como por ejemplo, las resistencias internas que pueden generarse en el ensamble interno debido al acople entre componentes.

Por otro lado, la integración del electrodo E3 en un MEA mixto en el electrolizador PEM permitió disminuir la demanda de potencial a una determinada densidad de corriente. Este comportamiento se puede atribuir a que el E3 tiene una mayor ECSA de 27.6 cm^2 , posiblemente como consecuencia de la menor porosidad del PTL (50-60 %) utilizado en este electrodo. Este resultado evidencia que en la evaluación del desempeño de un electrolizador PEM, no solo se deben contemplar factores como las condiciones de síntesis de los electrodos, sino también, la porosidad de la PTL como factor importante que puede contribuir a la obtención de una mayor ECSA, una mejor conductividad interna de la celda y por consiguiente, en una disminución de su resistencia interna.

Conclusiones

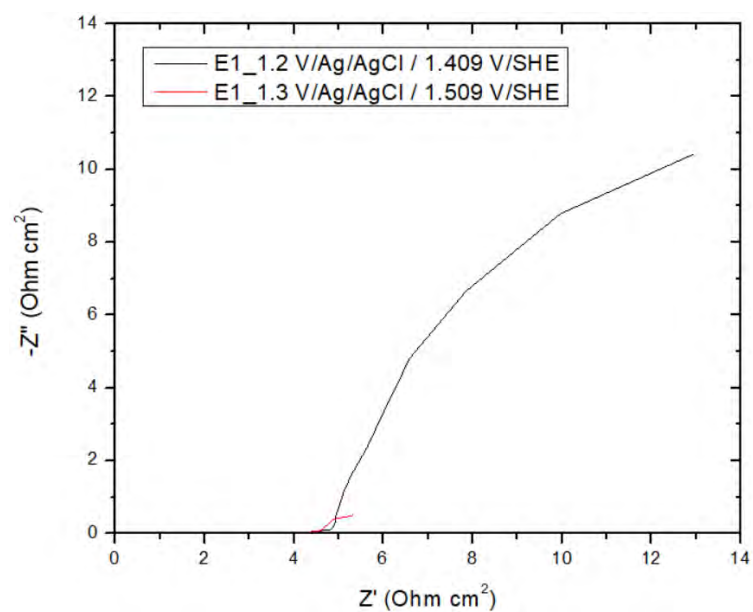
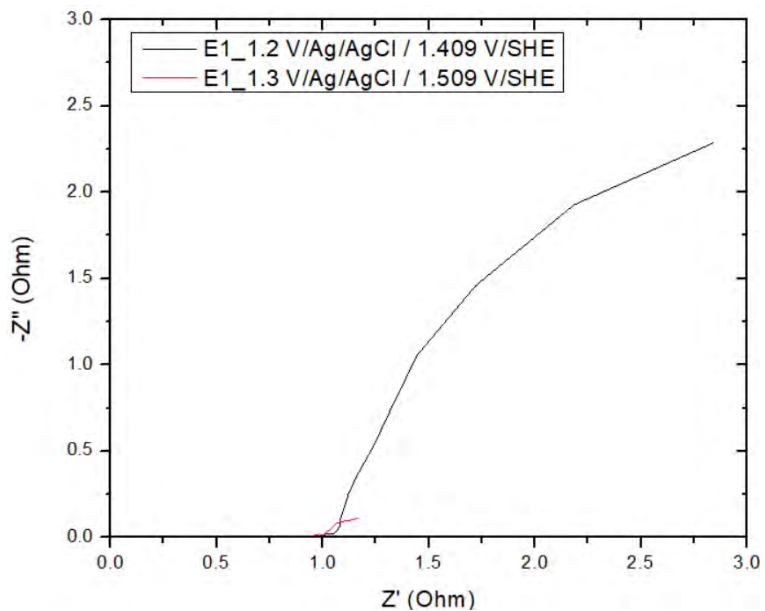
- La síntesis de electrocatalizadores de RuO₂ sobre la capa de transporte porosa (PTL) mediante el método de síntesis del precursor polimérico (PPM), permitió obtener electrodos anódicos con buena actividad catalítica hacia la reacción de evolución de oxígeno (OER). Todos los electrodos presentaron pendientes de Tafel comprendidas entre 30 y 60 mV dec⁻¹, siendo un rango característico de catalizadores de RuO₂. De igual forma, los depósitos fueron caracterizados mediante técnicas analíticas como SEM, EDS y DRX, lo que permitió comprobar la presencia de RuO₂ en fase rutilo tetragonal, así como también, la presencia de sus planos cristalográficos característicos.
- La caracterización electroquímica EIS de los electrodos anódicos hacia la OER y su análisis mediante diagramas de Nyquist, permitió identificar la presencia de dos semicírculos deprimidos, los cuales se asociaron a dos procesos físicos diferenciables. El primero, a la resistencia debido a la formación de la película entre los electrocatalizadores de RuO₂ y el electrolito, y el segundo, a la transferencia de carga y a la cinética de la OER. Se realizó un ajuste mediante circuitos eléctricos equivalentes con un modelo de dos constantes de tiempo, lo que permitió identificar que predominan las contribuciones resistivas por encima de las capacitivas, mostrando que la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) es el parámetro que más impacta en el desempeño del electrodo hacia la OER.
- La integración del electrodo E3 en un MEA mixto mejoró el desempeño operacional del electrolizador PEM con un MEA convencional, al demostrar una disminución en la demanda de potencial a una determinada densidad de corriente. Se obtuvo una densidad de corriente de 1.08 A cm⁻² en el MEA mixto, versus 0.82 A cm⁻² del MEA convencional a un potencial de celda de 2.3 V. Ese resultado se debe posiblemente a que el electrodo E3 fue fabricado sobre una PTL de menor porosidad (50-60 %), favoreciendo una mayor deposición de

RuO₂ sobre las fibras entrecruzadas, una mejor conductividad y una menor resistencia interna en el electrolizador PEM.

Anexos

Anexo 1 EIS. Electrodo de prueba $\text{Ti}_{(\text{PTL})}/\text{RuO}_2$ (E1 y E2)

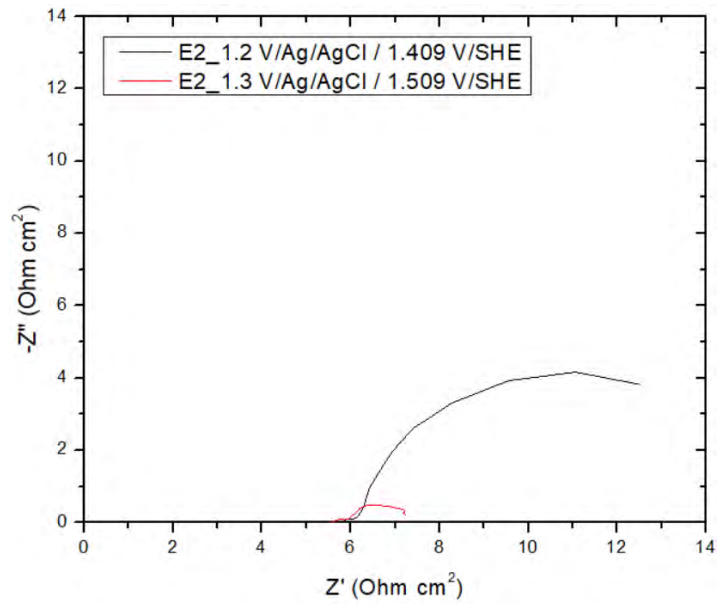
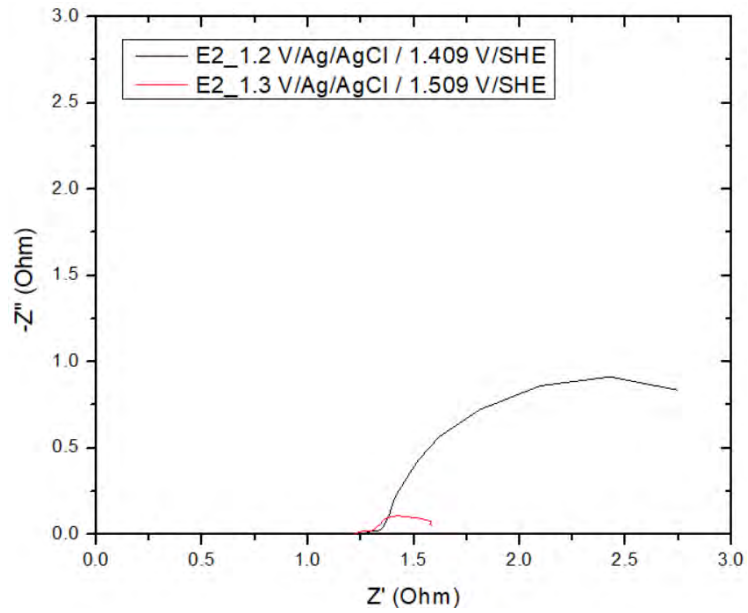
- E1



Resistencia solución promedio E1

Conexionado	Potencial (V/Ag/AgCl)	Rs (Ohm)	Rs prom (Ohm)
Cu	1.2	0.50350541	0.47299905
	1.3	0.44249269	

- E2

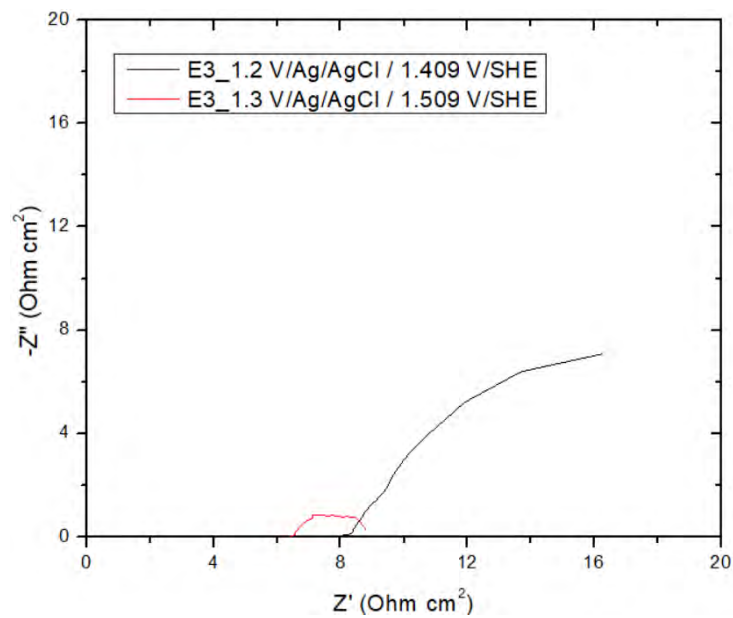
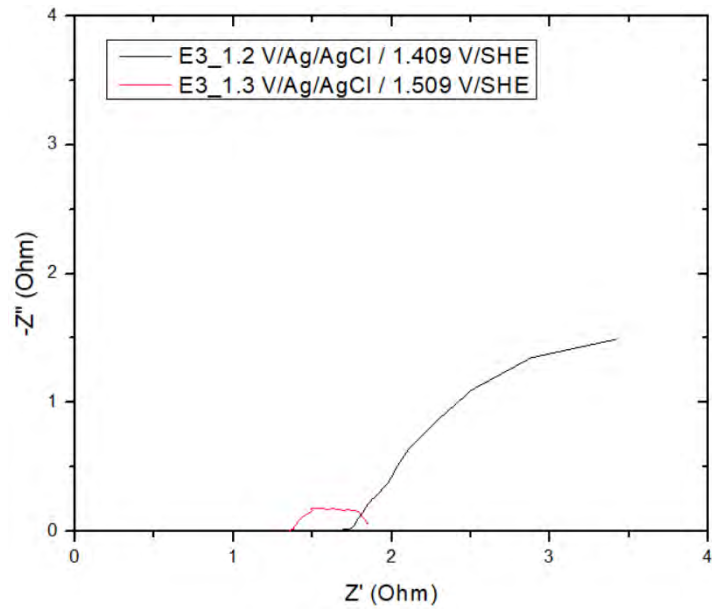


Resistencia solución promedio E2

Conexionado	Potencial (V/Ag/AgCl)	Rs (Ohm)	Rs prom (Ohm)
Cu	1.2	0.69476587	0.68829248
	1.3	0.68181908	

Anexo 2 EIS. Electrodo final $Ti_{(PTL)}/RuO_2$ (E3, E4 y E5)

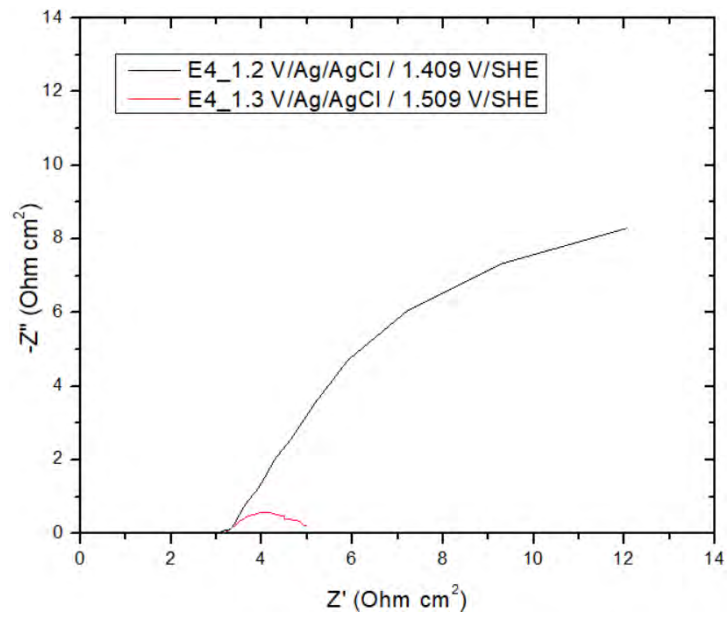
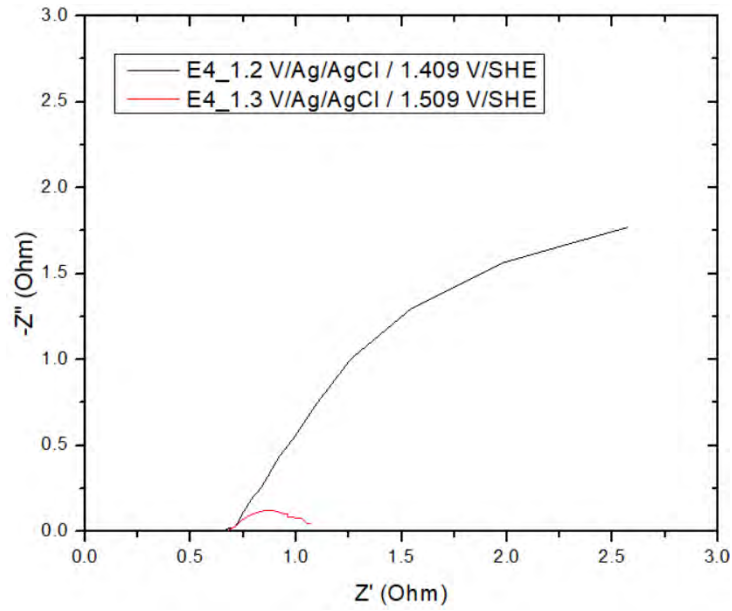
- E3



Resistencia solución promedio E3

Conexionado	Potencial (V/Ag/AgCl)	Rs (Ohm)	Rs prom (Ohm)
Cu	1.2	1.6850419	1.5182458
	1.3	1.3514497	

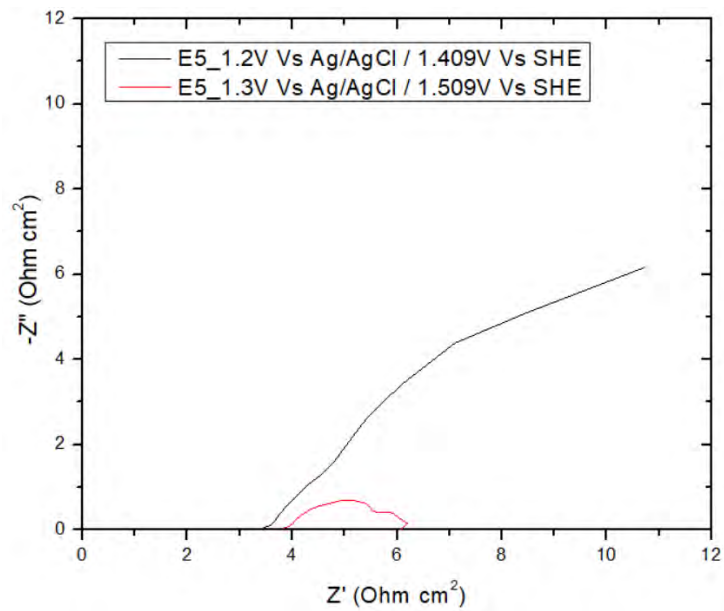
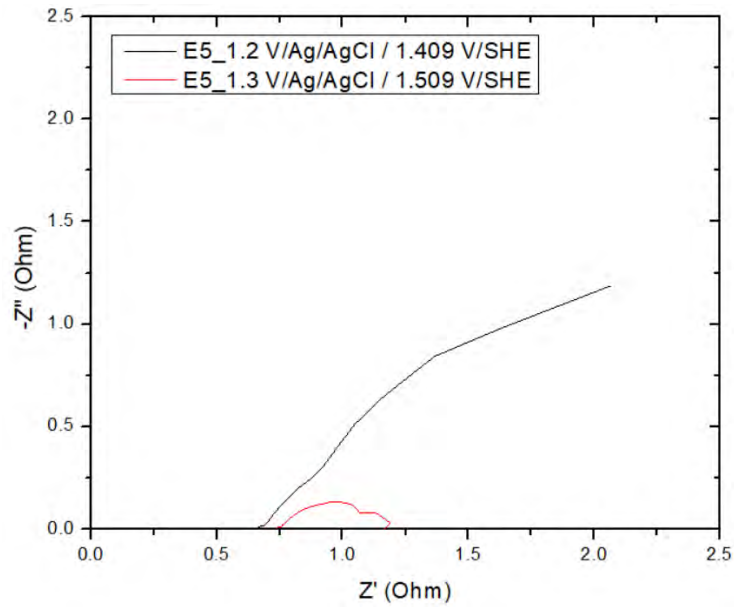
- E4



Resistencia solución promedio E4

Conexionado	Potencial (V/Ag/AgCl)	Rs (Ohm)	Rs prom (Ohm)
Cu	1.2	0.66110188	0.66844216
	1.3	0.67578244	

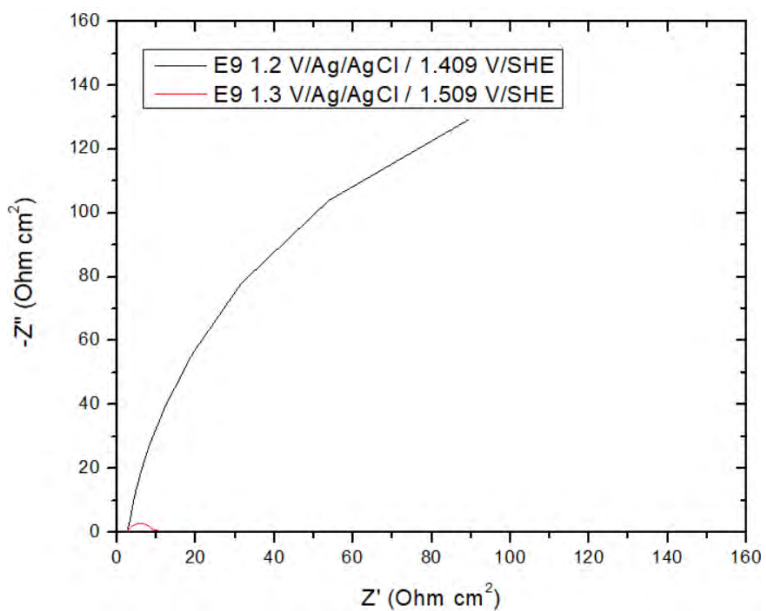
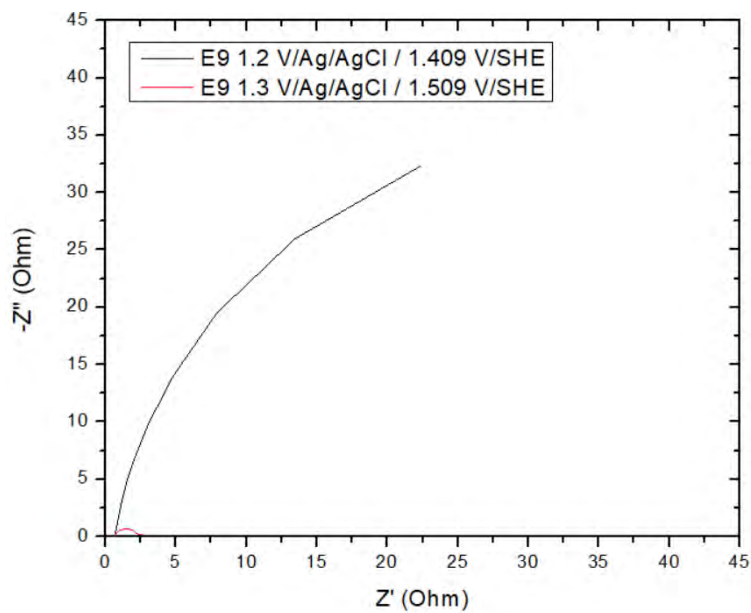
- E5



Resistencia solución promedio E5

Conexionado	Potencial (V/Ag/AgCl)	Rs (Ohm)	Rs prom (Ohm)
Cu	1.2	0.66009527	0.69778189
	1.3	0.73546851	

- E9_Lámina

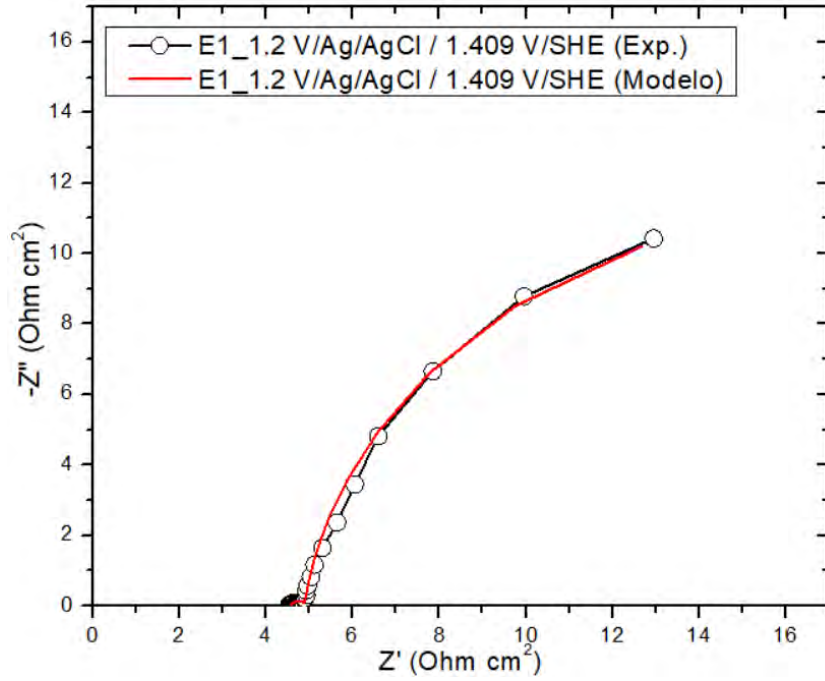


Resistencia solución promedio E9

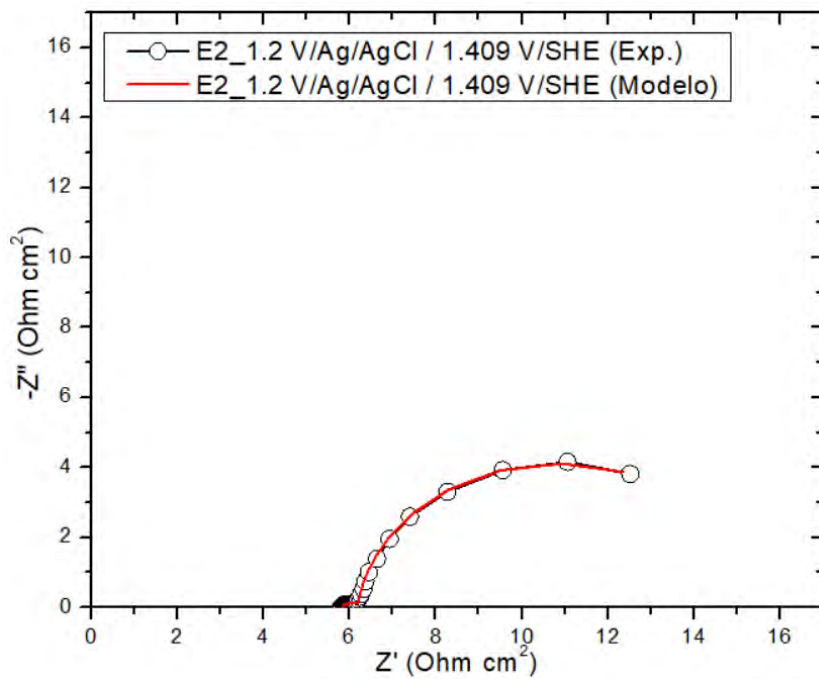
Conexionado	Potencial (V/Ag/AgCl)	Rs (Ohm)	Rs prom (Ohm)
Cu	1.2	0.60419357	0.62649992
	1.3	0.64880627	

Anexo 3 Circuitos Equivalentes electrodos E1-E5 a 1.2 V/Ag/AgCl (1.409 V/SHE)

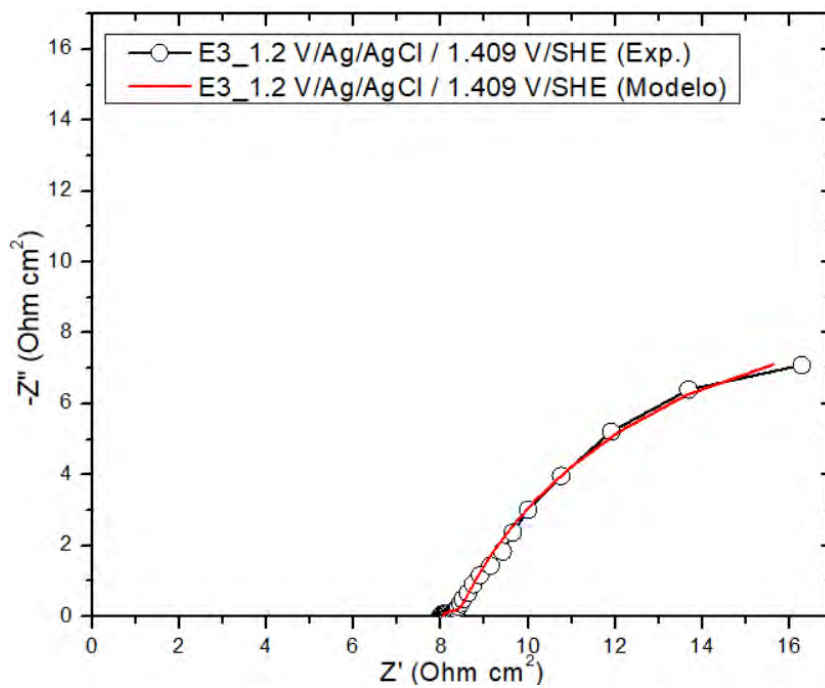
- E1



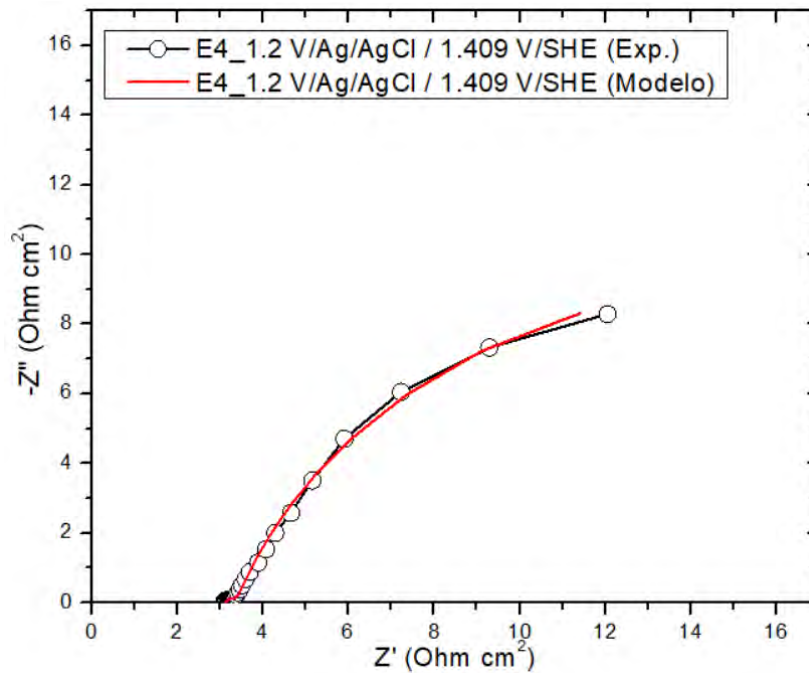
- E2



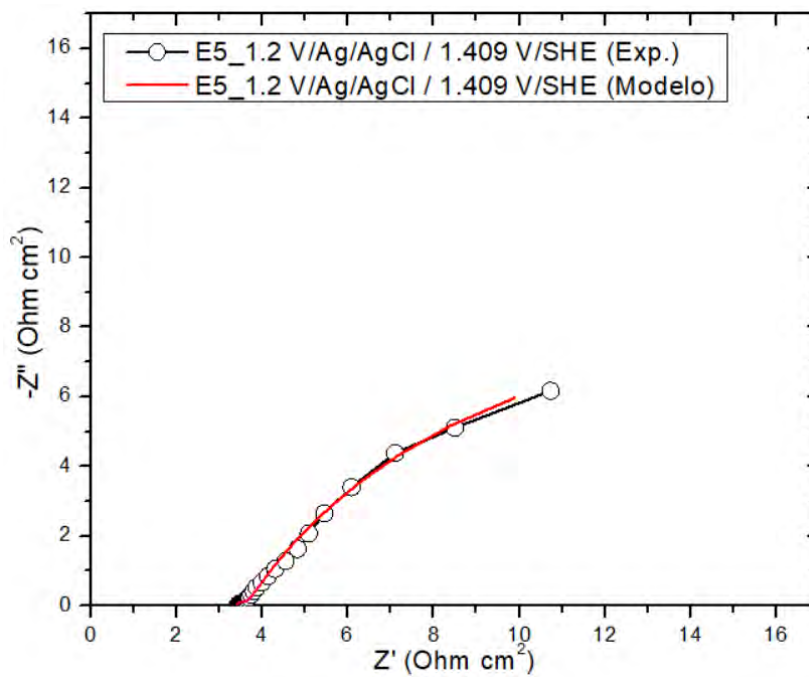
- E3



- E4

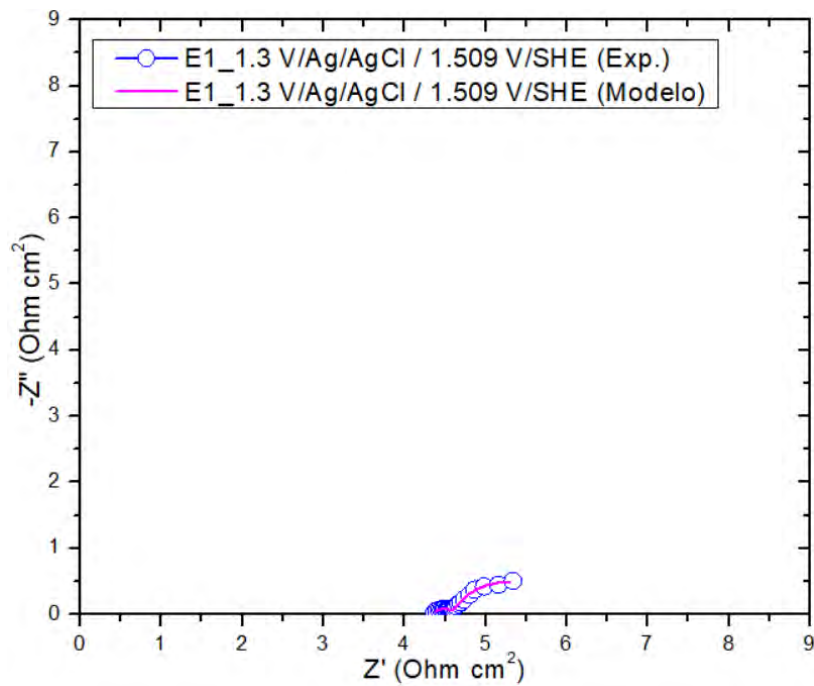


- E5

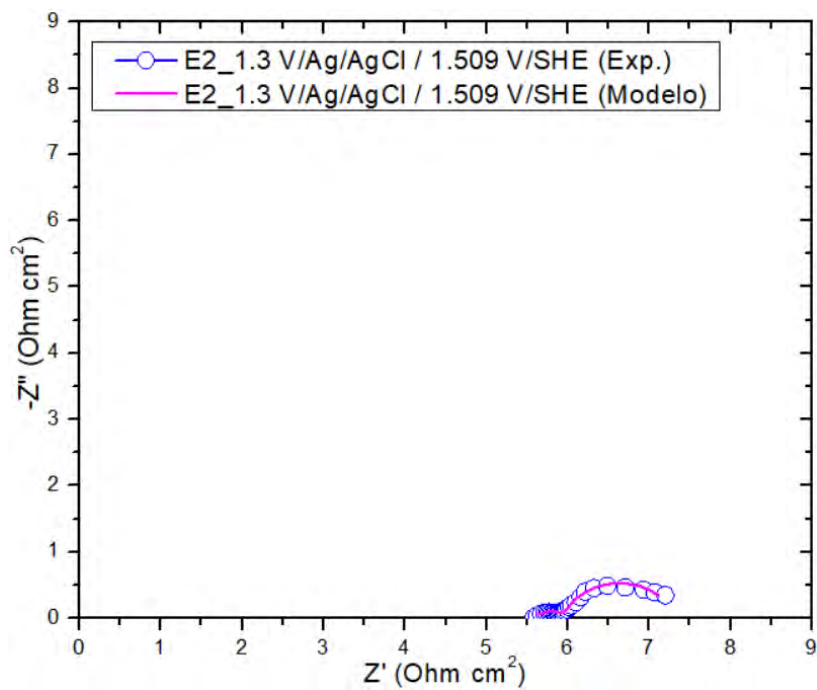


Anexo 4 Circuitos Equivalentes electrodos E1-E5 a 1.3 V/Ag/AgCl (1.509 V/SHE)

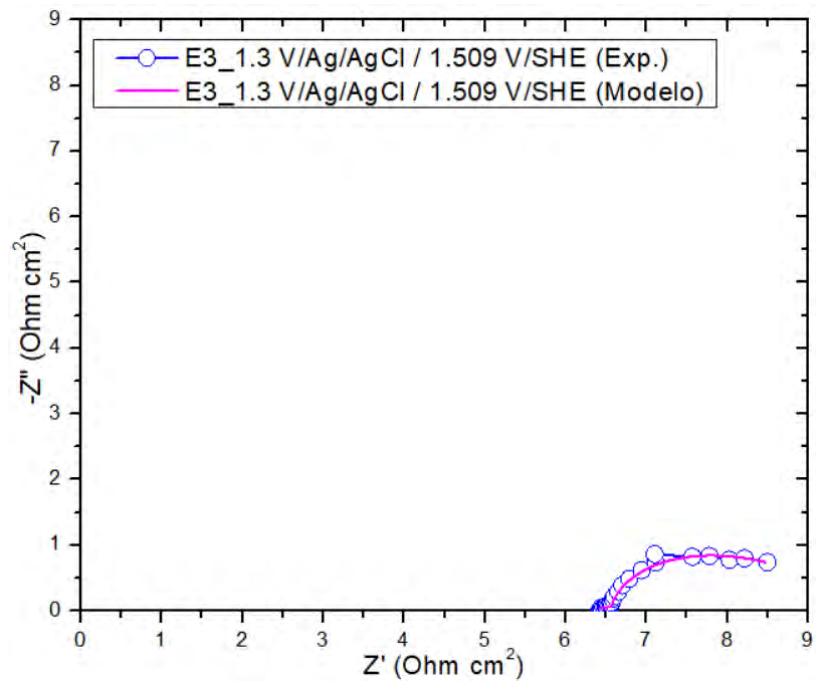
- E1



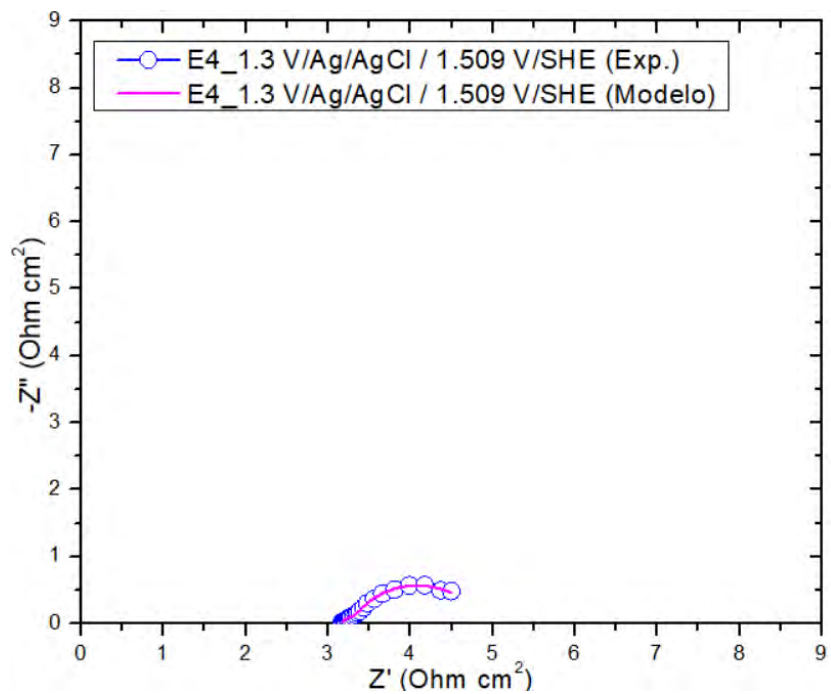
- E2



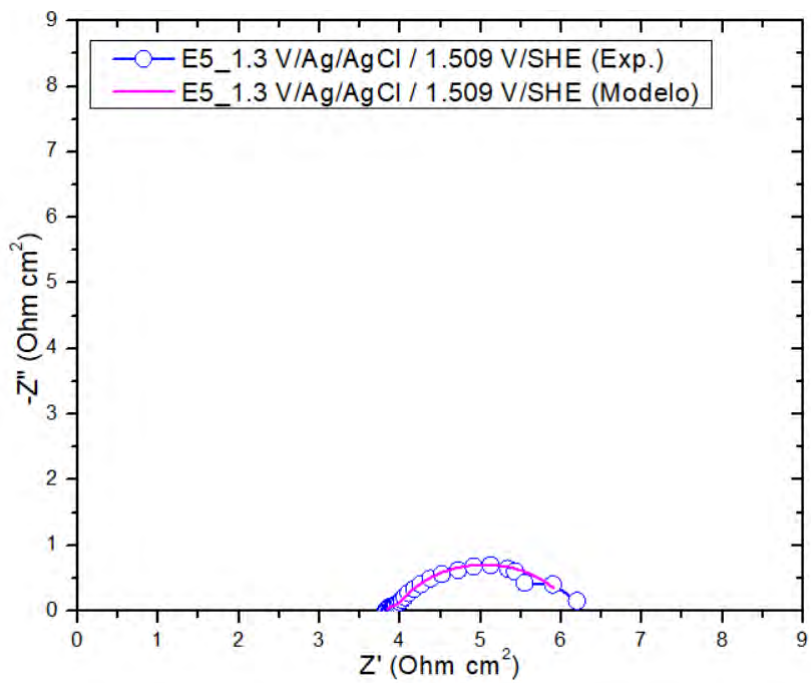
- E3



- E4



- E5



Referencias bibliográficas

- Afifa, Arshad, K., Hussain, N., Ashraf, M. H., & Saleem, M. Z. (2024). Air pollution and climate change as grand challenges to sustainability. *Science of the Total Environment*, 928, 172370. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172370>
- Airbus. (2024, septiembre 2). *Developing a global ecosystem to support hydrogen-powered flight*. Página web. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2024-09-developing-a-global-ecosystem-to-support-hydrogen-powered-flight>
- Alobaid, A., Wang, C., & Adomaitis, R. A. (2018). Mechanism and Kinetics of HER and OER on NiFe LDH Films in an Alkaline Electrolyte. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(15), J3395–J3404. <https://doi.org/10.1149/2.0481815jes>
- Antolini, E. (2014). Iridium as catalyst and cocatalyst for oxygen evolution/reduction in acidic polymer electrolyte membrane electrolyzers and fuel cells. En *ACS Catalysis* (Vol. 4, Número 5, pp. 1426–1440). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/cs4011875>
- Aragón-González, G., León-Galicia, A., González-Huerta, R., Camacho, J. M. R., & Uribe-Salazar, M. (2015). Hydrogen production by a PEM electrolyser. *Journal of Physics: Conference Series*, 582(1), 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/582/1/012054>
- Bacquart, T., Storms, W., Moore, N., Olden, J., Morris, A. S. O., Hookham, M., Murugan, A., & Mattelaer, V. (2024). Assessing the Performance of Fuel Cell Electric Vehicles Using Synthetic Hydrogen Fuel. *Energies*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/en17071510>
- Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, Inc.

- Bessarabov, D., & Millet, P. (2018). Fundamentals of Water Electrolysis. En *PEM Water Electrolysis* (pp. 43–73). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811145-1.00003-4>
- Burbano de Ercilla, S. ; B. G. E. ; G. M. C. (2003). *Física General* (32a ed.). Tébar, S.L.
- Castro Navarro, D. S. (2023). *Evaluación de un diseño tipo Box-Behnken en la síntesis del ánodo Ti/RuO₂-IrO₂, para maximizar la producción de cloro activo como potencial oxidante de metoprolol*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Chen, D., Liu, T., Wang, P., Zhao, J., Zhang, C., Cheng, R., Li, W., Ji, P., Pu, Z., & Mu, S. (2020). Ionothermal route to phase-pure RuB₂ catalysts for efficient oxygen evolution and water splitting in acidic media. *ACS Energy Letters*, 5(9), 2909–2915. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.0c01384>
- Cummins. (2024). *Hydrogen: The next generation. Discover cummins electrolyzer technologies*. Catálogo online. <https://www.cummins.com/sites/default/files/2023-10/electrolyzer-brochure.pdf>
- Diéguez, P. M., Ursúa, A., Sanchis, P., Sopena, C., Guelbenzu, E., & Gandía, L. M. (2008). Thermal performance of a commercial alkaline water electrolyzer: Experimental study and mathematical modeling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(24), 7338–7354. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.051>
- Doyle, R. L., & Lyons, M. E. G. (2013). An electrochemical impedance study of the oxygen evolution reaction at hydrous iron oxide in base. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(14), 5224–5237. <https://doi.org/10.1039/c3cp43464h>
- Energy Institute - Statistical Review of World Energy. (2023). *Primary energy consumption by source*. Estadística. <https://ourworldindata.org/grapher/primary-sub-energy-source?tab=table&time=latest&facet=none&showSelectionOnlyInTable=1>

- Escobedo, E., García, D., Ruiz, M., Izquierdo, A., Pacheco-Catalán, D., & Ordóñez, L. C. (2023). Design, construction, and performance of a proton exchange membrane water electrolyzer (PEM-WE). *International Journal of Electrochemical Science*, 18(5), 100110. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100110>
- Fang, Y. H., & Liu, Z. P. (2010). Mechanism and Tafel lines of electro-oxidation of water to oxygen on RuO₂(110). *Journal of the American Chemical Society*, 132(51), 18214–18222. <https://doi.org/10.1021/ja1069272>
- FCH2RAIL. (2024). *FCH2RAIL project: First hydrogen train on the Spanish railway network*. Página web. <https://fch2rail.eu/>
- Godula-Jopek, A. (2015). *Hydrogen Production: by electrolysis* (Agata Godula-Jopek, Ed.; 1a ed.). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Hoelzen, J., Silberhorn, D., Schenke, F., Stabenow, E., Zill, T., Bensmann, A., & Hanke-Rauschenbach, R. (2025). H₂-powered aviation – Optimized aircraft and green LH₂ supply in air transport networks. *Applied Energy*, 380, 124999. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124999>
- Hou, J., & Yang, M. (2025). *Green Hydrogen Production by Water Electrolysis* (1st Edition). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781003368939>
- Hou, S., Jiang, J., Wang, Y., He, X., Ge, J., & Xing, W. (2022). High-Performance RuO_xCatalyst with Advanced Mesoporous Structure for Oxygen Evolution Reaction. *Langmuir*, 38(40), 12118–12123. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c00962>
- Hou, Z., Ge, Z., Sun, L., Liu, Y., & Zhang, H. (2025). Study on the comprehensive influence of Si-Al-based additives on hydrogen production and K deposition during biomass gasification. *Journal of the Energy Institute*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101915>
- Hubert, M. A., Patel, A. M., Gallo, A., Liu, Y., Valle, E., Ben-Naim, M., Sanchez, J., Sokaras, D., Sinclair, R., Nørskov, J. K., King, L. A., Bajdich, M., & Jaramillo, T.

- F. (2020). Acidic Oxygen Evolution Reaction Activity-Stability Relationships in Ru-Based Pyrochlores. *ACS Catalysis*, 10(20), 12182–12196. <https://doi.org/10.1021/acscatal.0c02252>
- Incer-Valverde, J., Korayem, A., Tsatsaronis, G., & Morosuk, T. (2023). “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy Conversion and Management*, 291, 117294. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117294>
- International Energy Agency. (2021). *Total CO2 emissions from energy*. Estadística. <https://www.iea.org/countries/china/emissions>
- International Energy Agency. (2023). *Primary energy consumption by source in Mexico*. Estadística. <https://www.iea.org/countries/mexico/energy-mix>
- International Energy Agency - iea. (2023, abril 26). *Share of fuel cell electric vehicle (FCEV) and hydrogen refuelling station (HRS) stock by region, 2022*. Página web. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-fuel-cell-electric-vehicle-fcev-and-hydrogen-refuelling-station-hrs-stock-by-region-2022>
- ITM Power. (2024). *Leading PEM electrolyser technology*. Catálogo online. <https://itm-power.com/products/>
- Ito, H., Maeda, T., Nakano, A., Kato, A., & Yoshida, T. (2013). Influence of pore structural properties of current collectors on the performance of proton exchange membrane electrolyzer. *Electrochimica Acta*, 100, 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.05.068>
- Iyke, B. N. (2024). Climate change, energy security risk, and clean energy investment. *Energy Economics*, 129, 107225. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107225>
- Jesus Alberto Cruz Flores. (2024). *Diseño y manufactura de un electrolizador de Membrana de Intercambio Protónico (PEM) de prueba, con un área activa de 5 cm²*. Instituto Politécnico Nacional.
- Li, G., Li, S., Ge, J., Liu, C., & Xing, W. (2017). Discontinuously covered IrO₂-RuO₂@Ru electrocatalysts for the oxygen evolution reaction: How high activity

and long-term durability can be simultaneously realized in the synergistic and hybrid nano-structure. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(33), 17221–17229. <https://doi.org/10.1039/c7ta05126c>

- Li, S., Zhao, S., Hu, F., Li, L., Ren, J., Jiao, L., Ramakrishna, S., & Peng, S. (2024). Exploring the potential Ru-based catalysts for commercial-scale polymer electrolyte membrane water electrolysis: A systematic review. *Progress in Materials Science*, 145, 101294. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101294>
- Liao, L., Li, M., Yin, Y., Tan, X., Du, R., Zhong, Q., & Zeng, F. (2024). Ti-mesh bipolar plate design and optimization for enhanced PEM electrolyzer performance in water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, 64, 981–989. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.331>
- Liu, T., Tao, Y., Wang, Y., Hu, M., Zhang, Z., & Shao, J. (2024). Towards cost-effective and durable bipolar plates for proton exchange membrane electrolyzers: A review. *Fuel*, 368, 131610. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131610>
- Liu, Y., Hu, X., Liu, C., Zhu, S., Jiang, K., Liu, F., & Zheng, S. (2024). Construction of Pd-doped RuO₂ nanosheets for efficient and stable acidic water oxidation. *Green Energy and Environment*, 9(6), 937–948. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2023.12.003>
- Malkow T, Pilenga A, & Tsotridis G. (2018). *EU harmonised polarisation curve test method for low-temperature water electrolysis*. <https://doi.org/10.2760/179509>
- Martínez, M. S. (2024). *Desarrollo de Materiales Nanoestructurados de IrRu y NiFeMo como Electrocatalizadores para la Reacción de Evolución de Oxígeno en Sistemas de Electrólisis PEM y AEM*. Instituto Politécnico Nacional.
- Martínez-Séptimo, A., Valenzuela, M. A., Del Angel, P., & González-Huerta, R. de G. (2021). IrRuO_x/TiO₂ a stable electrocatalyst for the oxygen evolution reaction in acidic media. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(51), 25918–25928. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.040>

- Murugaiah, D. K., & Shahgaldi, S. (2024). Recent progress in understanding the dispersion stability of catalyst ink for proton exchange membrane fuel cell and water electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 66, 156–169. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.036>
- Navarro Castillo, C. R. (2025). *Caracterización de electrolizadores de membrana de intercambio protónico de prueba para validación de ensambles membrana-electrodos*. Instituto Politécnico Nacional.
- Nel Hydrogen. (2024). *PEM Electrolyser – PSM Series*. Catálogo online. <https://nelhydrogen.com/product/psm-series-electrolyser/>
- Otgonbayar, U., Sandig-Predzymirska, L., Thiere, A., & Charitos, A. (2024). Solvent extraction of Pt, Ru, and Ir using Cyanex 923 in chloride media to develop a recycling route for spent polymer electrolyte membrane (PEM) electrolyzers. *Hydrometallurgy*, 226, 106303. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106303>
- Our World in Data. (2024, abril 8). *What share of global CO₂ emissions come from aviation?* Página web. <https://ourworldindata.org/global-aviation-emissions#:~:text=Aviation%20accounts%20for%202.5%25%20of,to%20global%20warming%20to%20date.&text=Flying%20is%20one%20of%20the,of%20the%20world's%20carbon%20emissions>.
- Palma-Goyes, R. E., & *et al.* (2016). Microstructural and electrochemical analysis of Sb₂O₅ doped-Ti/RuO₂-ZrO₂ to yield active chlorine species for ciprofloxacin degradation. *Electrochimica Acta*, 213, 740–751. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.07.150>
- Palma-Goyes, R. E., Vazquez-Arenas, J., Ostos, C., Torres-Palma, R. A., & González, I. (2016). The Effects of ZrO₂ on the Electrocatalysis to Yield Active Chlorine Species on Sb₂O₅-Doped Ti/RuO₂ Anodes. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(9), H818–H825. <https://doi.org/10.1149/2.0891609jes>
- Palma-Goyes, R. E., Vazquez-Arenas, J., Torres-Palma, R. A., Ostos, C., Ferraro, F., & González, I. (2015). The abatement of indigo carmine using active chlorine

- electrogenerated on ternary Sb₂O₅-doped Ti/RuO₂-ZrO₂ anodes in a filter-press FM01-LC reactor. *Electrochimica Acta*, 174, 735–744. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.06.037>
- Parra, D., Valverde, L., Pino, F. J., & Patel, M. K. (2019). A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 279–294. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.010>
- Plug Power. (2024). *Electrolyzer Hydrogen Solutions Now*. Catálogo online. <https://www.plugpower.com/hydrogen/electrolyzer-hydrogen/>
- Retuerto, M., Pascual, L., Calle-Vallejo, F., Ferrer, P., Gianolio, D., Pereira, A. G., García, Á., Torrero, J., Fernández-Díaz, M. T., Bencok, P., Peña, M. A., Fierro, J. L. G., & Rojas, S. (2019). Na-doped ruthenium perovskite electrocatalysts with improved oxygen evolution activity and durability in acidic media. *Nature Communications*, 10(1), 2041. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09791-w>
- Rodríguez, F. A., Rivero, E. P., & González, I. (2018). Adapted Pechini method to prepare DSA type electrodes of RuO₂-ZrO₂ doped with Sb₂O₅ over titanium plates. *MethodsX*, 5, 1613–1617. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.11.020>
- Rodríguez-Gómez, A., Dorado, F., de Lucas-Consuegra, A., Sánchez, P., & de la Osa, A. R. (2024). Ethanol electrolysis in a PEM cell: Dependence of the PtRu surface composition on the EOR activity under dynamic potential application. *Catalysis Today*, 427, 114411. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2023.114411>
- Rolo, I., Costa, V. A. F., & Brito, F. P. (2024). Hydrogen-Based Energy Systems: Current Technology Development Status, Opportunities and Challenges. *Energies*, 17(1), 180. <https://doi.org/10.3390/en17010180>
- Santos, T. É. S., Silva, R. S., Carlesi Jara, C., Eguiluz, K. I. B., & Salazar-Banda, G. R. (2014). The influence of the synthesis method of Ti/RuO₂ electrodes on their stability and catalytic activity for electrochemical oxidation of the pesticide carbaryl. *Materials Chemistry and Physics*, 148(1–2), 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.07.007>

- Scribner Associates, Inc. (2025). *ZView® 4.1 Impedance / Gain-Phase Graphing & Analysis Software Operating Manual: Vol. E* (pp. 1–149). www.scribner.com
- Shirvanian, P., & van Berkel, F. (2020). Novel components in Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers (PEMWE): Status, challenges and future needs. *Electrochemistry Communications*, *114*, 106704. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2020.106704>
- Siemens Energy. (2024). *Green hydrogen production: Electrolyzer for green hydrogen production in detail*. Catálogo online. <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product-offerings/hydrogen-solutions.html>
- Tamilarasi, B., Jithul, K. P., & Pandey, J. (2024). Non-noble metal-based electro-catalyst for the oxygen evolution reaction (OER): Towards an active & stable electro-catalyst for PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, *58*, 556–582. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.222>
- Tan, A., Pang, B., Song, J., Qiu, X., Ju, C., Liu, P., Li, J., & Liu, J. (2024). Poisoning effects of Na-ions on membrane electrode assemblies in proton exchange membrane water electrolysis and strategies for recovery. *Chemical Engineering Science*, *293*, 120083. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120083>
- Teng, X., Gao, J., Yang, Z., Liang, X., Wu, X., Yun, J., & Zhang, J. (2023). RuO₂@IrO₂/C Core-Shell Structure Catalyst for Efficient and Durable Acidic Oxygen Evolution. *Catalysts*, *13*(12), 1456. <https://doi.org/10.3390/catal13121456>
- Terezo, A. J., & Pereira, E. C. (2002). Preparation and characterisation of Ti/RuO₂ anodes obtained by sol-gel and conventional routes. *Materials Letters*, *53*(4–5), 339–345. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(01\)00504-3](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(01)00504-3)
- Toyota Motor Corporation. (2024). *Toyota Mirai 2024. Datos técnicos*. Página web. https://www.toyota.com/espanol/mirai/features/mechanical_performance/3002/3003/

- Wieser, S., Brünner, L., Böhm, M., Heckert, F., Rubio, S., & Soto, M. (2024). Limitations in the Hydrogen Refueling Process of Railway Vehicles. En J. Pombo (Ed.), *Proceedings of the Sixth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance* (Vol. 7, pp. 1–13). Civil-Comp Press. <https://doi.org/10.4203/ccc.7.12.3>
- Yañez-Rios, A. E. (2020). *Oxidación electroquímica para la degradación de ciprofloxacino asistida con radiación ultravioleta utilizando ánodos dimensionalmente estables* [Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco.]. <https://doi.org/10.24275/uama.7020.7478>
- Yañez-Rios, A. E., & et al. (2020). The influence of pH and current density on an UV254 photo-assisted electrochemical process generating active chlorine and radicals for efficient and rapid ciprofloxacin mineralization compared to individual techniques. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104357. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104357>
- Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>
- ZeroAvia. (2024a). *The Hydrogen-Electric Cessna Grand Caravan*. https://27038623.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/27038623/ZeroAvia-ZA600-Caravan-Whitepaper-2023.pdf?utm_campaign=NL%20%7C%20Newsletter&utm_medium=email&_hsenc=p2ANqtz-_y0N0FF3YsnUllmNp64dsluKz3q052NN6eR17B9BjgEIGD526BOqx20rlb97aqAxb_leTygaXxA_2Gko7fXHEP4gn6shljNYmv9c-hga47Z_5eWsA&_hsmi=83303475&utm_content=83303475&utm_source=hs_automation
- ZeroAvia. (2024b). *ZeroAvia's Engine Family*. Página web. <https://zeroavia.com/products-services/>

Zerrougui, I., Li, Z., & Hissel, D. (2025). Toward optimal operations of long-lifetime PEM electrolysis: Degradation mechanisms, modeling, diagnostics, and control. En *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 193). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.152297>

Zhang, Q., Hu, Y., Jiao, J., & Wang, S. (2024). The impact of Russia–Ukraine war on crude oil prices: an EMC framework. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1), 8–19. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02526-9>