



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA**

***“CARACTERIZACIÓN DE ZEOLITA  
TIPO CLINOPTILOLITA COMO  
ELECTROCATALIZADOR EN UNA  
CELDA DE COMBUSTIBLE”***

*Diciembre 2023*

Tesis presentada para obtener el grado de:  
Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables

Presenta:

Nabil Enriquez Torres

Directora de Tesis:

Dra. Nallely Téllez Méndez

Asesora de Tesis:

Dra. Laura Alicia Paniagua Solar

## AGRADECIMIENTOS

Para comenzar, quiero expresar mi sincero agradecimiento a mis asesoras, la Dra. Nallely Téllez Méndez y Dra. Laura Alicia Paniagua Solar, cuya dedicación, guía y apoyo fueron fundamentales en cada etapa de esta investigación. También expreso mi gratitud a la Dra. Beatriz Eugenia Graniel García, Dra. Laura Daniel Mora y a la Dra. Karen Hariantty Estévez Sánchez por sus valiosas contribuciones y por la orientación que enriqueció este trabajo.

Un agradecimiento especial al Dr. Ignacio Máximo Muñoz por su asesoramiento experto en el área de las Geociencias, por su tiempo y paciencia. Sus conocimientos fueron clave para el desarrollo de este proyecto y estoy agradecida por la oportunidad de aprender de su experiencia.

Quiero reconocer el apoyo de M.C. Celia Ramírez Ramos y Dr. Luis Armando Moreno Coria por su apoyo en los laboratorios de Biocombustibles y Energía Solar. También al Laboratorio de Geociencias del CRIITCO y a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la BUAP por el respaldo otorgado, incluyendo una beca y los recursos necesarios para asistir al congreso anual de Energías Renovables de la UNAM.

Finalmente, agradezco a todos los compañeros, amigos y familiares que de muchas maneras contribuyeron a este proyecto y me brindaron su respaldo a lo largo de esta travesía académica.

## ÍNDICE

NOMENCLATURA	9
INTRODUCCIÓN	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
HIPÓTESIS	12
OBJETIVOS	13
Objetivo General	13
Objetivos Específicos	13
JUSTIFICACIÓN	14
IMPACTO SOCIAL	15
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	16
1.1. CELDA UNITARIA	16
1.1.1. Clasificación	17
1.2. CELDAS DE COMBUSTIBLE PEMFC	17
1.2.1 Electroodos	18
1.2.2. Ensamble Membrana-Electrodo (MEA)	19
1.2.3. Electrolito	20
1.2.4. Electrocatalizador	20
1.2.5. Platino	21
1.2.6. Combustible	21
1.2.7. Placas bipolares de acrílico	22
1.2.8. Electroodos de acero galvanizado	23
1.2.9. Estructura contenedora de butirato (CAB)	24
1.2.10. Electrocatalizador de Zeolita tipo Clinoptilolita	25
1.2.11. Membrana poliacrilato de sodio	26
1.2.12. Difusor de carbón lignítico	27
1.3. REACCIONES QUÍMICAS	28
1.4. CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE	29
1.4.1. Curva IV	29
1.4.2. Ley de Ohm	29
1.4.3. Curvas características	30
1.4.4. Densidad de corriente	31
1.4.5. Potencia eléctrica	31
1.4.6. Densidad de potencia	32
1.5. MINERALES	32
1.5.1. Rocas	33
1.5.2. Ciclo de las rocas	33
1.5.3. Caracterización de las rocas	35
1.6. ZEOLITAS	36
1.6.1. Tipos de zeolitas	36

1.6.2. Zeolita Clinoptilolita	37
1.7. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN	39
1.7.1. Petrografía	39
1.7.2. Microscopía electrónica de barrido	40
1.7.3. Fluorescencia de rayos X	41
CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DE ZEOLITA TIPO CLINOPTILOLITA	42
2.1. PETROGRAFÍA	42
2.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	47
2.3. FLUORESCENCIA DE RAYOS X	49
CAPÍTULO 3: ELABORACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE	51
3.1. DISEÑO	51
3.2. MATERIALES	52
3.4. COSTOS	53
3.5. ENSAMBLE	54
CAPÍTULO 4: ELABORACIÓN DEL ELECTROCATALIZADOR	56
CAPÍTULO 5: PRUEBA EN CELDA CON ZEOLITA CLINOPTILOLITA	60
5.1. PRUEBAS ALTERNATIVAS DEL ELECTROCATALIZADOR	61
5.2. VARIACIÓN DE TEMPERATURA	62
5.3. INCREMENTO DEL FLUJO DE AIRE	62
6. RESULTADOS	64
6.1. PETROGRAFÍA	64
6.1.1. Petrografía de Zeolita Clinoptilolita	64
6.1.2. Petrografía del electrocatalizador de Zeolita Clinoptilolita	65
6.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	66
6.3. FLUORESCENCIA DE RAYOS X	67
6.4. CARACTERIZACIÓN DE CELDA DE COMBUSTIBLE	68
6.4.1. Medición de voltaje y corriente	68
6.4.2. Pruebas alternativas del electrocatalizador	71
6.4.3. Variación de temperatura	72
6.4.4. Incremento del flujo de aire	73
6.4.5. Curva de voltaje vs. densidad de corriente	74
6.4.6. Curva de densidad de potencia vs. densidad de corriente	74
RECOMENDACIONES	76
CONCLUSIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1. APILADO DE CELDAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	16
FIG. 2. ESTRUCTURA DE UNA CELDA PEMFC. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	18
FIG. 3. PLACAS DE ACRILICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	23
FIG. 4. ELECTRODOS DE ACERO GALVANIZADO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	24
FIG. 5. CONTENEDOR DE BUTIRATO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	25
FIG. 6. ZEOLITA CLINOPTILOLITA EN POLVO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	26
FIG. 7. PERLAS DE HIDROGEL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	27
FIG. 8. CARBÓN LIGNÍTICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	28
FIG. 9. REACCIONES QUÍMICAS DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	29
FIG. 10. CURVAS CARACTERÍSTICAS. FUENTE: N. BIZON [35]. ....	31
FIG. 11. CICLO DE LAS ROCAS. FUENTE: MASTERGIS [38]. ....	35
FIG. 12. ZEOLITA TIPO CLINOPTILOLITA. FUENTE: RUFF [41]. ....	38
FIG. 13. MICROSCOPIO PETROGRÁFICO ZEISS AXIOSCOPE 5. FUENTE: ZEISS [47]. ....	42
FIG. 14. SELECCIÓN DE MUESTRAS A ANALIZAR: A) PREPARACIÓN Y FACETADO CON MARTILLO GEOLÓGICO B) ZEOLITA CLINOPTILOLITA CON CRISTALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	43
FIG. 15. PREPARACIÓN DE LA RESINA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	44
FIG. 16. ENCAPSULADO DE MUESTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	44
FIG. 17. MUESTRAS SECAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	45
FIG. 18. PROCESO DE DESGASTE Y PULIDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	46
FIG. 19. MUESTRAS PULIDAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	46
FIG. 20. OBSERVACIÓN EN MICROSCOPIO CON LENTE X5. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA....	47
FIG. 21. JEOL JSM-6610LV. FUENTE: JEOL LTD [48]. ....	48
FIG. 22. FLUORESCENCIA DE RAYOS X. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	50
FIG. 23. PISTOLA THERMO FISHER. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	50
FIG. 24. PLACA BIPOLAR DE GRAFITO. FUENTE: FUELL CELL STORE [50].....	51
FIG. 25. PLANOS A) PLACA CATÓDICA B) ELECTRODO CATÓDICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	52

FIG. 26. PIEZAS DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	53
FIG. 27. ENSAMBLE DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	55
FIG. 28: ZEOLITAS NATURALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	56
FIG. 29. COMPONENTES: A) ZEOLITA CLINOPTILOLITA B) CARBÓN LIGNÍTICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	57
FIG. 30. PESADO DE COMPONENTES: A) HIDROGEL, B) CARBÓN LIGNÍTICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	58
FIG. 31. INYECCIÓN DE BIOETANOL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	59
FIG. 32. MEDICIÓN DE VOLTAJE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	60
FIG. 33. MEDICIÓN DE CORRIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	60
FIG. 34. PRUEBAS ALTERNATIVAS DE ELECTROCATALIZADOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	61
FIG. 35. CALENTAMIENTO DEL BIOETANOL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	62
FIG. 36. VENTILADOR DE MANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	63
FIG. 37. PETROGRAFÍA DE ZEOLITA CLINOPTILOLITA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	64
FIG. 38. MICROFOTOGRAFÍAS DE ZEOLITA CLINOPTILOLITA A) LUZ REFLEJADA B) LUZ TRANSMITIDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	65
FIG. 39. MICROFOTOGRAFÍAS DEL ELECTROCATALIZADOR A) LUZ REFLEJADA B) LUZ TRANSMITIDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	66
FIG. 40. MICROSCOPIA X15,000. FUENTE: [16].....	67
FIG. 41. MEDICIÓN DE VOLTAJE CON ELECTROCATALIZADOR DE HIDROGEL Y CARBÓN LIGNÍTICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	72
FIG. 42. MEDICIÓN DE VOLTAJE CON ELECTROCATALIZADOR DE HIDROGEL Y ZEOLITA CLINOPTILOLITA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	72
FIG. 43. MEDICIÓN CON VARIACIÓN DE TEMPERATURA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	73
FIG. 44. INCREMENTO DE FLUJO DE AIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. TIPOS DE CELDAS. FUENTE: U.S. DEPARTMENT OF ENERGY [1].	17
TABLA 2. TIPOS DE ROCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	33
TABLA 3. COSTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	54
TABLA 4. COMPOSICIÓN MINEROLÓGICA DE LA ZEOLITA CLINOPTILOLITA. FUENTE: [16].	67
TABLA 5. FLUORESCENCIA DE ZEOLITA CLINOPTILOLITA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	68
TABLA 6. VOLTAJE VS. TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	69
TABLA 7. MEDICIONES VOLTAJE Y CORRIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	70

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. VOLTAJE VS TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	69
GRÁFICA 2. VOLTAJE VS. CORRIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	71
GRÁFICA 3. VOLTAJE VS. DENSIDAD DE CORRIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	74
GRÁFICA 4. DENSIDAD DE POTENCIA VS. DENSIDAD DE CORRIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	75

**NOMENCLATURA**

<b>MEA</b>	Ensamble membrana-electrodo
<b>PEMFC</b>	Celda de Combustible de membrana de intercambio protónico
<b>DAFC</b>	Celda de Combustible de alcohol directo
<b>PAFC</b>	Celda de Combustible de ácido fosfórico
<b>MCFC</b>	Celda de Combustible de carbonato fundido
<b>SOFC</b>	Celda de Combustible de óxido sólido
<b>AEM</b>	Membrana de intercambio de aniones
<b>PMMA</b>	Polimetilmetacrilato
<b>CAB</b>	Butirato acetato de celulosa
<b>SEM</b>	Microscopía electrónica de barrido
<b>FRX</b>	Fluorescencia de rayos x

## INTRODUCCIÓN

Las Celdas de Combustible son dispositivos electroquímicos que transforman en electricidad la energía química obtenida de un combustible, son similares a una batería debido a su composición y funcionamiento, pero varía en un aspecto crucial: las baterías están limitadas por el tiempo de vida de los químicos que la conforman. Por otro lado, las celdas pueden producir electricidad mientras se suministre combustible y oxidante de forma continua, entre otros factores. Esta tecnología puede llegar a ser poderosa en nuestra época, debido a que generan energía limpia y renovable; además, pueden emplear una vasta cantidad de combustibles y oxidantes, en principio, cualquier fluido que sea apto de oxidarse puede utilizarse como combustible y cualquier fluido capaz de oxidar a otro puede ser utilizado como oxidante. A pesar del potencial de las Celdas de Combustible en la generación de energía limpia y haber demostrado su eficacia en aplicaciones como el transporte público y la propulsión de naves espaciales, su viabilidad y accesibilidad deben explorarse más a fondo para una implementación exitosa como reemplazo de fuentes convencionales como el petróleo y el carbón [1, 2].

A medida que las fuentes de energía convencionales han experimentado un rápido crecimiento, se ha incrementado la preocupación por la contaminación ambiental y su impacto en la salud pública. En respuesta a compromisos globales y a la búsqueda de alternativas más limpias, la adopción de energías sostenibles se ha convertido en una prioridad a nivel mundial [3, 4].

Este estudio se centra en investigar materiales alternativos, como la Zeolita tipo Clinoptilolita, obtenida de Atzingo, Puebla, México, hidrogel y carbón lignítico, con el propósito de desarrollar un electrocatalizador natural para Celdas de Combustible. Con el objetivo de mejorar la asequibilidad de las Celdas de Combustible, al mismo tiempo que reduce la dependencia de costosos materiales como el platino, lo que resulta en un mejor rendimiento y durabilidad. La Zeolita tipo Clinoptilolita emerge como una opción prometedora y abundante en nuestro planeta para abordar este desafío, ofreciendo una alternativa más sostenible y accesible. Al considerar los problemas asociados con la

extracción y utilización del platino [5, 6], surge esta propuesta de desarrollar un electrocatalizador alternativo para su uso en Celdas de Combustible accesibles hacia una generación de energía más asequible y sostenible, al tiempo que contribuye a la reducción de emisiones y disminuye la dependencia de la extracción de platino.

En este trabajo, el objetivo es caracterizar el mineral Zeolita tipo Clinoptilolita y posteriormente preparar un electrocatalizador para aplicarlo en una Celda de Combustible de bioetanol directo, construida con materiales accesibles. Implementando la siguiente metodología en el marco de este proyecto multidisciplinario:

En primer lugar, se realiza la caracterización de la Zeolita tipo Clinoptilolita mediante las técnicas de Petrografía, Fluorescencia de Rayos X y la Microscopía Electrónica de Barrido. Estas técnicas permiten analizar la estructura y composición de la Zeolita tipo Clinoptilolita para su posterior aplicación. Se continúa con la fase del diseño de la Celda de Combustible utilizando el software SolidWorks, una herramienta de modelado tridimensional. La construcción de la Celda de Combustible de bioetanol directo se lleva a cabo en el Laboratorio de Biología y Biocombustibles, basada en el diseño previamente creado, con el fin de crear un prototipo eficiente y funcional. Finalmente, como parte de la fase de evaluación, se ejecutan las pruebas del electrocatalizador en la Celda de Combustible en el Laboratorio de Energía Solar, estas pruebas abarcan mediciones de voltaje, temperatura y corriente, así como la obtención y análisis de las curvas características para evaluar rendimiento y la eficiencia del electrocatalizador en condiciones de funcionamiento real. Este proceso permite obtener una mejor comprensión de cómo los materiales alternativos se comportan en la Celda de Combustible y su viabilidad para implementación en aplicaciones prácticas de generación de energía sostenible.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las energías convencionales crecen a un ritmo acelerado y con ellas la contaminación, los daños que provoca esta industria energética al medio ambiente y a la población están cerca de ser irreparables. La implementación de energías limpias ha crecido en todo el mundo, por ser una gran inversión económica, una alternativa para la disminución de contaminantes que se emiten a la atmósfera y por compromisos mundiales para reducir las emisiones de carbono [7].

La tecnología de la Celda de Combustible, que ha sido utilizada para darle potencia a naves espaciales y medios de transporte, como autobuses, trenes y automóviles [1], es una alternativa poder reemplazar a la energía del petróleo y una solución versátil para los problemas energéticos y de contaminación que enfrenta esta generación, fortaleciendo respuesta a los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) como: energía asequible y no contaminante, acciones por el clima, vida y ecosistemas terrestres, entre otros [8].

Se propone estudiar materiales alternativos para que las celdas sean más accesibles y su capacidad sea aprovechada; en este trabajo se estudia específicamente materiales alternativos para diseñar un electrocatalizador, como la Zeolita tipo Clinoptilolita, hidrogel y carbón lignítico, ya que dentro de una Celda de Combustible, la MEA (Ensamble Membrana-Electrodo) es una de las partes más importantes en las celdas actuales, está conformada por la membrana y el electrocatalizador, dos elementos poco accesibles. El material más usado es el platino, inconvenientemente, tiene un precio elevado (\$1,200 MXN/g), además de que se envenena fácilmente con Dióxido de Carbono, lo que impacta en la disminución del rendimiento y la durabilidad de este material [9].

## HIPÓTESIS

La mezcla de materiales alternativos como Zeolita tipo Clinoptilolita, hidrogel y carbón lignítico funcionan como un electrocatalizador para la Celda de Combustible de bioetanol. Mediante la caracterización de la Zeolita Clinoptilolita se determina qué componentes favorecen las reacciones electroquímicas.

## OBJETIVOS

### *Objetivo General*

Caracterizar el mineral Zeolita tipo Clinoptilolita para aplicar en un electrocatalizador alternativo y utilizarlo en una Celda de Combustible de bioetanol directo, construida con materiales accesibles.

### *Objetivos Específicos*

- Caracterizar a la Zeolita Clinoptilolita para corroborar su composición química, morfológica, estructura atómica y molecular.
- Diseñar y construir una Celda de Combustible de bioetanol directo utilizando materiales accesibles como colectores de acero galvanizado, placas acrílicas y acetato.
- Desarrollar un electrocatalizador con Zeolita tipo Clinoptilolita, hidrogel y carbón lignítico.
- Implementar el electrocatalizador alternativo en la Celda de Combustible de bioetanol.
- Obtener la potencia máxima del electrocatalizador en condiciones de funcionamiento real.

## JUSTIFICACIÓN

Desde el primer compromiso internacional en materia de cambio climático, el Protocolo de Kyoto en 1998, México ha firmado 70 tratados más relacionados con el cuidado del medio ambiente [3], entre los más relevantes; el Acuerdo de París, en el que 196 países se comprometieron a reducir las emisiones de carbono, transicionar a energías renovables, reducir la deforestación, presentar estrategias ambiciosas para la mitigación del calentamiento global, educar y sensibilizar a la población, entre otras [4].

Las Celdas de Combustible, durante su funcionamiento produce  $CO_2$  neutral, que se refiere a las emisiones de dióxido de carbono iguales a cero, ya que se equilibra el  $CO_2$  liberado con el fijado por plantas durante la fotosíntesis [10]; sin embargo, aún se necesita de un incremento en la investigación y mejoras en su estructura para que sean esa solución ambiciosa que necesita el planeta para combatir la contaminación ambiental. La motivación detrás de este proyecto radica en encontrar una alternativa para el platino, un componente del electrocatalizador, es un material costoso, no hay mucha disponibilidad en el planeta y surgen muchas complicaciones con su utilización; para reemplazar las propiedades del platino se necesita un material con las siguientes características: resistencia a la corrosión, intercambio de iones, estabilidad química, buena conductividad, entre otras [11]. Este mineral se elige por su accesibilidad en el Laboratorio de Biología y Biocombustibles.

La elección de la Zeolita tipo Clinoptilolita como catalizador ofrece la perspectiva de aprovechar un material abundante y prometedor que puede redefinir la viabilidad y el alcance de esta tecnología; además ofrece un camino hacia una energía más limpia y accesible, alineándose con los objetivos nacionales e internacionales de mitigación del cambio climático y desarrollo sustentable. La firma de diversos tratados, incluido el histórico Acuerdo de París, demuestra una voluntad firme de abordar los desafíos globales y reducir la huella ambiental. En última instancia, este proyecto se suma a la valiosa contribución de México en la búsqueda de soluciones a los desafíos ambientales y energéticos actuales.

## IMPACTO SOCIAL

El material más utilizado como el electrocatalizador en Celdas de Combustible tipo PEMFC (Membrana de Intercambio Protónico), es el platino, sin embargo surgen muchos inconvenientes de su extracción y utilización, como liberación de elementos contaminantes, contaminación del agua, problemas de salud como enfermedades respiratorias, que resultan insostenibles [6, 12]. Con la implementación de Zeolita tipo Clinoptilolita se pueden evitar los efectos negativos que provoca la minería de platino, como pobreza, contaminación, prácticas ilegales e incluso violencia de género. En Colombia está una de las zonas principales de extracción de platino y otros metales de todo América Latina. En estas minas existen muchas organizaciones ilegales que explotan las zonas y que no brindan ningún beneficio económico o bienestar para la población; desafortunadamente en muchas de estas ubicaciones hay mucha pobreza, como resultado, la carencia, inseguridad y violencia incrementan, se opera sin medidas de seguridad industrial por lo que la esperanza de vida de los mineros es muy corta, además los espacios naturales y la diversidad terminan en riesgo y sin posibilidades de recuperarse [5] .

La minería y extracción del platino se caracterizan por ser procesos intensivos en el uso de recursos y energía, que conllevan impactos significativos en el medio ambiente. La obtención de este metal precioso implica la extracción de grandes cantidades de roca y su procesamiento a través de métodos como la trituración y la separación por flotación. Por otro lado, la Zeolita Clinoptilolita puede encontrarse en capas delgadas y extraerse mediante métodos menos invasivos, por ejemplo mediante el muestreo superficial, en este caso evitando la necesidad de realizar excavaciones, lo que reduce la huella de carbono y el consumo de energía asociados con la extracción [13, 14]. Se propone la elaboración de un electrocatalizador de Zeolita tipo Clinoptilolita, hidrogel y carbón lignítico, para su utilización en una Celda de Combustible construida con materiales accesibles. Estos elementos sustentados con investigaciones previas por el Cuerpo Académico BUAP-CA-37 [15, 16]. El desarrollo de este dispositivo permite obtener energía asequible con un proceso más sustentable para el medio ambiente y la población, favoreciendo las reacciones químicas de la Celda de Combustible.

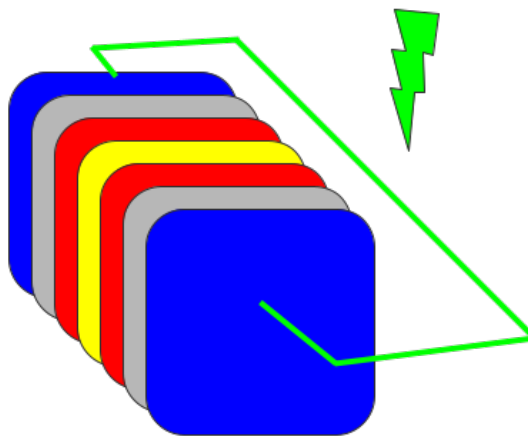
## CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

### 1.1. CELDA UNITARIA

La celda unitaria es el núcleo de la Celda de Combustible, aquí es donde se convierte la energía química obtenida de un combustible en energía eléctrica. Su estructura básica consiste en dos electrodos y un electrolito. Típicamente, el combustible es suministrado continuamente por el electrodo negativo, el ánodo, y el oxidante es suministrado continuamente por el electrodo positivo, el cátodo. Estos componentes mencionados tienen funciones notables dentro de la celda; favorecen las reacciones químicas necesarias para su funcionamiento, el electrolito sirve como medio de transporte para los reactivos, conduce la carga iónica entre los electrodos, posibilita el circuito eléctrico externo y proporciona una barrera física para evitar [1].

En la práctica y en la industria, las celdas unitarias se conectan en serie y apilan en *stacks* para conseguir voltajes mayores y la potencia necesaria tal y como ilustrado en la Figura 1. Al apilamiento más utilizado actualmente se le conoce como platos bipolares, este tiene dos funciones de provecho [1,17]:

- Proporciona una conexión eléctrica en serie.
- Sirve como barrera entre el combustible y el oxidante.



*Fig. 1. Apilado de celdas. Fuente: Elaboración propia.*

### 1.1.1. Clasificación

Las Celdas de Combustible se encuentran clasificadas principalmente bajo dos categorías: según su electrolito y según el combustible que utilizan [1, 18]. Los tipos de celdas según su electrolito y sus características principales se mencionan en la Tabla 1, a continuación:

Tabla 1. Tipos de Celdas. Fuente: U.S. Department of Energy [1].

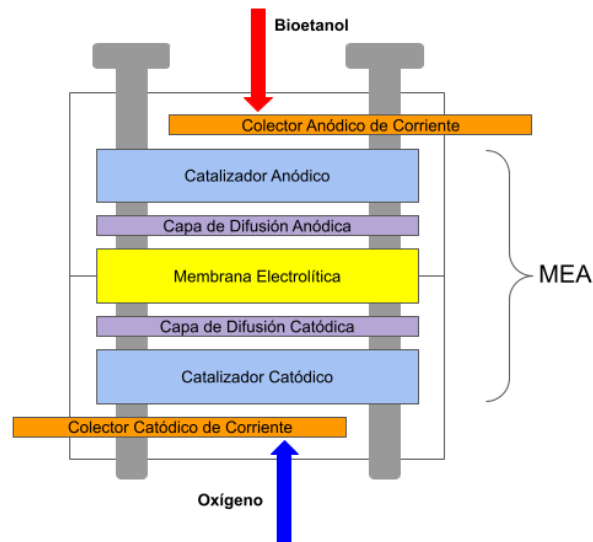
TIPOS DE CELDAS	PEMFC	DAFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolito	Nafión	Hidróxido de Potasio (KOH)	Ácido Fosfórico	Carbonato Líquido	Perovskitas
Electrodos	Carbón	Metales de Transición	Carbón	Níquel y Óxido de Níquel	Perovskita y Cermet
Catalizador	Platino	Platino	Platino	Material de Electrodo	Material de Electrodo
Interconexión	Carbón o Metal	Metal	Grafito	Acero Inoxidable o Níquel	Níquel, Cerámica o Acero
Temperatura de Operación	40 - 80 °C	65 - 220 °C	205 °C	650 °C	600 - 1000 °C

## 1.2. CELDAS DE COMBUSTIBLE PEMFC

La tecnología de la PEMFC o PEM fue concebida alrededor de 1960 por Thomas Grubb y Leonard Niedrach, ingenieros en General Electric (GE, en colaboración con la Oficina de Buques de la Marina de los Estados Unidos y el Cuerpo de Señales del Ejército de los Estados Unidos). Esta unidad funcionaba con hidrógeno generado a partir de una mezcla de agua e hidruro de litio contenida en envases desechables, lo que la hacía portátil y adecuada para su uso en el campo además de catalizadores de platino. Operaba a temperaturas relativamente bajas (alrededor de 79.4 °C), tenía una alta densidad de potencia y la capacidad de ajustar su

producción según la demanda, lo que la hacía idónea para aplicaciones como vehículos donde se requiere un arranque rápido [2, 19].

En la actualidad, las Celdas de Combustible tipo PEM operan en un rango de temperaturas de 40-80 °C. Utilizan como electrolito al Nafión, un polímero con la capacidad de intercambio de iones y un excelente conductor de protones, sus electrodos son de carbón y emplea platino como electrocatalizador. Una de sus ventajas más destacada es la mínima corrosión. Algunas de sus desventajas son: manejo de agua y calor, ahogamiento del electrolito, envenenamiento por absorción de  $CO_2$  y subproductos como el acetaldehído, entre otras [1, 2, 17]. La estructura típica de una Celda de Combustible tipo PEM consiste de dos placas contenedoras, placas bipolares colectoras de corriente (o electrodos) y la MEA, que a su vez contiene a la membrana electrolítica, capas de difusión y catalizador, tal y como se ilustra en la Figura 2:



*Fig. 2. Estructura de una Celda PEMFC. Fuente: Elaboración propia.*

### 1.2.1 Electrodo

Los electrodos en una Celda de Combustible permiten la reacción química entre el combustible y el oxidante (generalmente oxígeno del aire) para producir energía eléctrica, liberando agua como subproducto. Además, los electrodos también deben ser conductores eléctricos, para recolectar y poder medir la energía a través de estos. La investigación y

elaboración de electrodos se ha enfocado en mejorar su funcionamiento y en encontrar soluciones a algunos de los problemas presentes en estos, como [1, 2]:

- Estructuras con varias capas de materiales porosos, optimizadas para el flujo del electrolito y gases.
- Corrientes parásitas, ya que son una amenaza para los electrodos y el rendimiento general de la pila. Una solución para esto es diseñar los electrodos con un marco, además de una geometría con canales largos y angostos.
- Encontrar componentes de costos menores y mejor funcionamiento. En este ámbito, se ha encontrado que utilizar electrodos porosos a base de carbono resulta muy favorecedor.
- Desarrollo de procesos de bajo costo para la manufactura.

Es importante que los electrodos sean porosos por las siguientes razones [1]:

- Proporcionan una zona en la que se llevan a cabo las reacciones electroquímicas.
- Conducen los electrones lejos o hacia la interfaz trifásica.
- Por la buena conductancia que proporcionan los materiales porosos.
- Proporcionan recolección de corriente y conexión con otras celdas o una carga.
- Son eficientes en distribuir y transportar los gases reactivos uniformemente.

### ***1.2.2. Ensamble Membrana-Electrodo (MEA)***

La MEA se divide en cinco partes [1, 17]:

- Capa de difusión anódica: proporciona estructura mecánica al ánodo y sirve como vía de transporte para los reactivos y productos, además sirve como colector y conductor de energía.
- Capa de catalizador anódico: proporciona una superficie activa para llevar a cabo las reacciones electroquímicas correspondientes, sirve como otra vía de transporte para los reactivos y productos, al mismo tiempo que posibilita el paso de electrones y protones.
- Membrana electrolítica: portador de protones, puede ser PEM o membrana de intercambio de aniones (AEM).

- Capa de catalizador catódico: proporciona una superficie activa para llevar a cabo las reacciones electroquímicas correspondientes, sirve como otra vía de transporte para los reactivos y productos, al mismo tiempo que posibilita el paso de electrones y protones.
- Capa de difusión catódica: proporciona estructura mecánica al cátodo y sirve como vía de transporte para los reactivos y productos, además sirve como colector y conductor de energía.

### ***1.2.3. Electrolito***

La Membrana Electrolítica o electrolito permite el flujo de iones entre el ánodo y el cátodo, lo que genera una corriente eléctrica en la celda. Además, actúa como aislante eléctrico, asegurando que los electrones fluyan a través de un circuito externo. La circulación del electrolito por la celda tiene los siguientes beneficios [1]:

- Hidratación de todos los componentes ya que contiene agua.
- Gestiona el calor al poder comportarse como un refrigerante.
- Concentración de impurezas para posteriormente poder eliminarlas con mayor facilidad.
- Disminuye la concentración de  $OH^-$ .
- Evita la aglomeración de burbujas de gas entre los electrodos y el electrolito.

### ***1.2.4. Electrocatalizador***

El electrocatalizador desempeña un papel crucial al acelerar significativamente las reacciones químicas que tienen lugar dentro de la celda unitaria y facilitar el transporte de reactivos clave. En este contexto, existen varias opciones de catalizadores que se utilizan en aplicaciones de Celdas de Combustible. Entre estos catalizadores, los más comunes son los siguientes [1, 11]:

- Metales nobles: como el platino, este material se destaca por su alto rendimiento en términos de aceleración de reacciones, lo que lo convierte en una elección de referencia. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el platino también es conocido por su costo relativamente elevado y los problemas asociados con su extracción.

- Metales no nobles: como la plata en el cátodo y el níquel-raney en el ánodo. Estos catalizadores ofrecen una alternativa a los metales nobles y pueden ser más económicos. Su uso en ha demostrado ser efectivo, especialmente en aplicaciones donde se busca un equilibrio entre rendimiento y costos.
- Catalizadores alternativos: como las espinelas y perovskitas, estos catalizadores representan una categoría en desarrollo y de menor costo en comparación con los metales nobles. A medida que se han realizado avances en su desarrollo, se ha observado una mejora continua en su rendimiento, lo que los convierte en una opción prometedora para futuras aplicaciones.

Cada tipo de catalizador tiene sus propias ventajas y desafíos, y la selección depende de las necesidades específicas de la aplicación y de consideraciones económicas. A medida que la investigación y el desarrollo continúan en este campo, es posible que se vean avances significativos en la optimización de catalizadores para Celdas de Combustible, sobre todo en el desarrollo de electrocatalizadores alternativos [1, 11].

#### ***1.2.5. Platino***

El elemento platino, cuyo símbolo es *Pt*, corresponde a un metal que ocupa la posición número 78 en la tabla periódica en función de su número atómico. Asume el lugar 72 en abundancia natural entre los elementos de la corteza terrestre, por su poca disponibilidad en el planeta, es uno de los metales más valiosos. Tiene buena resistencia al ataque químico, es dúctil, maleable, tiene un valor de conductividad eléctrica de  $9.4 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$  y un punto de fusión de 1772 °C [20-22].

#### ***1.2.6. Combustible***

Las Celdas de Combustible son una tecnología prometedora, que ofrecen la posibilidad de una generación de energía más limpia y eficiente; su principal combustible es el hidrógeno, lo que implica ciertas complicaciones relacionadas con la manipulación segura de este gas. Para que las PEM sean viables a gran escala, es crucial abordar los desafíos asociados con el hidrógeno, como su almacenamiento y transporte. En este contexto, el bioetanol emerge como una alternativa atractiva. Este biocombustible se puede producir a partir de fuentes sostenibles, como biomasa y cultivos renovables, lo que reduce

significativamente su impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles. El bioetanol es líquido a temperatura ambiente, lo que simplifica su distribución y almacenamiento, eliminando la necesidad de infraestructuras costosas y complejas de hidrógeno comprimido o licuado. Además, este combustible puede utilizarse directamente en las Celdas de Combustible sin necesidad de procesos de reformación, lo que simplifica aún más la operación y accesibilidad de estas celdas [15, 23].

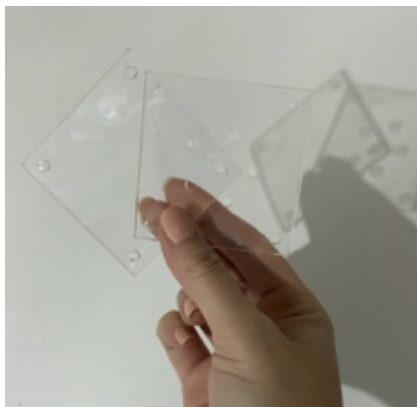
### ***1.2.7. Placas bipolares de acrílico***

El acrílico, reconocido igualmente como PMMA o plexiglás, se identifica químicamente como polimetilmetacrilato (Fig. 3). Este material incluye diferentes formas como monómeros, placas, pellets, resinas y compuestos. Para hacer láminas de acrílico, se utiliza un proceso de polimerización con MMA. Este material destaca por su transparencia, estabilidad química, resistencia al clima, capacidad de teñido, facilidad de manejo y aspecto atractivo. Es uno de los plásticos más antiguos y versátiles del mundo, ampliamente utilizado debido a su durabilidad y su capacidad para satisfacer diversas necesidades en varias industrias [24].

**Ventajas:** Entre sus beneficios se encuentran su resistencia al rompimiento, superficie suave y transparencia. Aunque es ligero, es más resistente que el vidrio. Su alta transparencia lo hace perfecto para situaciones donde la claridad visual es esencial. También es fácil de limpiar, mantener y reciclar. Además, el acrílico ofrece una buena resistencia a los arañazos, superando a la mayoría de los plásticos. Tiene una notable resistencia química, es resistente a la intemperie, duradera, y brinda un brillo superficial excepcional, todo mientras mantiene un rendimiento óptimo incluso en condiciones de alta temperatura. En caso de rotura, no produce fragmentos afilados como el vidrio, lo que aumenta su seguridad en diversas aplicaciones [24].

**Desventajas:** Es susceptible a rayones, lo que puede afectar su apariencia y transparencia. A pesar de ser más resistente que el vidrio, todavía es relativamente frágil y puede romperse con impactos fuertes. También puede degradarse en presencia de ciertos productos químicos. La expansión y contracción térmica pueden causar tensiones internas y deformación. Además, es vulnerable a la radiación ultravioleta, lo que puede provocar cambio de color y fragilidad con la exposición prolongada al sol. Su costo puede ser más alto que otros plásticos

y tiende a acumular polvo y suciedad en su superficie, lo que requiere limpieza regular para mantener su transparencia y apariencia en condiciones óptimas [24].



*Fig. 3. Placas de acrílico. Fuente: Elaboración propia.*

### **1.2.8. Electrodo de acero galvanizado**

El acero galvanizado (Fig. 4) se puede describir como una variante de acero que ha sido recubierta con múltiples capas de Zinc, actuando como un recubrimiento que resguarda contra la oxidación, haciendo más fuerte el material, más resistente y de mayor duración. Este acero es demandado por varios sectores de la industria ingenieril debido a su costo accesible, a la gran duración, y resistencia que tienen. Sin embargo, su mayor atractivo es su resistencia a la corrosión, lo que hace que aguante largos periodos de tiempo sin oxidarse ni corroerse [25].

**Ventajas:** Es resistente y duradero, tiene la particularidad de ser resistente a la corrosión debido al recubrimiento con Zinc y una gran durabilidad ya que es un metal resistente a la corrosión y a las rayaduras, se puede reciclar varias veces sin que pierdan sus propiedades, se puede reutilizar y mezclar con otros materiales, es muy económico, es muy resistente tanto al tiempo como a temperaturas altas, aunque lo recomendable es no exponerlo a temperaturas de más de 200 °C [25].

**Desventajas:** No se puede usar para todo tipo de proyectos, hay ciertos materiales que no son compatibles con el acero galvanizado por su composición en zinc. A lo largo del tiempo, el recubrimiento de zinc puede deteriorarse, especialmente en ambientes corrosivos, lo que puede llevar a la formación de óxido. Además, el proceso de galvanización puede aumentar

el costo inicial de los productos de acero y agregar peso adicional debido al recubrimiento de zinc. Existe también un impacto ambiental asociado al uso del zinc en la galvanización, que si no se gestiona adecuadamente, puede contribuir a la contaminación del agua y el suelo. Su estética puede no ser adecuada para todas las aplicaciones [25].



*Fig. 4. Electrodo de Acero Galvanizado. Fuente: Elaboración propia.*

#### **1.2.9. Estructura contenedora de butirato (CAB)**

El butirato de acetato de celulosa, también llamado butirato o CAB por sus siglas en inglés o simplemente, acetato, es un termoplástico versátil ampliamente utilizado en diversas aplicaciones. A partir de esta sustancia se pueden crear nuevas formas sin alterar su estructura molecular. Es un material plástico relativamente duro que se puede producir en forma transparente o en una amplia variedad de tintes (Fig. 5) [26].

**Ventajas:** Entre sus ventajas destacan su probada estabilidad frente a la radiación ultravioleta, lo que lo hace adecuado para entornos al aire libre y condiciones climáticas extremas. Además, ofrece una alta resistencia al impacto, lo que garantiza su durabilidad en situaciones que involucran golpes o choques. Su fuerte resistencia química y a la intemperie a largo plazo lo convierte en una elección sólida para aplicaciones que requieren una larga vida útil en condiciones adversas. También se destaca por su flexibilidad, por su capacidad de ser teñido en una amplia variedad de colores, por poder ser trabajado mediante técnicas de serigrafía, decoración y estampado, lo que lo hace muy popular en términos de diseño y personalización [26].

**Desventajas:** Este material tiende a ser más costoso en comparación con otros plásticos debido a los procesos de producción adicionales que requiere. Además, es sensible a cetonas y alcoholes, lo que puede limitar su uso en aplicaciones donde estos productos químicos estén presentes. También se debe considerar su posible fragilidad bajo impactos fuertes, a pesar de su resistencia al impacto en condiciones normales. Es importante mencionar que puede ser susceptible a la radiación ultravioleta en exposiciones prolongadas, lo que puede provocar cambios en su apariencia y propiedades con el tiempo [26].



*Fig. 5. Contenedor de butirato. Fuente: Elaboración propia.*

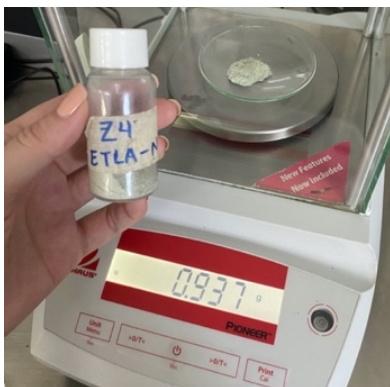
#### ***1.2.10. Electrocatalizador de Zeolita tipo Clinoptilolita***

La Clinoptilolita, una variante particular de Zeolita, es un mineral aluminosilicato que se distingue por su estructura cristalina microporosa (Fig. 6). Su composición principal, compuesta mayormente por aluminio y silicio, le otorga la capacidad excepcional de participar en intercambios iónicos y diversas funciones catalíticas y de adsorción, lo que la convierte en un recurso excepcionalmente valioso en una amplia gama de aplicaciones [27-29].

**Ventajas:** La Zeolita Clinoptilolita destaca por su estructura cristalina microporosa que le confiere una excepcional capacidad de intercambio iónico, resultando altamente efectiva en la eliminación de contaminantes de soluciones acuosas. Su versatilidad abarca desde la purificación del agua hasta aplicaciones en agricultura y ganadería. Esta zeolita captura y libera moléculas de manera eficiente gracias a su intrincada estructura tridimensional de

canales y cavidades, permitiendo una deshidratación reversible. Su amplio rango de aplicaciones y propiedades únicas la hacen invaluable en diversos contextos. Una de las ventajas más destacadas de la Zeolita tipo Clinoptilolita radica en su alta capacidad de intercambio iónico, lo que la convierte en una elección valiosa para facilitar reacciones electroquímicas en una Celda de Combustible. Además, su estructura porosa y la amplia área superficial que esta proporciona aumentan la eficiencia de las reacciones electroquímicas y la difusión de especies iónicas, mejorando así el rendimiento del electrocatalizador [27-29].

**Desventajas:** Sin embargo, también es importante considerar algunas desventajas asociadas a este material. La Zeolita tipo Clinoptilolita es sensible a la humedad, lo que puede influir en su capacidad de intercambio iónico y su desempeño en condiciones de alta humedad. Aunque es resistente a la mayoría de los productos químicos, su durabilidad podría verse afectada en entornos extremadamente corrosivos o en presencia de soluciones altamente ácidas o alcalinas [27-29].



*Fig. 6. Zeolita Clinoptilolita en polvo. Fuente: Elaboración propia.*

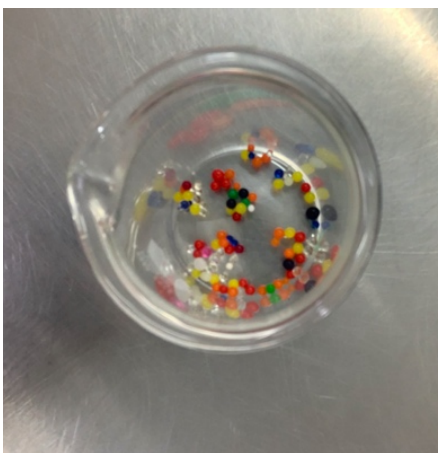
### ***1.2.11. Membrana poliacrilato de sodio***

El hidrogel (Fig. 7) forma parte una clase de geles poliméricos hidrofílicos que se caracterizan por su estructura tridimensional capaz de absorber grandes volúmenes de agua. Este proceso de absorción provoca un significativo aumento en su tamaño sin que pierdan su integridad o forma original, hasta llegar a su máxima capacidad de hidratación. En su estado seco, los geles hidrofílicos son sólidos y rígidos; sin embargo, al entrar en contacto con una solución acuosa, esta penetra en su estructura interna, llevando al gel a expandirse hasta

alcanzar un equilibrio fisicoquímico. Este proceso de difusión implica la migración del agua a través de los espacios existentes entre las cadenas del hidrogel, ya sean estos preexistentes o generados dinámicamente [30].

**Ventajas:** El hidrogel ofrece ventajas importantes, como su habilidad para retener y liberar el agua, crucial en aplicaciones electroquímicas que requieren una hidratación controlada. Además su estructura polimérica permite personalizar sus propiedades según necesidades específicas [30].

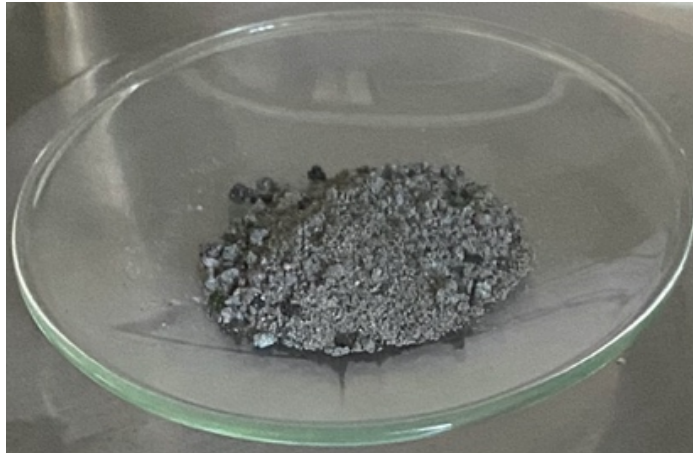
**Desventajas:** Las desventajas a considerar son, que pueden afectar su rendimiento las variaciones en la temperatura y la humedad, deshidratándolo en altas temperaturas y reduciendo su capacidad de transporte de iones. Además, en entornos extremadamente ácidos o alcalinos, su durabilidad puede verse comprometida, limitando su aplicabilidad en condiciones corrosivas [30].



*Fig. 7. Perlas de hidrogel. Fuente: Elaboración propia.*

### ***1.2.12. Difusor de carbón lignítico***

El lignito, es un tipo de carbón fósil de formación reciente, posterior a la hulla (Fig. 8). Se clasifica como un combustible de calidad media, con un contenido de carbono que oscila entre el 60% y el 75% [15, 31].



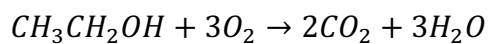
*Fig. 8. Carbón lignítico. Fuente: Elaboración propia.*

**Ventajas:** El carbón lignítico presenta una gran cantidad de oxígeno, humedad y cenizas. También se ha observado que tiene una notable capacidad de intercambio de iones. Uno de los aspectos más destacados del carbón lignítico es su porosidad, lo que le permite absorber gases, líquidos y sustancias orgánicas, lo que resulta útil en aplicaciones de purificación y separación [15, 31].

**Desventajas:** El carbón lignítico puede presentar desafíos debido a que requiere un manejo cuidadoso por su volatilidad y capacidad de combustión espontánea. Es esencial llevar a cabo ciertos procesos de optimización y eficiente para garantizar un uso eficiente en diversas aplicaciones [15, 31].

### 1.3. REACCIONES QUÍMICAS

Las reacción general que ocurre dentro de la celda se expresa mediante la siguiente ecuación, las reacciones en el ánodo y cátodo se presentan en la Figura 9 [15]:



Ec. 1. Reacción general

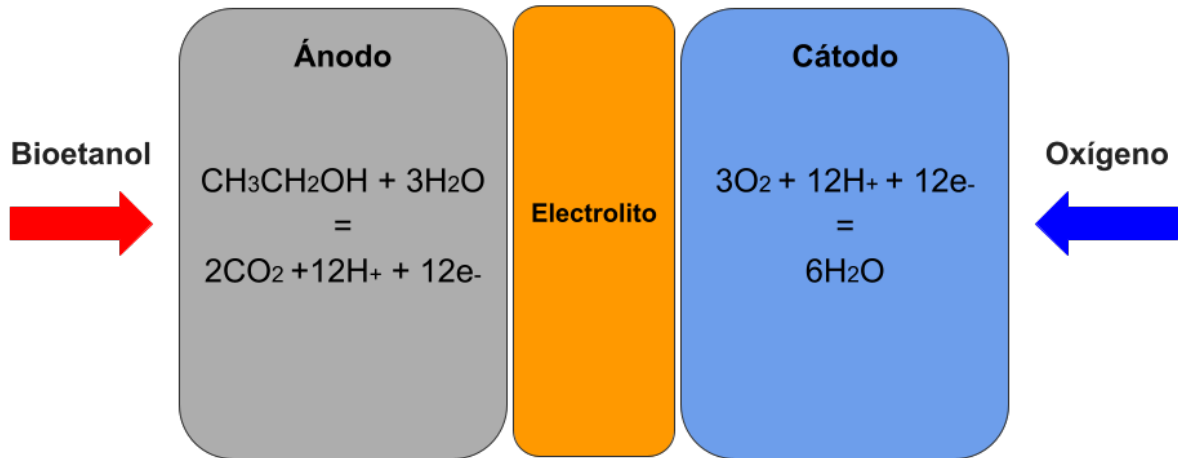


Fig. 9. Reacciones químicas de una Celda de Combustible. Fuente: Elaboración propia.

## 1.4. CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

### 1.4.1. Curva IV

Una Curva IV, también conocida como Curva de Corriente-Voltaje, se emplea para comprender cómo un dispositivo responde a diferentes niveles de voltaje y cómo cambia la corriente eléctrica que fluye a través del dispositivo en función del voltaje que se aplica. Si se observa una Curva IV, se pueden identificar varios aspectos cruciales del dispositivo. Por ejemplo, se puede encontrar el voltaje en el que la corriente es máxima, lo que indica el punto óptimo de funcionamiento; se puede encontrar su voltaje de umbral, que indica el voltaje mínimo necesario para que el dispositivo comience a conducir corriente eléctrica. También se puede detectar la resistencia eléctrica del dispositivo en diferentes puntos de la curva, lo que es esencial para comprender su eficiencia y rendimiento [32, 33].

### 1.4.2. Ley de Ohm

La relación fundamental entre voltaje y corriente se rige por la Ley de Ohm, uno de los principios fundamentales de la electricidad y establece una relación simple entre tres variables eléctricas clave: la corriente eléctrica ( $I$ ), el voltaje ( $V$ ) y la resistencia eléctrica ( $R$ ). Fue formulada por el físico alemán Georg Simon Ohm en el siglo XIX y se expresa mediante la siguiente ecuación [32-34]:

$$V = I \cdot R$$

Ec. 2. Ley de Ohm

donde  $V$  representa voltaje en Volts ( $V$ ),  $I$  representa intensidad o corriente en Amperios ( $A$ ) y  $R$  representa resistencia en Ohms ( $\Omega$ ).

En otras palabras, si aumentas el voltaje en un circuito con una resistencia constante, la corriente eléctrica también aumentará. Del mismo modo, si se mantiene constante el voltaje y se aumenta la resistencia, la corriente disminuirá. Esta ley es fundamental para el diseño y análisis de circuitos eléctricos y electrónicos, ya que permite calcular la corriente, el voltaje o la resistencia en función de las otras dos variables conocidas. Además, es esencial para comprender el funcionamiento de dispositivos eléctricos, como resistores, conductores, semiconductores y circuitos integrados [32, 33].

### ***1.4.3. Curvas características***

Dentro del estudio y evaluación del rendimiento de las Celdas de Combustible, se emplean dos curvas características: la "Curva de Voltaje vs. Densidad de Corriente" y la "Curva de Densidad Potencia vs. Densidad de Corriente" (Fig. 10) [1, 35].

La Curva de Voltaje vs. Densidad de Corriente traza la relación entre el voltaje producido por la Celda de Combustible y la densidad de corriente que fluye a través de su área activa. En otras palabras, proporciona información crucial sobre cómo varía la tensión eléctrica en función de la cantidad de corriente eléctrica que la celda es capaz de generar, la curva permite evaluar cómo se comporta en diferentes situaciones la celda. Al estudiar esta curva se puede identificar la tensión máxima que la celda puede proporcionar a una cierta densidad de corriente [1, 35].

La Curva de Densidad Potencia vs. Densidad de Corriente muestra cómo se relaciona la potencia eléctrica generada con la densidad de corriente que atraviesa la celda. La potencia es una medida crítica de la capacidad de la Celda de Combustible para realizar trabajo útil y es de gran relevancia para aplicaciones prácticas. Esta curva permite evaluar la eficiencia y el rendimiento global de la Celda de Combustible. Al observar esta curva, se puede identificar el punto óptimo de operación, donde se obtiene la máxima potencia [1, 35].

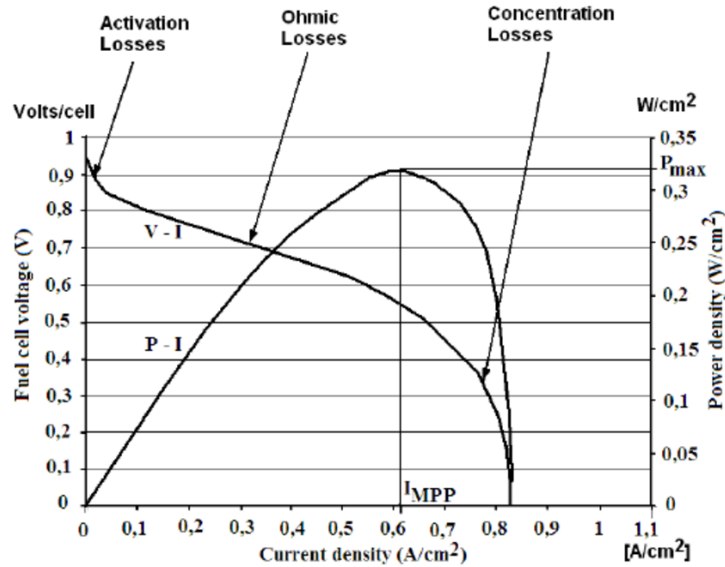


Fig. 10. Curvas características. Fuente: N. Bizón [35].

#### 1.4.4. Densidad de corriente

La densidad de corriente ( $\delta$ ) cuantifica la cantidad de corriente eléctrica que fluye a través de una unidad de área en un conductor o dispositivo. Es una magnitud esencial para comprender y diseñar sistemas eléctricos eficientes, ya que permite evaluar cómo se distribuye la corriente en un componente y cómo afecta su rendimiento en términos de temperatura, pérdidas de energía y capacidad de carga. Matemáticamente se expresa como [32-34]:

$$\delta = \frac{I}{A} \quad \text{Ec. 3. Densidad de Corriente}$$

donde  $\delta$  es densidad de corriente ( $A/cm^2$ ),  $I$  es corriente eléctrica (A) y  $A$  es área ( $cm^2$ ).

#### 1.4.5. Potencia eléctrica

La potencia eléctrica ( $P$ ) se mide en watts y es un concepto fundamental que representa el gasto de energía en un sistema eléctrico. Esta magnitud resulta especialmente valiosa cuando se busca determinar cuánta energía consume un aparato eléctrico, lo que permite evaluar la eficiencia energética e impacto económico. Además, también influye en la

selección de cables, fusibles y dispositivos de protección en instalaciones eléctricas, garantizando un funcionamiento seguro y eficiente en una amplia variedad de aplicaciones. Por lo tanto, comprender y calcular la potencia eléctrica es fundamental para optimizar el consumo de energía y promover la sostenibilidad en la sociedad actual. Matemáticamente se expresa como [32-34]:

$$P = I \cdot V \quad \text{Ec. 4. Potencia Eléctrica}$$

donde  $P$  es potencia eléctrica ( $W$ ),  $I$  es corriente eléctrica ( $A$ ) y  $V$  es voltaje ( $V$ ).

#### ***1.4.6. Densidad de potencia***

Para propósitos de las curvas características se requiere conocer la Densidad de Potencia, que corresponde a la Potencia dividida entre unidad de área, es decir [32-34]:

$$S = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. 5. Densidad de Potencia}$$

donde  $S$  es densidad de potencia ( $W/cm^2$ ),  $P$  es potencia eléctrica ( $W$ ) y  $A$  es área ( $cm^2$ ).

### **1.5. MINERALES**

Un mineral es una sustancia sólida, que puede ser natural o artificial, con una composición química y un sistema cristalino definido, que se formó a través de procesos geológicos en la Tierra. Ningún mineral es igual a otro, cada mineral tiene una composición y estructura únicas. Existen dos tipos [36]:

- Mono mineral: Sustancia compuesta por un solo tipo de mineral.
- Poli mineral: Sustancia compuesta de varios tipos de minerales en proporciones variables.

Un yacimiento de minerales se refiere a una ubicación geológica o depósito en la Tierra donde se encuentran múltiples minerales, que pueden variar en términos de composición y estructura cristalina [36].

### 1.5.1. Rocas

Una roca es un conjunto de minerales y otros materiales que se encuentran juntos en la Tierra. Los tipos de rocas se mencionan en la Tabla siguiente [37]:

*Tabla 2. Tipos de Roca. Fuente: Elaboración propia.*

Tipo de Roca	Componentes	Subtipos de Rocas	Ejemplos
Rocas Ígneas	Magma o lava fundida solidificada.	Intrusivas (Plutónicas), Extrusivas (Volcánicas), Porfídicas	Granito, Basalto, Andesita, Riolita
Rocas Sedimentarias	Sedimentos como arcillas, arenas, carbonatos, restos orgánicos, minerales disueltos.	Químicas, Biológicas, Bioquímicas, Mecánicas	Areniscas, Calizas, Arcillas
Rocas Metamórficas	Rocas preexistentes sometidas a cambios en presión y temperatura sin fundirse.	Metamórficas de Contacto, Metamórficas Regionales	Esquistos, Mármol, Pizarra

### 1.5.2. Ciclo de las rocas

A lo largo de millones de años, las rocas están sujetos a ciclos de cambios y procesos geológicos de la Tierra, en un ciclo continuo y dinámico que moldea la superficie terrestre. Este proceso se divide en tres categorías principales de rocas y los correspondientes procesos que las transforman (Fig. 11) [37]:

- Rocas ígneas: se generan mediante el proceso de enfriamiento y solidificación de magma o lava. Pueden ser intrusivas (formadas en el interior de la Tierra) o extrusivas (formadas en la superficie). Con el tiempo, las rocas ígneas pueden someterse a erosión y descomposición para convertirse en sedimentos.
- Rocas sedimentarias: Las rocas sedimentarias se forman a partir de la acumulación y compactación de sedimentos, como arena, arcilla, lodo y fragmentos de roca. Estos

sedimentos se depositan en capas a lo largo del tiempo, la presión resultante y los procesos químicos pueden convertirlos en rocas sedimentarias.

- Sedimentarias químicas: Estas rocas se producen a causa de la precipitación de minerales disueltos en agua. A medida que el agua se evapora o se satura con minerales, los minerales se cristalizan y se depositan en capas.
- Sedimentarias biológicas: Estas rocas se forman a partir de restos de organismos, como conchas, esqueletos y restos de plantas.
- Sedimentarias bioquímicas: Se forman a partir de procesos químicos que involucran la actividad de organismos. Por ejemplo, el arrecife de coral es un ejemplo de una roca bioquímica, ya que se forma por la acción de los corales y otros organismos marinos que secretan carbonato de calcio.
- Sedimentarias mecánicas: Estas rocas se forman a partir de fragmentos de otras rocas. Los procesos mecánicos, como la erosión y la sedimentación, son responsables de la formación de estas rocas. Los ejemplos incluyen areniscas, conglomerados y brechas.
- Rocas metamórficas: Las rocas metamórficas se producen a partir de rocas ya existentes que han experimentado presiones y temperaturas altas en el subsuelo. Esto puede ocurrir debido a la actividad tectónica, como el choque de placas continentales. Las rocas metamórficas resultan de la transformación de otras rocas, ya sean ígneas, sedimentarias o incluso otras metamórficas.



Fig. 11. Ciclo de las rocas. Fuente: Mastergis [38].

### 1.5.3. Caracterización de las rocas

Antes de llevar a cabo cualquier técnica de caracterización más avanzada en muestras de rocas, es fundamental realizar un análisis petrológico y petrográfico, ya que proporcionan una comprensión fundamental de la mineralogía, la textura y la historia geológica. Una vez que se comprende la composición mineralógica se pueden seleccionar otras técnicas de caracterización [37]:

- La petrología es la rama de la geología que se encarga del estudio de las rocas en términos de su origen, composición, textura, estructura y distribución en la Tierra. Los petrólogos investigan cómo se forman las rocas, qué minerales las componen, su historia geológica y cómo han evolucionado a lo largo del tiempo.
- La petrografía es una subdisciplina de la petrología que se centra en la identificación y descripción mineralógica, la textura de la roca, cómo están dispuestos los minerales, y la historia geológica mediante el estudio en microscopio de láminas de la roca.

## 1.6. ZEOLITAS

Las zeolitas son minerales formados por aluminosilicatos; suelen desarrollarse en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas [27, 28, 39].

- Rocas ígneas: Las zeolitas pueden formarse en cavidades y vesículas de rocas ígneas, especialmente en basaltos y riolitas. Estas cavidades se llenan con soluciones acuosas ricas en minerales que contienen silicio y aluminio, lo que proporciona los elementos necesarios para la formación de zeolitas.
- Rocas sedimentarias: Las zeolitas también se encuentran en ciertas rocas sedimentarias. Se forman cuando las soluciones ricas en minerales circulan a través de las capas de sedimentos y depositan zeolitas en los poros de esas rocas. Los depósitos sedimentarios de zeolitas suelen ser menos comunes que los depósitos ígneos.
- Ambientes de alteración metamórfica: En algunas condiciones de metamorfismo, las zeolitas pueden formarse a partir de minerales preexistentes debido a cambios en la temperatura y la presión. Estos minerales se convierten en zeolitas debido a la influencia de fluidos hidrotermales ricos en elementos como silicio, aluminio y agua.
- Ambientes hidrotermales: Las zeolitas también se pueden encontrar en depósitos hidrotermales, donde se forman a través de procesos geotérmicos. En estos entornos, el agua caliente rica en minerales fluye a través de las rocas y deposita zeolitas en cavidades y fisuras.

### 1.6.1. Tipos de zeolitas

Los tipos de Zeolitas más comunes son los siguientes [27, 28]:

- Clinoptilolita: Es una de las zeolitas más comunes y se encuentra en depósitos sedimentarios y volcánicos. Se utiliza en aplicaciones industriales, especialmente en la purificación de agua y la eliminación de metales pesados.
- Natrolita: Tiene una estructura cristalina única y a menudo forma cristales alargados y prismáticos. Se encuentra en cavidades de rocas ígneas y sedimentarias.
- Heulandita: Es otra zeolita muy común que se encuentra en depósitos sedimentarios y volcánicos. Tiene una estructura similar a la clinoptilolita y se utiliza en aplicaciones industriales y de intercambio iónico.

- Analcima: Esta zeolita se forma en cavidades de rocas volcánicas y sedimentarias y a menudo se presenta en forma de cristales cúbicos. Puede ser transparente o de color blanco.
- Stilbita: Es conocida por sus cristales en forma de agujas y su estructura cristalina única. Se encuentra en cavidades de rocas ígneas y metamórficas y es apreciada por su belleza.
- Laumontita: Esta zeolita se forma en rocas volcánicas y se caracteriza por su color blanco y su estructura cristalina distintiva.
- Mordenita: Se encuentra en cavidades de rocas volcánicas. Tiene una estructura cristalina única y se utiliza en aplicaciones de intercambio iónico y catálisis.
- Chabazita: Es una zeolita que a menudo se encuentra en depósitos sedimentarios y volcánicos. Tiene una estructura cristalina única y se utiliza en aplicaciones industriales y de purificación de agua.
- Phillipsita: Se encuentra en rocas volcánicas y se caracteriza por su estructura cristalina y su capacidad para deshidratarse y rehidratarse.

### ***1.6.2. Zeolita Clinoptilolita***

La Clinoptilolita es un tipo de Zeolita que se encuentra en áreas volcánicas de México, es un mineral aluminosilicato con una estructura monoclinica, está compuesta principalmente de silicio y aluminio, como se ve en la Figura 12, lo que le da rigidez. Esta estructura tiene canales y cavidades que facilitan la retención de iones, moléculas y metales, así como procesos de intercambio iónico y deshidratación reversible [29, 40].



*Fig. 12. Zeolita tipo Clinoptilolita. Fuente: RUFF [41].*

La Zeolita Clinoptilolita generalmente presentan una relación molar  $\text{Si}/\text{Al} = 1$ , pero algunas muestran relaciones diferentes, siendo menor la cantidad de cationes intercambiables a medida que disminuye el número de átomos de aluminio, las que son altamente síliceas exhiben una naturaleza intrínsecamente hidrofóbica y presentan afinidad hacia los hidrocarburos. Los cationes, conocidos como cationes intercambiables, pueden moverse y ser reemplazados, esta capacidad es de gran relevancia debido a su influencia en la capacidad de adsorción de moléculas y en la actividad catalítica de las zeolitas. La matriz aluminosilicato de la Zeolita Clinoptilolita se caracteriza por una organización regular de átomos de silicio y aluminio, lo que da lugar a una intrincada red tridimensional de canales y cavidades. Estos canales funcionan como pequeñas trampas capaces de albergar iones y moléculas de agua, lo que permite el intercambio iónico y la deshidratación reversible [27, 28, 39].

Estas propiedades hacen destacar a la Zeolita Clinoptilolita en aplicaciones industriales y ambientales. Su capacidad para realizar intercambio iónico es notoria, ya que su estructura microporosa le permite atrapar selectivamente iones cargados en sus canales, siendo eficaz en la purificación de agua y tratamiento de efluentes industriales. Es especialmente eficiente

en la eliminación de contaminantes como metales pesados y amonio, contribuyendo a mejorar la calidad del agua globalmente [28, 29, 39].

Su estructura porosa y cavidades internas permiten la adsorción de gases contaminantes, contribuyendo a la reducción de la contaminación ambiental. Finalmente, las zeolitas, en especial la Zeolita Clinoptilolita, son útiles catalizadores debido a su estructura cristalina y gran área superficial interna, que favorecen la albergación de moléculas y promueven reacciones químicas [28, 29, 39].

## **1.7. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN**

### ***1.7.1. Petrografía***

La Petrografía, un subcampo de la petrología, se enfoca en la descripción y clasificación de las rocas mediante la observación microscópica de la muestra a estudiar. Esto se realiza empleando un microscopio petrográfico para categorizar las rocas según su textura y composición mineralógica. Este análisis permite determinar la composición de la roca, su naturaleza y origen. El estudio de estos minerales incluye la observación de sus propiedades ópticas cuando interactúan con la luz polarizada (Mineralogía Óptica), de los numerosos minerales presentes en la naturaleza, solo alrededor de cincuenta, conocidos como petrogénicos o petrográficos, desempeñan un papel esencial en la formación de las rocas. Los principales grupos de minerales incluyen silicatos, carbonatos, sulfatos, sulfuros, cloruros, fosfatos, óxidos e hidróxidos. Estos minerales se dividen en componentes primarios y secundarios en función de su importancia para la clasificación de la roca [37, 42].

Aunque la observación macroscópica de las rocas también proporciona información útil, los datos más precisos para el estudio petrográfico se obtienen mediante el uso del microscopio. El proceso de estudio petrográfico comienza con una inspección física de la roca, que incluye una descripción macroscópica para evaluar aspecto, textura, color, dureza, tamaño de grano y granularidad. Luego, se procede con la descripción microscópica, que implica determinar la composición mineralógica, rasgos texturales, forma y color de los cristales y la relación entre minerales (primarios o secundarios). Ambos análisis, macroscópico y microscópico, proporcionan los datos necesarios para describir y clasificar con precisión una roca [42].

El microscopio petrográfico es una herramienta esencial para el análisis y la identificación de minerales, además de permitir la interpretación detallada de la textura de las rocas. Los minerales opacos, como metales nativos, óxidos y sulfuros metálicos, junto con el grafito, se estudian mediante microscopios que utilizan luz reflejada. En el caso del microscopio polarizante, la luz atraviesa un nícol inferior o polarizador, lo que provoca su difracción y la emisión de un haz único de rayos vibrantes en un plano específico. Este haz polarizado pasa a través de la sección delgada de roca y se divide en dos conjuntos de rayos que vibran en planos perpendiculares entre sí: el rayo ordinario y el extraordinario, cada uno con velocidades diferentes, características de cada mineral. La observación de las rocas bajo estas condiciones, es decir, con nícoles paralelos (o luz plana, significa que solo se está utilizando el polarizador, por lo que la luz que llega a la muestra vibra en un solo plano) permite determinar algunas características de los minerales, como su color, pleocroísmo, la capacidad que tienen algunos minerales de absorber radiaciones luminosas), relieve, entre otros. Cuando se introduce el analizador, la observación se realiza bajo nícoles cruzados (se utilizan tanto el polarizador como el analizador, por lo que la luz tiene dos planos perpendiculares entre sí), y aunque ambos rayos que emergen de la sección delgada vuelven a vibrar en el mismo plano, conservan su diferencia de velocidad inicial, lo que resulta en propiedades adicionales, como los colores de interferencia, que son específicos de cada mineral. En cuanto a los minerales translúcidos o transparentes, se pueden dividir según sus propiedades ópticas en dos categorías: isótropos y anisótropos. Los minerales isótropos se identifican porque, bajo nícoles cruzados, se oscurecen por completo, como ocurre con los minerales cristalizados como granates y sales o sustancias no cristalinas como el vidrio volcánico u ópalo. Para estos minerales isótropos, solo es posible observar sus características en condiciones de nícoles paralelos, como su forma y color [42].

### ***1.7.2. Microscopía electrónica de barrido***

El microscopio electrónico de barrido (SEM) genera una microfotografía como resultado de las interacciones entre un haz de electrones y la muestra a estudiar, este haz de electrones se produce ya que el equipo cuenta con un filamento que ilumina la muestra. Diferentes detectores recopilan los electrones generados por la interacción con la superficie, creando así una imagen que refleja las características superficiales, proporcionando información sobre

los constituyentes de la muestra. Estas interacciones generan la liberación de electrones secundarios, electrones con baja energía, cuando un electrón del haz se acerca lo suficiente al núcleo de un átomo de la muestra. También se producen electrones retrodispersados cuando un electrón del haz colisiona con el núcleo de un átomo de la muestra, produciendo que este sea repelido en dirección opuesta fuera de la muestra. La intensidad de este efecto varía de manera proporcional al número atómico de la muestra. Además, se generan rayos X característicos de los elementos presentes en la muestra. Esta técnica permite generar una imagen que muestre características como composición química, textura, tamaño y morfología de una muestra [43-45].

### ***1.7.3. Fluorescencia de rayos X***

La técnica FRX es una herramienta científica comúnmente empleada en el monitoreo ambiental de partículas en el aire y la detección de contaminantes inorgánicos en suelos y sedimentos. La fluorescencia se refiere a la emisión de luz u otra forma de energía por parte de un materia, en el contexto de un instrumento FRX, se utilizan rayos X para "excitar" una muestra con el propósito de caracterizar su composición. Esto implica la identificación de los elementos presentes en la muestra mediante un análisis cualitativo o la medición de la cantidad de un elemento específico mediante un análisis cuantitativo. La mayoría de los elementos, especialmente los metales, tienden a unirse con el oxígeno y oxidarse. Los elementos pueden unirse entre sí o con átomos altamente reactivos como el flúor o el sodio, generando una variedad de compuestos. Mientras que los compuestos orgánicos se combinan con átomos de carbono, los compuestos inorgánicos generalmente no siguen esta tendencia. La clasificación de los elementos en la FRX se basa en las energías características de los rayos X que se generan durante el proceso de excitación. Cuando un electrón de una capa interna es excitado por una fuente de irradiación, se desplaza a una capa externa para restablecer su equilibrio, liberando energía en forma de rayos X en un punto específico del espectro de rayos X. La detección de estas energías de rayos X permite identificar los elementos presentes en la muestra. La FRX permite la caracterización y el análisis de materiales de manera rápida para garantizar que cumplan con las especificaciones químicas requeridas [46].

## CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DE ZEOLITA TIPO CLINOPTILOLITA

### 2.1. PETROGRAFÍA

El proceso abarca desde la selección de las muestras más representativas de la Zeolita Clinoptilolita hasta la observación microscópica, utilizando un microscopio petrográfico de la marca Zeiss (Fig. 13), explorando así la composición del mineral. A continuación se explica la metodología paso a paso:



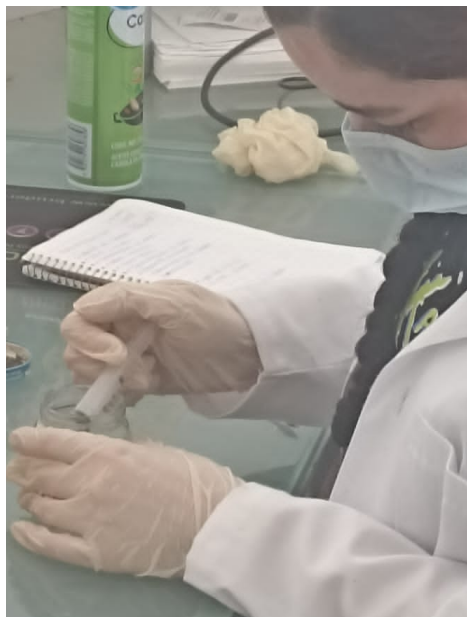
*Fig. 13. Microscopio Petrográfico Zeiss Axioscope 5. Fuente: Zeiss [47].*

1. Para comenzar se seleccionaron las muestras a analizar mediante petrografía: Dos muestras del mineral Zeolita Clinoptilolita, para las cuales se requiere picar y facetar con un martillo geológico para buscar dos rocas representativas (Fig. 14); y dos muestras del electrocatalizador compuesto por Zeolita Clinoptilolita, hidrogel y carbón lignítico.



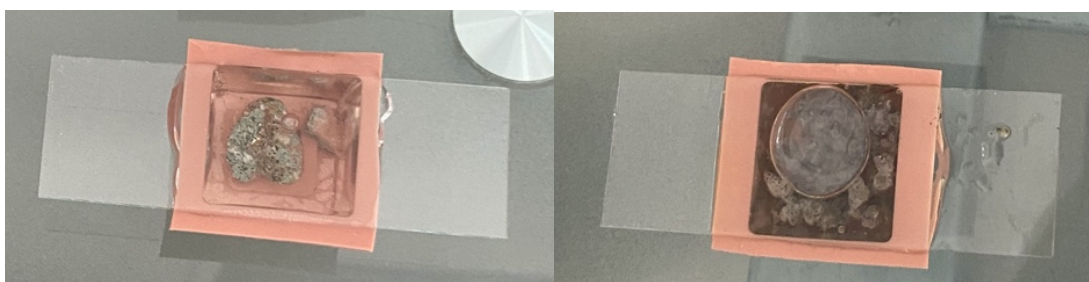
*Fig. 14. Selección de muestras a analizar: a) Preparación y facetado con martillo geológico b) Zeolita Clinoptilolita con cristales. Fuente: Elaboración propia.*

2. Se elabora la resina mezclando resina cristal y catalizador, en una proporción mínima de 1 gota de catalizador por cada 2.5 ml de resina. Después de algunas pruebas, se determina que la mezcla precisa es de 40 ml de resina cristal con 10 gotas de catalizador para 4 muestras. Con una jeringa, se miden 40 ml y se vierten cuidadosamente en un recipiente de vidrio (Fig. 15), dejando que resbale por las paredes del recipiente para evitar la formación de burbujas. Luego, se añaden las gotas de catalizador y se revuelve suavemente imitando el movimiento de un pistón, al mismo tiempo se gira el recipiente cuidadosamente para integrar bien los componentes y lograr una mezcla uniforme sin burbujas.



*Fig. 15. Preparación de la resina. Fuente: Elaboración propia.*

3. Se permite reposar la mezcla durante 1 minuto y, posteriormente, se rellenan los moldes, antes aplicando aceite en spray para poder liberar las muestras de los moldes. Se coloca un portamuestras de vidrio encima, asegurándose de que haya suficiente resina para garantizar una unión firme entre la muestra y el portamuestras, como puede observarse en la Figura 16.



*Fig. 16. Encapsulado de muestras a) Zeolita Clinoptilolita b) electrocatalizador de Zeolita Clinoptilolita. Fuente: Elaboración propia.*

4. Se colocan las muestras encapsuladas en un entorno iluminado y seco para solidificarse gradualmente, donde se mantienen en observación durante un período

de 72 a 144 horas. En la Figura 17 pueden observarse las muestras completamente secas.



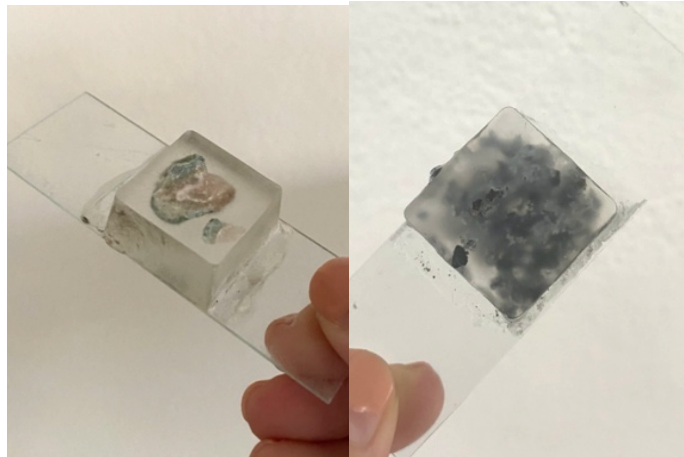
*Fig. 17. Muestras secas a) electrocatalizador de Zeolita Clinoptilolita b) Zeolita Clinoptilolita. Fuente: Elaboración propia.*

5. Una vez que las muestras estén secas, se procede con el proceso de desgaste y pulido. Este proceso se lleva a cabo utilizando lijas de diferentes granos, que incluyen: 60, 80, 120, 220, 400, 1000, 1200, 1500 y 2000 (Fig. 18), comenzando con las lijas de grano más grueso, las más adecuadas para desgastar la resina y las primeras capas de la roca, avanzando gradualmente hacia las más finas, de 1000, 1200, 1500 y 2000 con las cuales se logra una superficie suave y brillante, cumpliendo así con el objetivo de este paso.

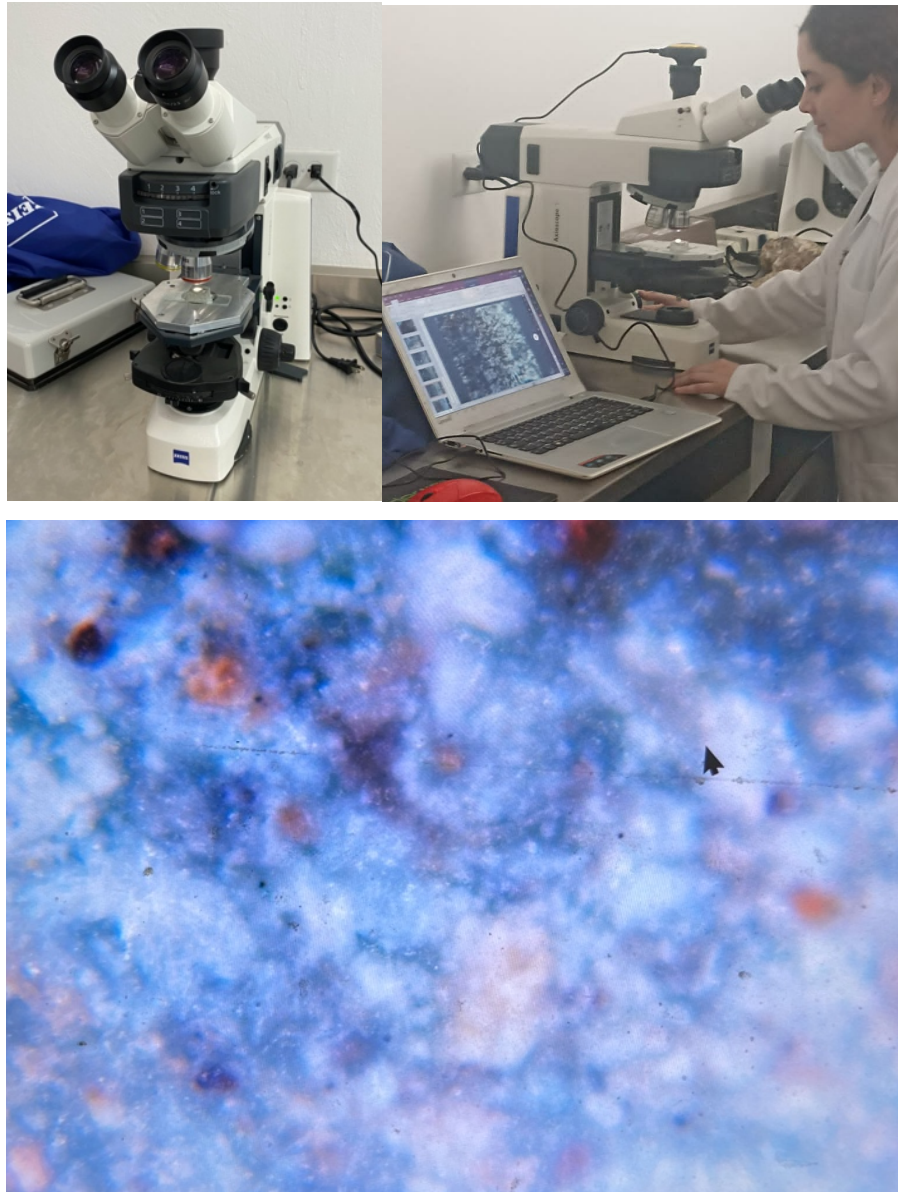


*Fig. 18. Proceso de desgaste y pulido. Fuente: Elaboración propia.*

6. Para finalizar la metodología se aplica una pasta para dejar un acabado brillante (Fig. 19), se enjuaga la muestra y se continua con la observación en láminas gruesas bajo el microscopio Petrográfico con una amplificación de 5x para analizar su mineralogía, textura y estructura (Fig. 20).



*Fig. 19. Muestras Pulidas a) Zeolita Clinoptilolita b) electrocatalizador de Zeolita Clinoptilolita. Fuente: Elaboración propia.*



*Fig. 20. Observación en microscopio con lente x5. Fuente: Elaboración propia.*

## **2.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO**

La técnica de Microscopía Electrónica de Barrido se llevó a cabo en un microscopio de electrones JEOL JSM-6610LV, presentado en la Figura 21, siguiendo la metodología mencionada posteriormente:

1. Para comenzar se selecciona una muestra a analizar, la cual no necesita preparación previa. Se monta la muestra para su observación en el microscopio electrónico de barrido.
2. Se verifica que el microscopio se encuentre calibrado y en condiciones óptimas de funcionamiento antes de comenzar el análisis. Esto incluye verificar y ajustar la resolución, el enfoque y la alineación del haz de electrones.
3. Se visualizan las imágenes de la muestra de Zeolita Clinoptilolita, mediante el barrido del haz de electrones sobre la superficie de la muestra y la detección de los electrones secundarios emitidos.
4. Finalmente, se analizan las imágenes obtenidas para obtener información sobre la morfología, composición y estructura de la Zeolita Clinoptilolita. Esto implica identificar y medir características como el tamaño, la forma de los cristales, la presencia de defectos o inclusiones y cualquier otro detalle relevante.

El uso del microscopio electrónico JEOL JSM-6610LV brinda la ventaja de obtener imágenes de alta resolución, lo que permite un análisis detallado de la superficie y la estructura de la zeolita.



*Fig. 21. JEOL JSM-6610LV. Fuente: JEOL Ltd [48].*

### 2.3. FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Para esta técnica, se utiliza el analizador XRF portátil Thermo Scientific™ Niton™ XL2 Plus (Fig. 22-23):

1. Para comenzar a utilizar el equipo simplemente se presiona el botón de encendido.
2. Es necesario realizar una calibración, para esto se coloca en posición horizontal, lo que permite eliminar cualquier dato y partículas residuales de pruebas anteriores, garantizando así mediciones precisas.
3. Una vez completada la calibración, el siguiente paso es seleccionar el modo de análisis y especificar el tipo de muestra que se va a evaluar.
4. Luego, se configura el equipo para realizar el análisis promediando los resultados de tres pruebas consecutivas.
5. Es importante asignar una etiqueta a la prueba y registrar el nombre del operador encargado de realizar las pruebas
6. A continuación se coloca una porción de la muestra sin necesidad de preparación previa en una superficie blanca (Fig. 19). Se inicia el análisis colocando con cuidado el lente de la pistola sobre la muestra y presionando el botón inferior de la pistola, mismo que se deberá mantener presionado durante el tiempo de análisis. A partir de ese momento, la pistola comienza a emitir rayos X y a recopilar datos sobre la composición de la muestra.
7. Cada análisis tiene una duración aproximada de 30 segundos. Durante este tiempo, la pistola no debe levantarse. Al finalizar la prueba, se presiona nuevamente el botón para el siguiente análisis (Fig. 20).
8. Una vez que se han completado todas las pruebas, los datos obtenidos pueden ser exportados fácilmente a una hoja de cálculo en Excel, lo que simplifica el proceso de análisis y almacenamiento de resultados para su posterior revisión.



Fig. 22. Fluorescencia de rayos X. Fuente: Elaboración propia.

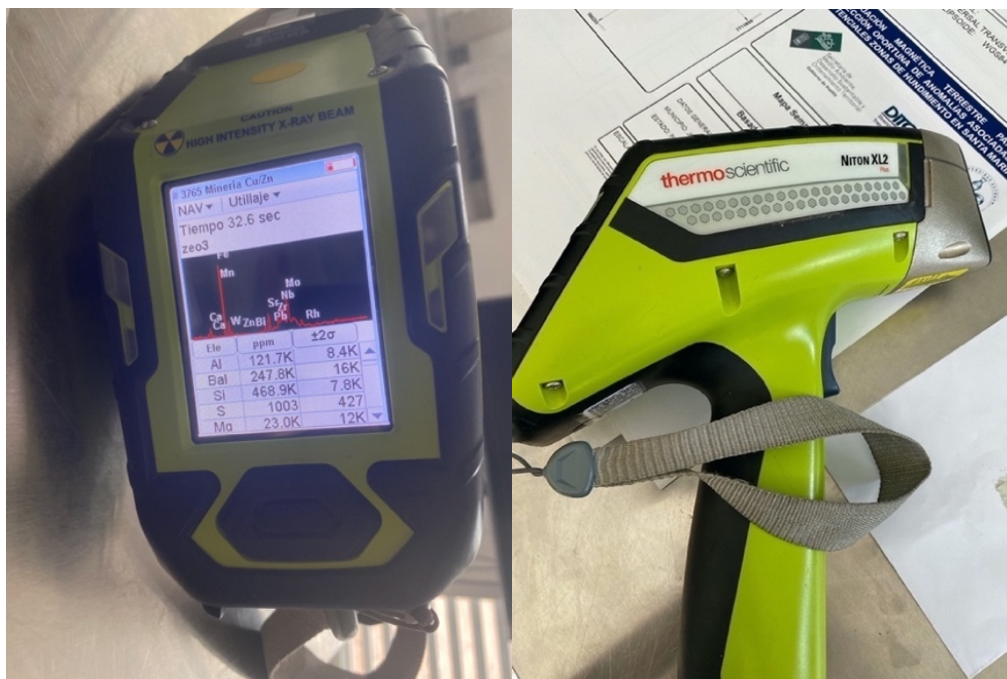


Fig. 23. Pistola Thermo Fisher. Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO 3: ELABORACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

### 3.1. DISEÑO

El proceso de elaboración de la Celda de Combustible comienza con el análisis de las placas contenedoras, para facilitar la elaboración y reducir los costos de la MEA se utilizan el electrocatalizador, difusor y membrana electrolítica, los cuales se encuentran mezclados en este prototipo de celda. Una vez determinadas las piezas a emplear se continúa con el diseño en SolidWorks [49].

El tamaño es el primer aspecto que se evalúa cuidadosamente, es crucial que la Celda de Combustible sea compacta para su utilización en aplicaciones móviles. Se toma como punto de referencia una Celda de Combustible previamente empleada en el Laboratorio de Biología y Biocombustibles (Fig. 24):

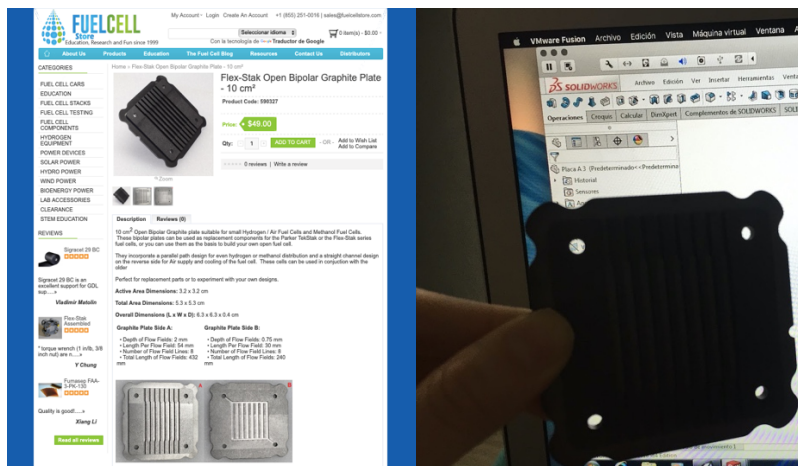


Fig. 24. Placa bipolar de grafito. Fuente: Fuel Cell Store [50].

Se opta por emplear esquinas cuadradas en lugar de redondeadas, ya que facilitaba el proceso de corte por lo consiguiente representaba costos menores. Por las mismas razones se decide simplificar el diseño y que tuviera un solo grosor. Se respetan las dimensiones generales de  $6.3 \text{ cm}^2$ , con un grosor de  $0.4 \text{ cm}$  y un área activa de:  $3.2 \text{ cm}^2$ . Dando como resultado el diseño definitivo de las piezas de la Celda de Combustible, las cuales se presentan detalladamente en los planos a continuación. Es importante destacar que la placa

anódica se caracteriza por no tener ningún orificio, ya que el combustible se suministra junto con el electrocatalizador; en cambio la placa catódica se diseña con 6 orificios centrales de 4 mm de diámetro, que se alinean con el electrodo catódico para facilitar el paso del oxidante, es decir, el oxígeno. Además, ambas placas están equipadas con 4 orificios de 4 mm cada uno, destinados para sellar la Celda de Combustible mediante tornillos, tuercas y arandelas para proteger las placas de acrílico (Fig. 25).

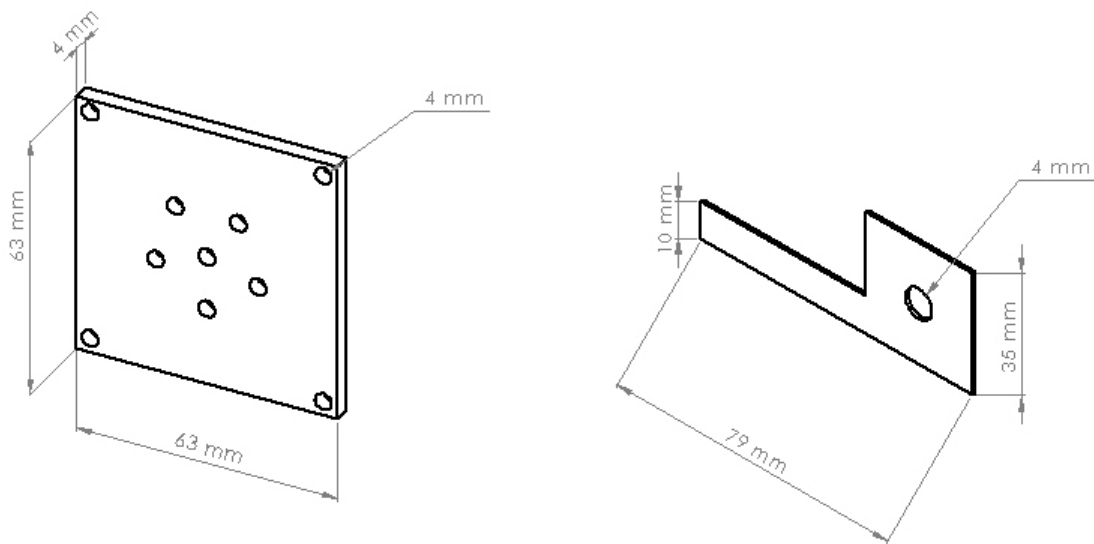


Fig. 25. Planos a) placa catódica b) electrodo catódico. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. MATERIALES

Una vez que se completa el diseño, se procede a seleccionar los materiales para cada componente (Fig. 26), se establece como requisito fundamental que los materiales sean fácilmente accesibles, tanto en términos de disponibilidad como de costo, esto asegura que el proceso de fabricación sea viable y económico.

- *Placas bipolares de acrílico*
- *Electrodos de acero galvanizado*
- *Estructura contenedora de CAB*
- *Electrocatalizador de Zeolita tipo Clinoptilolita*
- *Membrana poliacrilato de sodio*
- *Difusor de carbón lignítico*

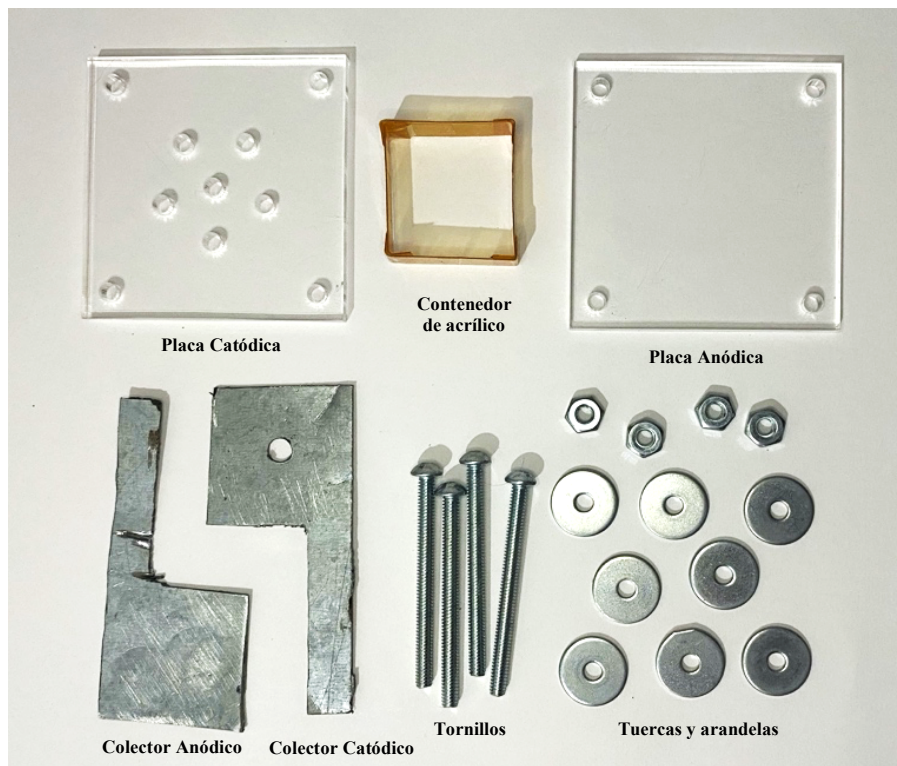


Fig. 26. Piezas de la Celda de Combustible. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4. COSTOS

Los costos se describen en la Tabla 3, cabe destacar que, en el caso de la Zeolita tipo Clinoptilolita y el carbón lignítico, fueron suministrados por la universidad, por lo que fue necesario buscar precios equivalentes en fuentes disponibles en línea para tener una referencia realista de sus valores. Esta evaluación de los costos permite obtener un panorama completo de la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto, asegurando que los recursos se asignaran eficientemente y se mantuviera un control adecuado sobre el presupuesto. La

Tabla proporciona un resumen de los materiales utilizados en el proyecto, junto con sus costos asociados, dando un total de \$143 pesos mexicanos. A continuación se presenta un desglose de los costos de los materiales:

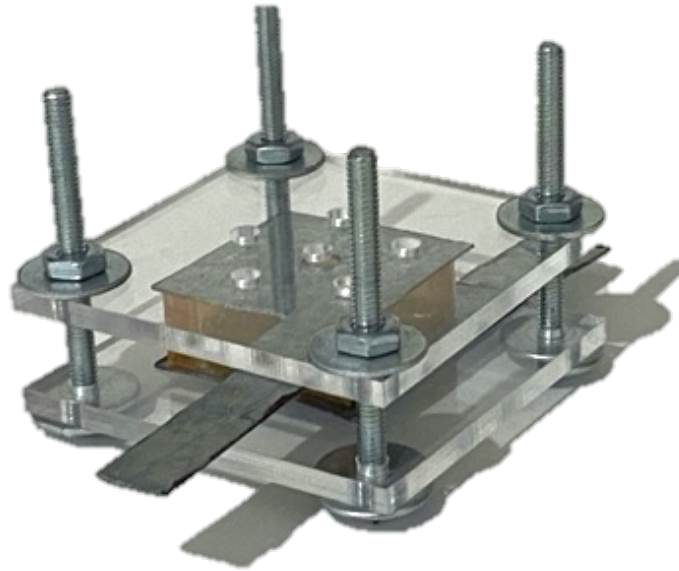
*Tabla 3. Costos. Fuente: Elaboración propia.*

<b>Material</b>	<b>Total</b>
2 Placas de Acrílico	\$70
2 Placas Metálicas	\$10
Estructura Acetato	\$5
4 Tornillos, 4 Tuercas, 8 Arandelas	\$18
10 g Zeolita Clinoptilolita	\$10
10 g Carbón Lignítico	\$20
20 g Perlas de Hidrogel	\$10
<b>Total:</b>	<b>\$143</b>

### 3.5. ENSAMBLE

Para llevar a cabo el montaje de la Celda de Combustible, se emplean dos placas de acrílico, diseñadas para proporcionar una estructura sólida y resistente; de igual manera, de una estructura de acetato con dimensiones de  $3.2 * 3.2 * 1 \text{ cm}$  para asegurar la contención adecuada y evitar fugas de los elementos internos: el electrocatalizador, la membrana electrolítica, el elemento difusor y el biocombustible. Además, dos electrodos metálicos, separados por el contenedor de acetato, que cumplen con un papel fundamental en la generación y recolección de la energía transformada dentro de la celda. Para asegurar la integridad y estabilidad del ensamble, se emplearon cuatro tornillos, ocho arandelas para proteger cada placa acrílica y cuatro tuercas, garantizando así que todo se mantenga en su lugar.

El producto final de este ensamblaje (Fig. 27) se traduce en una Celda de Combustible capaz de llevar a cabo la conversión de energía química en energía eléctrica. En esta configuración, precisa y funcional, cada elemento se ha incorporado con el propósito de lograr un dispositivo eficiente, capaz de cumplir con su objetivo de generar energía de manera sostenible y asequible.



*Fig. 27. Ensamble de la Celda de Combustible. Fuente: Elaboración propia.*

## CAPÍTULO 4: ELABORACIÓN DEL ELECTROCATALIZADOR

Para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación, se aborda el desafío de desarrollar un electrocatalizador alternativo mediante la combinación de materiales clave: la Zeolita tipo Clinoptilolita (Fig. 28), el hidrogel y el carbón lignítico. Con base en los resultados de la caracterización utilizando las técnicas de Petrografía, Microscopía Electrónica de Barrido y Fluorescencia de Rayos X previamente realizadas para explorar las propiedades de la Zeolita tipo Clinoptilolita, se descubre su riqueza en minerales, eficiencia química, capacidad de absorción y control de humedad, lo que respalda aún más su potencial para su aplicación en Celdas de Combustible. A lo largo de este capítulo, se detallarán cada uno de los pasos de la elaboración del electrocatalizador, desde la preparación de la Zeolita Clinoptilolita, la hidratación del hidrogel, la elaboración de la mezcla en una proporción de 1:1:3, hasta la implementación en la Celda de Combustible para evaluar su voltaje y corriente utilizando un multímetro y un circuito simple, finalizando con la caracterización de la celda a través de la obtención de su Curva I-V con un trazador de curvas.



*Fig. 28: Zeolitas naturales. Fuente: Elaboración propia.*

Pasos:

1. El primer paso es moler la Zeolita tipo Clinoptilolita hasta obtener un polvo fino utilizando un mortero de ágata. El objetivo de esta etapa es garantizar que la Zeolita Clinoptilolita adquiriera una textura uniforme y consistente, transformándose en pequeñas partículas que se adecuaran perfectamente a la Celda de Combustible. Este proceso fue esencial para lograr una mezcla homogénea con los demás componentes

y para que el electrocatalizador funcionara adecuadamente en la celda de combustible.

2. A continuación, se procede a la preparación del hidrogel. En un primer intento, se intenta fragmentar el hidrogel en su estado seco, sin embargo, no se logra el resultado deseado debido a que las perlas son muy pequeñas y resistentes. En consecuencia, se opta por iniciar con la hidratación y luego a la trituración del hidrogel; se coloca en un recipiente con tapa y se agregaron aproximadamente 100 ml de agua, después de un par de horas se tritura para obtener trozos pequeños, más manejables y se forma una pasta que podrá ser fácilmente combinado con los demás componentes, manteniéndose uniforme en la celda de combustible.
3. El resultado de la trituración del hidrogel se transfiere a otro frasco en el cual se añade una cantidad tres veces mayor de bioetanol para mantener la hidratación y para incorporar el combustible a la mezcla. De esta manera, el hidrogel, actúa como una esponja que retiene líquidos.
4. Para la siguiente etapa se decide utilizar una proporción 1:1:3, es decir, por cada gramo de Zeolita, se agrega un gramo de carbón activado y tres gramos de hidrogel. Esto implica pesar 1 gramo de Zeolita Clinoptilolita, 1 gramo de carbón activado y 3 gramos de hidrogel previamente tratado (Fig. 29).



Fig. 29. Componentes: a) Zeolita Clinoptilolita b) carbón lignítico. Fuente: Elaboración propia.

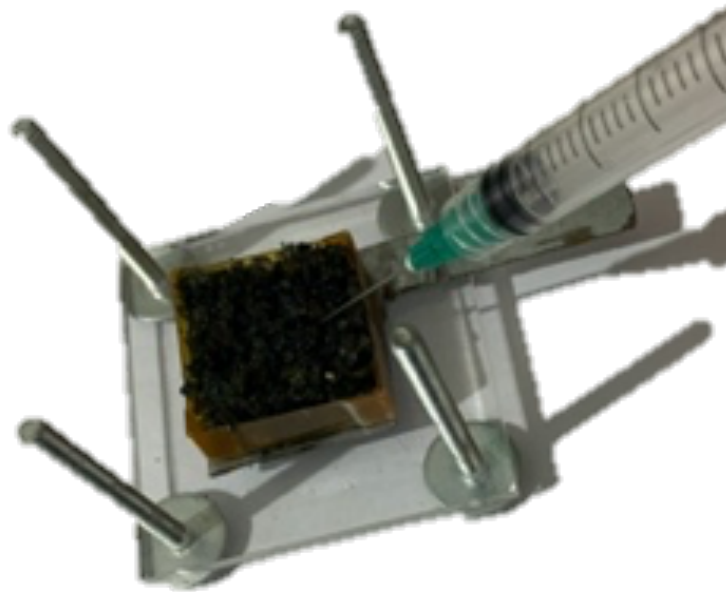
- Después de la preparación de 5 gramos de electrocatalizador se toma la decisión de aumentar la cantidad, ya que resulta insuficiente para asegurar el contacto adecuado con ambos electrodos y cerrar el circuito interno de la Celda de Combustible. A continuación, se pesan 2 gramos de Zeolita Clinoptilolita, 2 gramos de carbón lignítico y 6 gramos de hidrogel (Fig. 30). Una vez que se obtiene la cantidad deseada para cubrir todo el área activa de la celda, se procede a triturar utilizando el mortero de ágata para integrar bien todos los compuestos y fragmentar aún más el hidrogel. Durante esta fase, se debe prestar atención para asegurarse de que todos los componentes se distribuyan de manera uniforme en la mezcla, se agregaron 0.5 g de Zeolita Clinoptilolita y 0.5 g carbón lignítico extras para que la mezcla no se disperse o derrame. Luego se transfiere de nuevo la mezcla para pesarse, registrando 8.4 g en total, considerando que se pierde parte del electrocatalizador en el proceso de integración.



*Fig. 30. Pesado de Componentes: a) hidrogel, b) carbón lignítico. Fuente: Elaboración propia.*

- Luego, se disponen cuidadosamente los 8 g de electrocatalizador en el contenedor de acetato de la Celda de Combustible, se deben evitar fugas o el movimiento de la mezcla, para este paso es importante considerar que la mezcla no debe quedar compacta para permitir el flujo de oxígeno, al mismo tiempo no debe quedar suelta para asegurar un buen contacto con los electrodos.

7. Finalmente, se inyectan 0.5 ml de bioetanol en la mezcla (Fig. 31), se coloca el cátodo y se sella la celda con la placa catódica y los tornillos. A continuación, se lleva a cabo una evaluación del voltaje en la Celda de Combustible, esta prueba es esencial para confirmar que el electrocatalizador funciona de manera adecuada y pueda generar energía sostenible.



*Fig. 31. Inyección de bioetanol. Fuente: Elaboración propia.*

## CAPÍTULO 5: PRUEBA EN CELDA CON ZEOLITA CLINOPTILOLITA

Las pruebas a realizar son: la medición voltaje con un multímetro, midiéndose en paralelo con la Celda de Combustible, seguido de mediciones de voltaje y corriente (Fig. 32 y 33), variando entre 4 resistencias de 11, 218, 1K, 90K $\Omega$  en una protoboard. Cabe mencionar que se inyectan 0.5 ml de bioetanol antes de realizar la prueba, para energizar la Celda de Combustible.

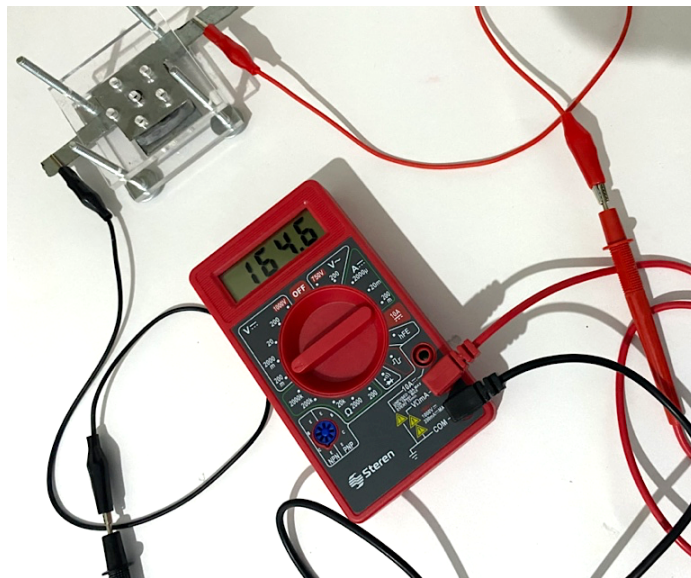


Fig. 32. Medición de voltaje. Fuente: Elaboración propia.

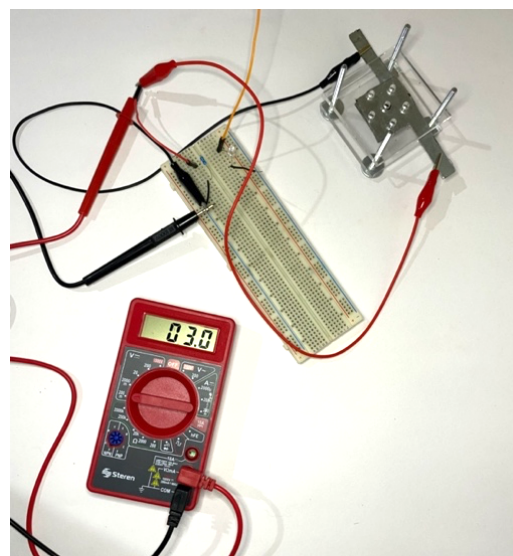


Fig. 33. Medición de corriente. Fuente: Elaboración propia.

Las mediciones se ejecutan a lo largo de 2 horas para poder determinar la duración en minutos de la inyección de 0.5 ml de bioetanol, durante este paso el voltaje oscilaba entre 20 – 60 mV sin bajar de este primer valor. Se registran voltajes máximos de hasta 170 mV, mientras que el promedio se mantuvo en torno a los 60 mV.

### 5.1. PRUEBAS ALTERNATIVAS DEL ELECTROCATALIZADOR

Para verificar que el funcionamiento del electrocatalizador se atribuye a los componentes seleccionados: Zeolita Clinoptilolita, carbón lignítico y el hidrogel, se llevan a cabo dos pruebas alternativas (Fig. 34): en la primera se emplea un electrocatalizador compuesto por carbón e hidrogel, en una proporción de 1:3, mientras que en la segunda prueba se utiliza una mezcla de Zeolita Clinoptilolita e hidrogel, manteniendo la misma proporción. Además, se realizan las mediciones de voltaje para comparar el rendimiento eléctrico de ambas configuraciones con el del electrocatalizador compuesto por Zeolita Clinoptilolita, hidrogel y carbón.



*Fig. 34. Pruebas alternativas de electrocatalizador a) hidrogel y carbón lignítico b) hidrogel y Zeolita Clinoptilolita. Fuente: Elaboración propia.*

## 5.2. VARIACIÓN DE TEMPERATURA

Debido a que las reacciones electroquímicas, la oxidación del combustible en el ánodo y la reducción del oxígeno en el cátodo, se ven favorecidas por el incremento de temperatura, se llevó a cabo un análisis para investigar cómo este aumento afecta la velocidad de transferencia de carga generada por las reacciones catalíticas [51]. Con el propósito de comparar los resultados obtenidos a temperatura ambiente, se realizaron dos pruebas a diferentes temperaturas, se decide hacer la primera prueba a 45 °C y la segunda a 65 °C. Utilizando una parrilla, un matraz y un termómetro, se calienta el bioetanol y monitorea su temperatura, evitando pasar de su punto de ebullición (Fig. 35). Este estudio permite examinar cómo las variaciones térmicas influyen en la generación de energía. Como referencia se mide la temperatura del electrocatalizador, registrando un valor de 20 °C.



*Fig. 35. Calentamiento del Bioetanol. Fuente: Elaboración propia.*

## 5.3. INCREMENTO DEL FLUJO DE AIRE

Durante las pruebas de medición de voltaje en la Celda de Combustible, se nota una restricción significativa en el flujo de oxígeno, atribuida a la limitada cantidad y tamaño de los orificios en la placa contenedora, sumado a eso, la placa colectora solo posee un orificio, lo que limita aún más el paso del oxidante, afectando así, el voltaje medido. Como una respuesta creativa para abordar este inconveniente y comprobar esta teoría, se busca aumentar

el caudal de aire, y realizar mediciones adicionales de voltaje, utilizando un ventilador de mano con las siguientes especificaciones:

Potencia = 1.5 – 2.5 W

Voltaje = 3.7 V

La elección de utilizar un ventilador de mano surge de la necesidad de proporcionar una fuente de aire adicional de manera controlada. Se selecciona un ventilador portátil de diseño ergonómico y ajustable que permite una dirección óptima del flujo de aire hacia la Celda de Combustible (Fig. 36). El objetivo es evaluar cómo el incremento en el flujo modifica el rendimiento de la celda.



Fig. 36. Ventilador de mano. Fuente: Elaboración propia.

Se monta la Celda de Combustible siguiendo el mismo procedimiento, incorporando el electrocatalizador a base de Zeolita tipo Clinoptilolita y administrando una inyección de 0.5 ml de bioetanol. Luego, se posiciona el ventilador en proximidad al orificio de la placa catódica para intensificar el flujo de oxígeno. Después de llevar a cabo algunas pruebas iniciales y evaluar los resultados, se retira la placa contenedora para permitir un flujo de aire aún más abundante; para explorar aún más la optimización de la Celda de Combustible, se decide mover ligeramente la placa colectora, para corroborar si esta acción puede

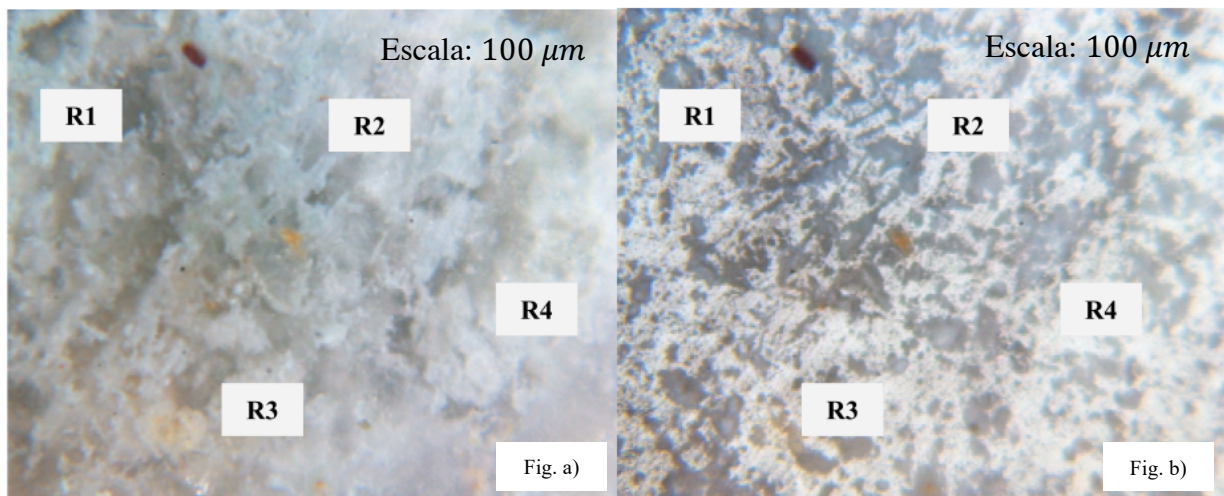
proporcionar una mejora adicional en el voltaje generado. Estos ajustes generan un notable aumento en la generación de voltaje.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. PETROGRAFÍA

#### 6.1.1. Petrografía de Zeolita Clinoptilolita

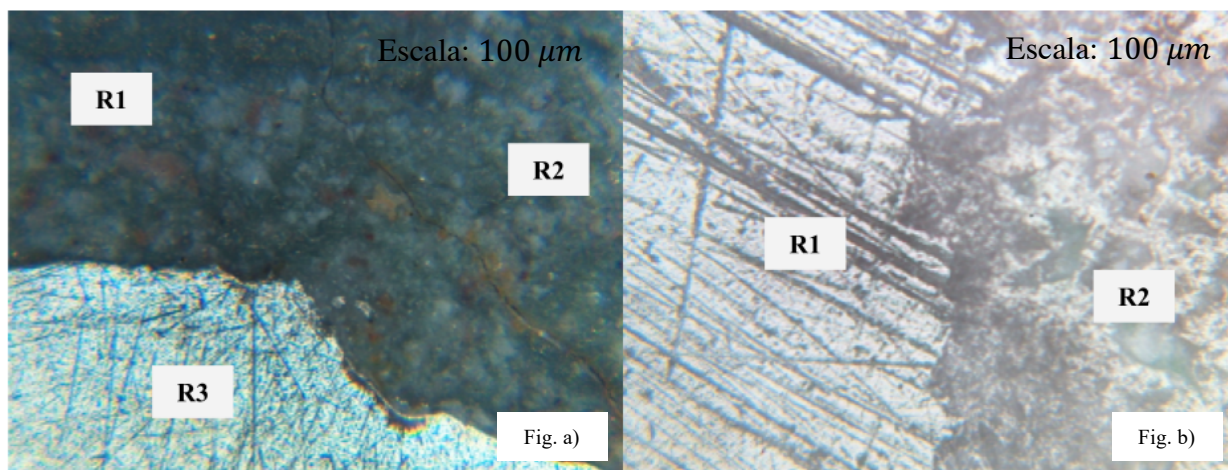
Los resultados de la petrografía de las muestras de Zeolita Clinoptilolita se presentan en las siguientes Figuras en una escala de  $100\ \mu\text{m}$ .



*Fig. 37. Petrografía de Zeolita Clinoptilolita a) luz reflejada b) luz transmitida. Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura anterior (Fig. 37) se pueden apreciar fácilmente 4 regiones (R1, R2, R3 y R4), determinadas por los bordes cristalinos de la muestra sólida de Zeolita Clinoptilolita. Es importante notar que se realizaron observaciones tanto con luz transmitida como con luz reflejada; la microfotografía de la derecha fue mediante luz transmitida, en cambio la microfotografía de la izquierda fue por luz reflejada. La observación con luz reflejada permite una mejor visualización de las burbujas presentes en la resina. En ambas podemos observar minerales accesorios, por lo menos 10 de color amarillo y 1 de color rojo. Los minerales accesorios son componentes minerales presentes en una roca que aunque no son los

componentes dominantes, están presentes en cantidades detectables y proporcionan información valiosa para la identificación y clasificación de la roca.



*Fig. 38. Microfotografías de Zeolita Clinoptilolita a) luz reflejada b) luz transmitida.*

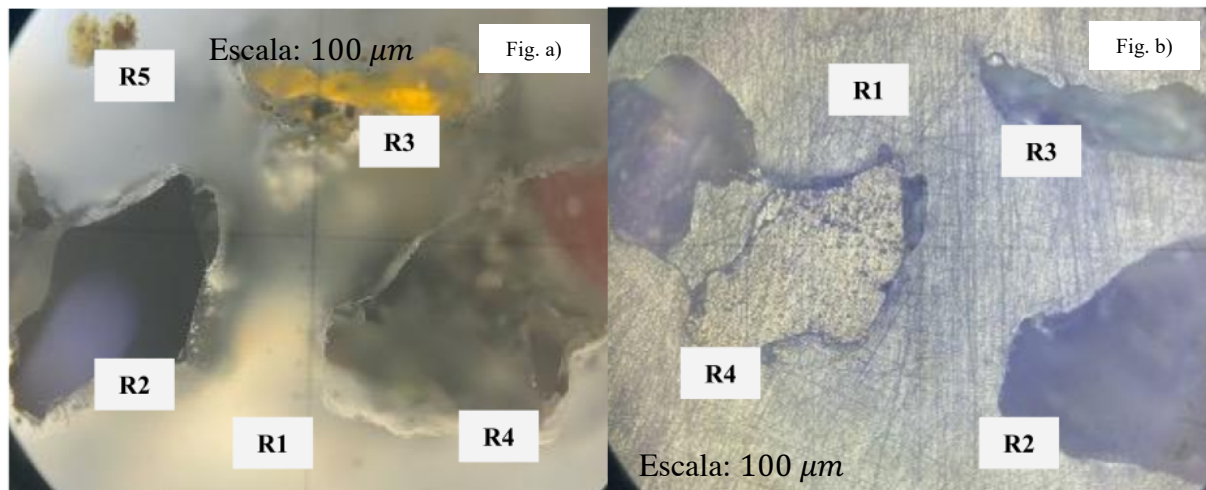
*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura anterior (Fig. 38) se pueden apreciar fácilmente la diferencia entre la roca de Zeolita Clinoptilolita y la resina, las líneas que se pueden apreciar en la Región 3 (R3) de la Figura a) y en la Región 1 en la Figura b) son el resultado del proceso de pulido con lijas. De nuevo, la microfotografía de la derecha fue observada mediante luz transmitida, en cambio la microfotografía de la izquierda por luz reflejada.

Los resultados de la petrografía proporcionan una visión detallada de la Zeolita Clinoptilolita, destacando las características estructurales y la presencia de minerales accesorios. La correlación con los resultados de la fluorescencia de rayos X fortalece la validez de las observaciones.

### ***6.1.2. Petrografía del electrocatalizador de Zeolita Clinoptilolita***

Los resultados de la petrografía del electrocatalizador de Zeolita Clinoptilolita se muestran en la siguiente Figura (Fig. 39):



*Fig. 39. Microfotografías del electrocatalizador a) luz reflejada b) luz transmitida. Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura anterior destaca la presencia del hidrogel de colores, en las regiones R2, R3, R4 y R5, se puede comprobar que los componentes del electrocatalizador: Zeolita Clinoptilolita, carbón lignítico y el bioetanol, fueron absorbidos por las perlas de hidrogel, por lo que es lo único que se puede observar. La región R1 comprende la resina, que puede ser identificada más fácilmente en la Figura b), que fue identificada mediante luz transmitida, en cambio la Figura de la izquierda fue capturada bajo luz reflejada.

## **6.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO**

La microscopía electrónica de barrido (MEB) es una herramienta fundamental para la caracterización, análisis de la estructura y composición de la Zeolita Clinoptilolita. Con la utilización del Microscopio JEOL se pudo observar la Zeolita Clinoptilolita y obtener la Tabla 4 con su composición mineralógica, de acuerdo con los porcentajes en peso, los componentes más prominentes son el dióxido de silicio ( $SiO_2$ ), con 63.7% y la alúmina ( $Al_2O_3$ ), que representa el 18.2% de la composición total. Además, se identifican otros componentes en menor proporción, como el óxido de magnesio ( $MgO$ ) y el óxido de potasio ( $K_2O$ ).

Tabla 4. Composición Mineralógica de la Zeolita Clinoptilolita. Fuente: [16].

Compuesto	Óxido de Magnesio $MgO$	Alúmina $Al_2O_3$	Dióxido de Silicio $SiO_2$	Óxido de Potasio $K_2O$	Óxido de Calcio $CaO$	Óxido de Hierro $Fe_2O_3$
Porcentaje en peso	4.41%	18.2%	63.7%	5.83%	2.24%	2.71%

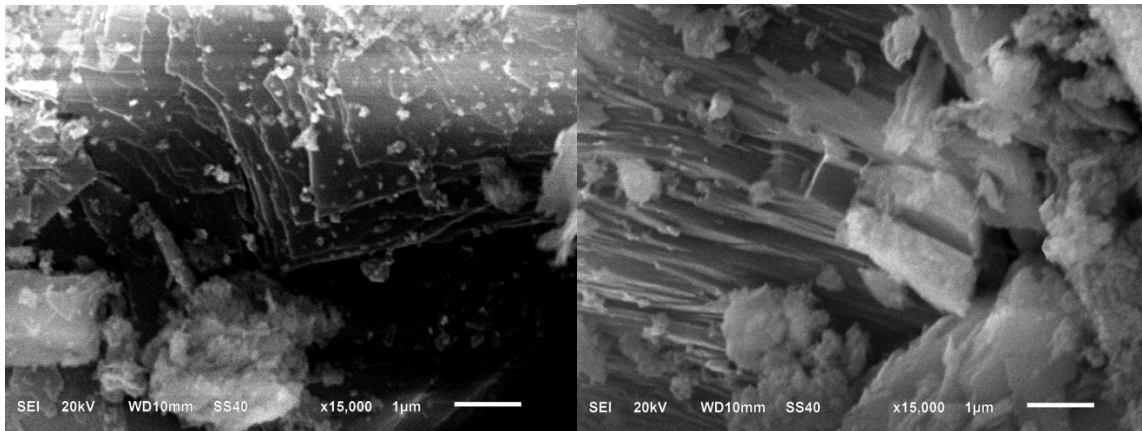


Fig. 40. Microscopía x15,000. Fuente: [16].

Las microfotografías (Fig. 40) fueron obtenidas a partir de la muestra de Zeolita tipo Clinoptilolita con el objetivo de observar la morfología de este mineral; en la ampliificación anterior se puede apreciar filamentos y conglomerados de minerales, también se puede comprobar la microporosidad característica de la Zeolita Clinoptilolita, una propiedad clave que que permite atrapar iones metálicos, moléculas de agua y desempeñar funciones tales como intercambio iónico y deshidratación reversible.

### 6.3. FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Los resultados se muestra en la siguiente Tabla (Tabla 5), se presentan los niveles de elementos en unidades de partes por millón (ppm) para dos pruebas distintas. Al comparar detenidamente estas pruebas realizadas en distintas muestras de Zeolita Clinoptilolita, se pueden apreciar diferencias significativas en las concentraciones de varios elementos químicos, sin embargo coincide con los resultados de la composición mineralógica de

Microscopía Electrónica de Barrido. En ambos estudios el elemento con mayor concentración es el Silicio, con un promedio de 476,504.84 ppm entre las dos pruebas, seguido del Aluminio con un promedio de 126,772.92 ppm. Otros elementos relevantes en la composición de la Zeolita Clinoptilolita son el Calcio, Potasio, Hierro y el Magnesio. Por otro lado, elementos como Zinc, Cobre y Plomo tienen niveles menores de ppm en ambas pruebas. Es importante señalar que algunos elementos tienen niveles por debajo del límite de detección (LOD), lo que significa que sus concentraciones son muy bajas y no se detectaron en estas pruebas específicas.

*Tabla 5. Fluorescencia de Zeolita Clinoptilolita. Fuente: Elaboración propia.*

Elementos (ppm)	Aluminio (Al)	Arsénico (As)	Bario (Ba)	Bal
Prueba 1:	131852.86	<LOD	<LOD	254838.22
Prueba 2:	121692.98	<LOD	<LOD	247763.17
<b>Bismuto (Bi)</b>	<b>Calcio (Ca)</b>	<b>Cloro (Cl)</b>	<b>Cobalto (Co)</b>	<b>Cromo (Cr)</b>
117.37	47169.52	<LOD	1085.31	1865.13
106.98	49326.8	<LOD	877.79	1826.57
<b>Cobre (Cu)</b>	<b>Hierro (Fe)</b>	<b>Potasio (K)</b>	<b>Magnesio (Mg)</b>	<b>Manganeso (Mn)</b>
281	38783.62	27863.54	<LOD	524.25
172.97	43596.82	29177.56	23029.88	799.59
<b>Molibdénio (Mo)</b>	<b>Niobio (Nb)</b>	<b>Níquel (Ni)</b>	<b>Fósforo (P)</b>	<b>Plomo (Pb)</b>
1651.7	1246.78	861.8	<LOD	76.75
1519.47	1247.6	982.41	<LOD	89.94
<b>Rubidio (Rb)</b>	<b>Azufre (S)</b>	<b>Silicio (Si)</b>	<b>Estaño (Sn)</b>	<b>Estroncio (Sr)</b>
136.75	938.49	484067.03	231.9	452.29
164.1	1003.25	468942.66	217.75	525
<b>Titanio (Ti)</b>	<b>Varadio (V)</b>	<b>Tungsteno (W)</b>	<b>Zinc (Zn)</b>	<b>Zirconio (Zr)</b>
3407.39	1403.67	267.46	116.79	432.38
3980.79	1719.73	<LOD	139.46	539.6

## 6.4. CARACTERIZACIÓN DE CELDA DE COMBUSTIBLE

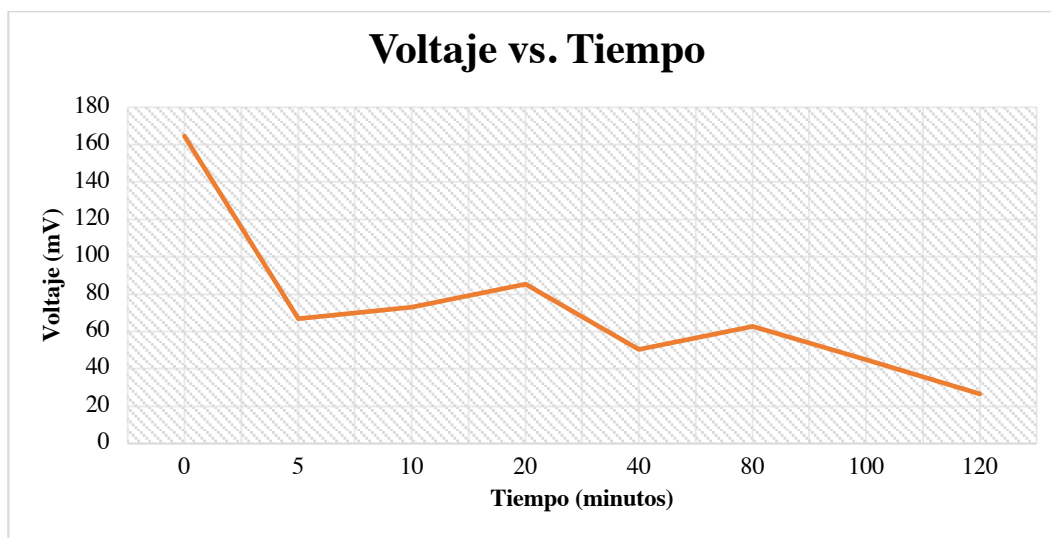
### 6.4.1. Medición de voltaje y corriente

La Tabla 6 y la gráfica siguiente (Gráfica 1) muestran las mediciones de voltaje tomadas en diferentes intervalos de tiempo. Estos valores representan la variación de voltaje registrada en milivoltios (*mV*). Al inicio, a los 0 minutos, se registra un voltaje de 164.6 *mV*, indicando un nivel inicial alto. A medida que pasa el tiempo y la Celda de Combustible se fue

descargando, los voltajes fluctuaron. A los 5 minutos, el voltaje disminuye significativamente a  $67\text{ mV}$ , luego a los 10 minutos aumenta ligeramente a  $72.9\text{ mV}$ . Después, a los 20 minutos, se observa un incremento adicional a  $85.5\text{ mV}$ . Sin embargo, a los 40 minutos, el voltaje disminuye nuevamente a  $50.3\text{ mV}$ . A lo largo del tiempo en el que se realizaron las pruebas con la Celda de Combustible, se registran más cambios en los voltajes, incluyendo un pico a los 80 minutos con  $62.6\text{ mV}$ . Finalmente, a los 120 minutos, se registra el voltaje más bajo de la Tabla, con solo  $26.6\text{ mV}$ .

*Tabla 6. Voltaje vs. Tiempo. Fuente: Elaboración propia.*

Tiempo	Voltaje
0 min	164.6 mV
5 min	67 mV
10 min	72.9 mV
20 min	85.5 mV
40 min	50.3 mV
80 min	62.6 mV
120 min	26.6 mV



*Gráfica 1. Voltaje vs. Tiempo. Fuente: Elaboración propia.*

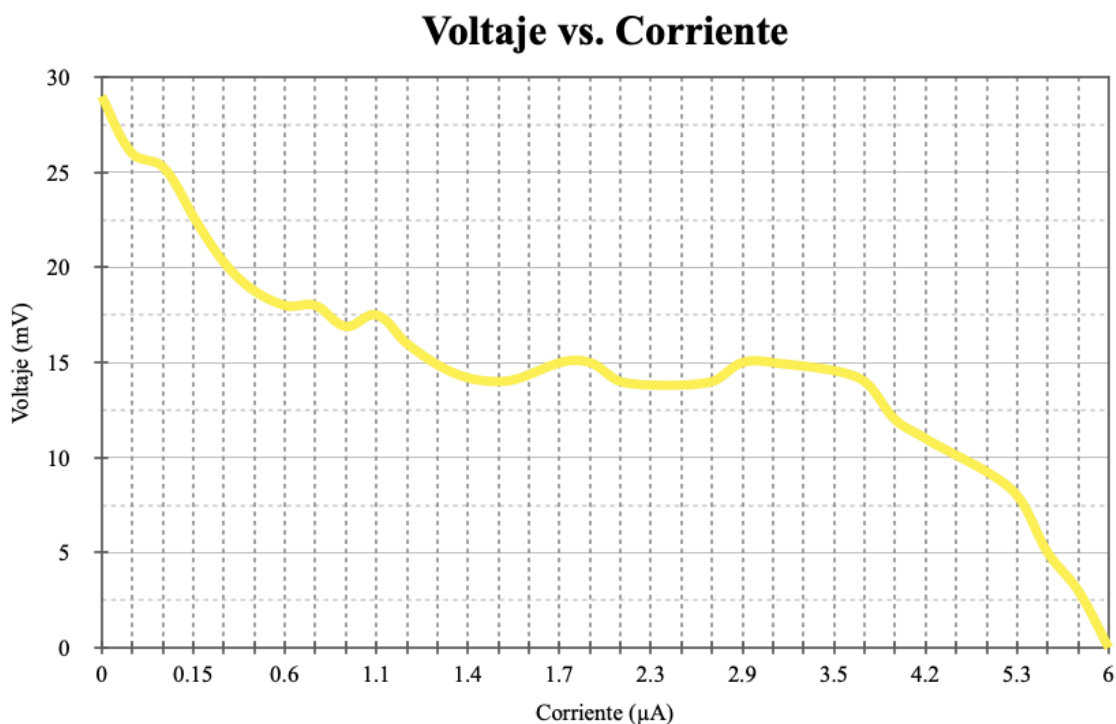
A continuación se avanza con la siguiente prueba, que implicó la utilización de diferentes resistencias para medir la corriente que circula a través de la Celda de Combustible. El voltaje se mide en paralelo con la Celda de Combustible y la resistencia en la protoboard, para medir la corriente se abre el circuito y se colocan las puntas del multímetro en serie. Se seleccionan 4 resistencias con valores bajos y altos con el fin de poder apreciar las variaciones.

*Tabla 7. Mediciones Voltaje y Corriente. Fuente: Elaboración propia.*

Valor Resistencia	Voltaje Medido	Corriente Teórica	Corriente Medida
11 $\Omega$	0.1 mV	9.09 $\mu A$	6 $\mu A$
218 $\Omega$	0.8 mV	3.67 $\mu A$	3 $\mu A$
1 K $\Omega$	3.0 mV	2.8 $\mu A$	2 $\mu A$
90 K $\Omega$	28.2 mV	0.31 $\mu A$	0 $\mu A$

En la Tabla anterior (Tabla 7) se pueden observar los puntos más importantes resultantes de las mediciones voltaje y corriente. Durante el procedimiento se comprueba la ley de Ohm, ya que a medida que se aumenta la resistencia, disminuye el voltaje y aumenta la corriente. Se comienza por medir el voltaje con la resistencia de 11 $\Omega$ , el resultado de la medición es el valor más bajo de esta prueba, 0.1 mV. Luego, mediante la [Ec. 2], se calcula la resistencia que da como resultado 9.09  $\mu A$ , en contraste, al medir la corriente con el multímetro se obtiene un valor diferente, de aproximadamente 6  $\mu A$ , debido a ciertas pérdidas dentro del circuito. Por otro lado, al utilizar una resistencia más grande, de 90 K $\Omega$  el valor medido de voltaje fue de 28.2 mV, el valor más alto en estas pruebas. Nuevamente, aplicando la Ley de Ohm, se calcula la corriente teórica de 0.31  $\mu A$ , mientras que la medición con multímetro fue cercana a 0  $\mu A$ . Los voltajes que se midieron varían desde 0.1 mV hasta 28.2 mV. Los valores de corriente teórica oscilan entre 9.09  $\mu A$  y 0.31  $\mu A$ , a diferencia de los valores reales medidos con multímetro que varían desde 6  $\mu A$ , hasta un valor muy pequeño para que el multímetro pudiera medirlo, aproximado a 0  $\mu A$ . Esta información permite comprender cómo la resistencia eléctrica influye en las mediciones de voltaje y corriente en un circuito eléctrico

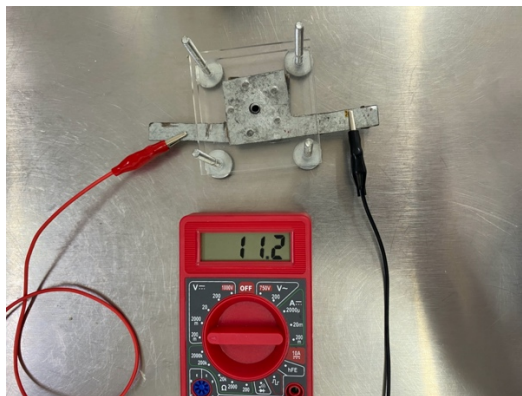
y cómo se comparan las mediciones teóricas con las mediciones reales en función de la resistencia utilizada. A continuación puede visualizarse el comportamiento de la Celda de Combustible con la gráfica 2:



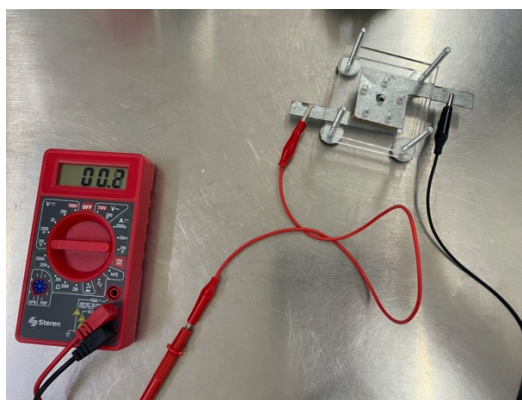
*Gráfica 2. Voltaje vs. Corriente. Fuente: Elaboración propia.*

#### **6.4.2. Pruebas alternativas del electrocatalizador**

La prueba del electrocatalizador con hidrogel y carbón arroja un valor de solo 11 mV (Fig. 41), en cambio la medición del electrocatalizador con hidrogel y Zeolita Clinoptilolita tiene un valor de casi 0 mV (Fig. 42). A partir de estos resultados, se puede inferir que la combinación de los tres componentes produce los voltajes más favorables.



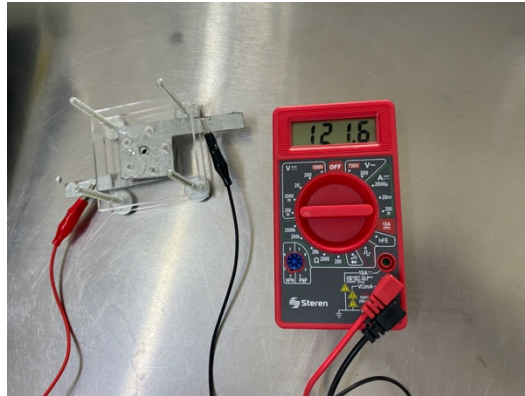
*Fig. 41. Medición de voltaje con electrocatalizador de hidrogel y carbón lignítico. Fuente: Elaboración propia.*



*Fig. 42. Medición de voltaje con electrocatalizador de hidrogel y Zeolita Clinoptilolita. Fuente: Elaboración propia.*

### **6.4.3. Variación de temperatura**

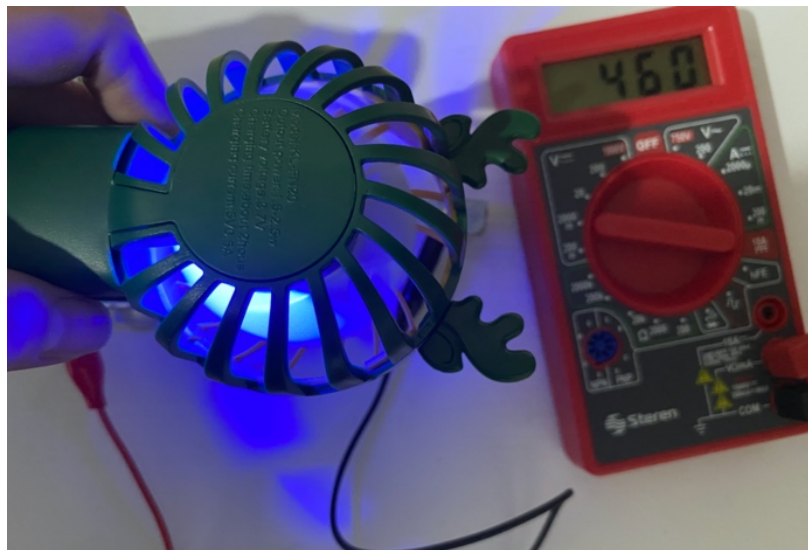
La prueba a 45 °C no revela muchas diferencias, ya que se obtienen valores de más de 100 mV (Fig. 43), muy similares a las pruebas a temperatura ambiente, se nota que el combustible al entrar en contacto con el electrocatalizador, se enfría rápidamente, lo cual limita el incremento de voltaje. Se intenta calentar el electrocatalizador, pero este se disuelve debido a la baja tolerancia a altas temperaturas de los materiales utilizados, en específico del hidrogel. Esto se repite al llevar a cabo las pruebas a 65 °C, por lo que se puede inferir que la temperatura ambiente es la más propicia para el funcionamiento óptimo de la celda.



*Fig. 43. Medición con variación de temperatura. Fuente: Elaboración propia.*

#### **6.4.4. Incremento del flujo de aire**

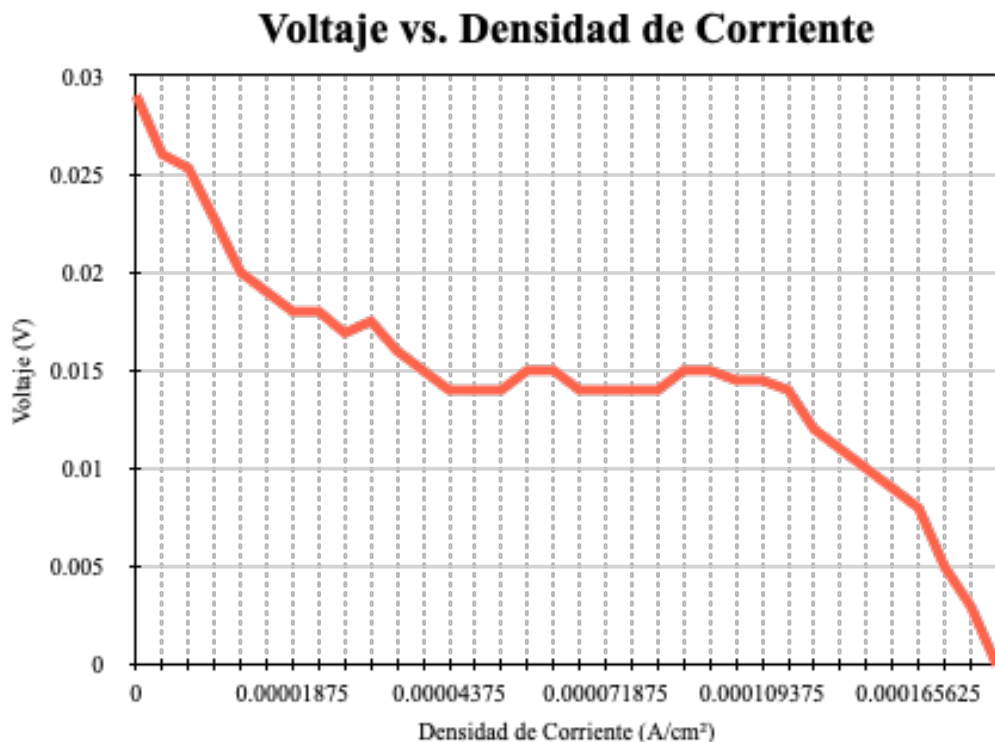
Se registran valores un rango de 400 – 500 mV, medidos en paralelo a la Celda de Combustible utilizando un multímetro, con base en estos resultados se puede considerar este experimento como exitoso (Fig. 44). Aunque, al retirar la placa contenedora ocasiona más fluctuaciones en los voltajes.



*Fig. 44. Incremento de flujo de aire. Fuente: Elaboración propia.*

#### 6.4.5. Curva de voltaje vs. densidad de corriente

La siguiente gráfica ilustra la curva de voltaje y densidad de corriente, mostrándose similar al comportamiento típico de una Celda de Combustible. Esta gráfica traza la relación entre el voltaje generado por la Celda de Combustible y la densidad de corriente que fluye a través de su área activa. Ofrece información esencial sobre la variación de la tensión eléctrica en función de la cantidad de corriente eléctrica generada por la celda, permitiendo así la evaluación y comparación con el comportamiento de una celda de combustible.



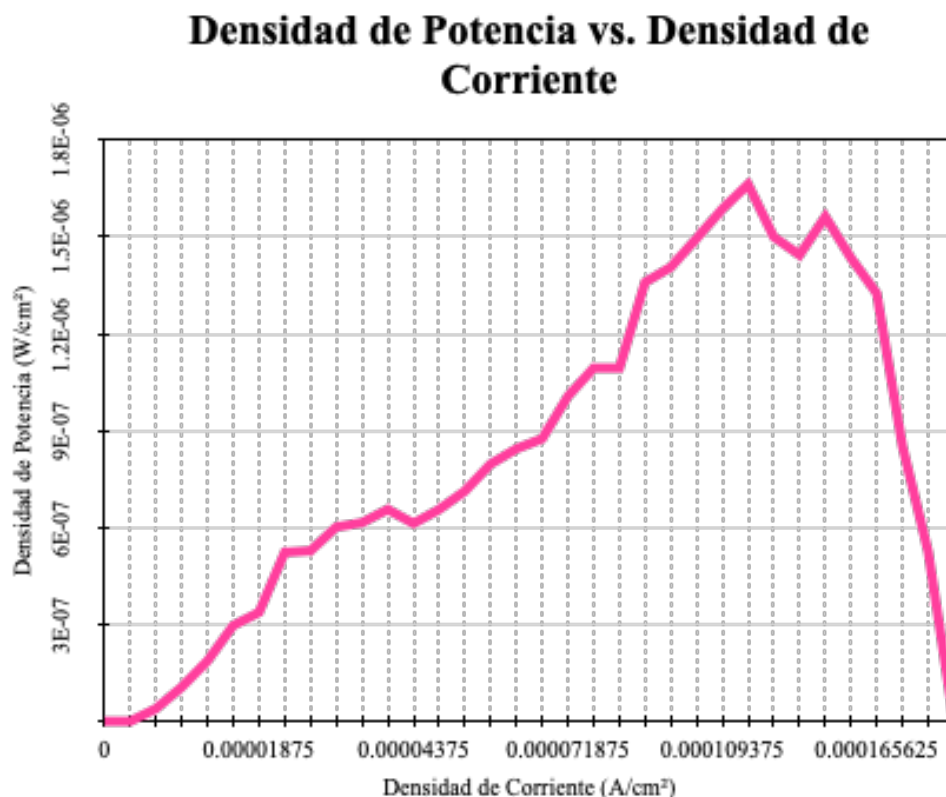
Gráfica 3. Voltaje vs. densidad de corriente. Fuente: Elaboración propia.

#### 6.4.6. Curva de densidad de potencia vs. densidad de corriente

La siguiente gráfica ilustra la curva de potencia y densidad de corriente, mostrándose similar al comportamiento típico de una Celda de Combustible, esta gráfica proporciona una perspectiva más amplia del rendimiento de la Celda de Combustible al mostrar la relación entre la potencia eléctrica generada y la densidad de corriente que atraviesa la celda. Se calcula el punto máximo de operación, donde se logra la máxima potencia eléctrica con la densidad de corriente correspondiente:

$$\text{Potencia máxima} = 1.66 \cdot 10^{-6} \frac{W}{cm^2}$$

$$\text{Densidad de corriente} = 1.18 \cdot 10^{-4} \frac{A}{cm^2}$$



Gráfica 4. Densidad de potencia vs. densidad de corriente. Fuente: Elaboración propia.

Al comparar el resultado de la potencia máxima con investigaciones similares [15]: en una celda de  $60 \text{ mm}^2$  y un área activa de  $30 \text{ mm}^2$ , utilizando Etanol al 99%, hidrogel, membrana de Nafión y catalizador de Platino se encuentra un valor de potencia de  $0.00589 \text{ mW}$ , que al hacer la conversión y dividir entre el área activa se obtiene  $1.96 \cdot 10^{-6} \text{ W}$ , aunque tiene un valor mayor sigue estando en el rango de las micras.

## RECOMENDACIONES

Durante la experimentación, se identifica la necesidad de elaborar un contenedor para mantener el electrocatalizador en su lugar durante la construcción de la celda. Afortunadamente, la elaboración del electrocatalizador se efectúa sin complicaciones, lo que facilita el avance de la investigación. Durante las pruebas en la celda, se observa que el flujo de oxígeno no era adecuado, sin embargo, se puede solucionar satisfactoriamente aumentando el flujo de aire.

## CONCLUSIONES

Con las técnicas de caracterización aplicadas a la Zeolita tipo Clinoptilolita se puede corroborar su composición química, morfología, estructura atómica y molecular. Los resultados revelan que la Zeolita tipo Clinoptilolita es un mineral rico en metales e iones, igualmente se reafirma que tiene una estructura microporosa que favorece su uso como catalizador en una Celda de Combustible construida con materiales accesibles.

El desarrollo del electrocatalizador utilizando Zeolita tipo Clinoptilolita, hidrogel y carbón lignítico, muestra actividad catalítica que resulta favorecedora para la oxidación de bioetanol y reducción de oxígeno, al implementarse en la Celda de Combustible.

Finalmente, con las pruebas de evaluación se encuentra que el electrocatalizador con el voltaje más alto y por lo tanto el que cuenta con mejor funcionamiento es el elaborado con una mezcla de 20% de Zeolita Clinoptilolita, 20% de carbón lignítico y 60% de hidrogel, con la que se registra una potencia máxima de  $1.66 \cdot 10^{-6} \frac{W}{cm^2}$ .

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] U.S. Department of Energy, *Fuel Cell Handbook*, 2004.
- [2] J. & D. A. Larminie, *Fuel cell systems explained*, vol. 2, Wiley, 2003.
- [3] Senado de la República Mexicana, «Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe. Gaceta del Senado: LXIV/ISPR-5/95687,» 2019. [En línea]. Available: [https://www.senado.gob.mx/64/gaceta\\_del\\_senado/documento/95687](https://www.senado.gob.mx/64/gaceta_del_senado/documento/95687).
- [4] Naciones Unidas, «El Acuerdo de París,» [En línea]. Available: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>.
- [5] J. S. T. F. A. y. A.-M. A. Lara-Rodríguez, «Minería del platino y el oro en Chocó: Pobreza, riqueza natural e informalidad,» *Revista de Economía Institucional*, vol. 22, n° 42, pp. 241-268, 2020.
- [6] . J. L. L. P. F. S. R. S. I. Michael L. Zientek. [En línea]. Available: <https://pubs.usgs.gov/publication/pp1802N>.
- [7] A. J. S. N. R. Kirubakaran, «A review on fuel cell technologies and power electronic interface,» *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 13, n° 9, p. 2430–2440, 2009.
- [8] UN, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. [Último acceso: 2023].
- [9] H. C.-H. L. M.-D. G. S.-W. S. H.-M. C. Kung-Hsu, «Analysis of the characterization of water produced from proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) under different operating thermal conditions,» *International Journal of Hydrogen*, vol. 37, n° 4, pp. 3890-3896, 2012.
- [10] H. Y. M. C. K. Z. A. Y. A. & Ş. F. Burhan, «Chapter 4 - Direct ethanol fuel cells (DEFCs),» de *Direct Liquid Fuel Cells*, ScienceDirect, 2020, pp. 95-113.
- [11] N. Artrith, «Learning What Makes Catalysts Good,» *Matter*, vol. 3, pp. 981-988, 2020.
- [12] Thermofisher, «Minería de Platino,» [En línea]. Available: <https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/metales/por-que-la-mineria-del-platino-puede-presentar-dificultades/>. [Último acceso: 2023].
- [13] D. G. E. Müller, «Zeolites: Sustainable Materials with Unique Properties,» *Frontiers in Chemistry*, vol. 7, 2019.
- [14] Zeomex, «Cómo se extrae la zeolita,» [En línea]. Available: <https://zeomex.com.mx/como-se-extrae-la-zeolita/?roy1/2023-09-07175239.html>. [Último acceso: 2023].

- [15] J. Baleón, «Diseño y Elaboración de un Prototipo de una Micro-Celda tipo Etanol Directo,» *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, vol. 5, n° 1, 2020.
- [16] J. Baleón, M. Torres, N. Enriquez, N. Téllez, L. Paniagua, J. Cotzomi y E. De la Fuente, «Power Generation by means of a Prototype Microcell using Bioethanol as Fuel and Clinoptilolite-type Zeolite,» *Aldeser*, vol. 4, n° 2, pp. 44-51, 2023.
- [17] N. Yamin, W. Khalid, M. Altaf, R. S. Ashraf, M. Shahid y A. Zulfiqar, «Conventional Fuel Cells vs Biofuel Cells,» de *Biofuel Cells: Materials and Challenges*, Scrivener Publishing LLC, 2021, pp. 377-422.
- [18] O. Vallejo, «Ensamble y evaluación de una celda combustible tipo PEM.,» Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, 2003. [En línea]. Available: <http://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1021/281>.
- [19] E. I. R.-H. A. L. F. R. A. Ortiz-Rivera, «Comprendiendo la Historia de las Celdas de Combustible,» *IEEE*.
- [20] Secretaría de Economía y Servicio Geológico Mexicano, «Monografía de Platino,» 2020. [En línea]. Available: [http://www.sgm.gob.mx/pdfs/monografias/metalicos/Monografia\\_de\\_Platino\\_2020.pdf](http://www.sgm.gob.mx/pdfs/monografias/metalicos/Monografia_de_Platino_2020.pdf).
- [21] Berkeley, «Platinum,» [En línea]. Available: <https://nature.berkeley.edu/classes/eps2/wisc/pt.html>. [Último acceso: 2023].
- [22] «Platino,» [En línea]. Available: [https://pt.kle.cz/es\\_ES/platino.html](https://pt.kle.cz/es_ES/platino.html).
- [23] S. Bhagavathy y J. Thakur, «Green Hydrogen: Challenges for Commercialization,» *IEEE Smart Grid*, 201.
- [24] UV Acrylic, «UV Acrylic,» [En línea]. Available: <https://es.uvacrylic.com/blog/what-is-the-acrylic/>. [Último acceso: 2023].
- [25] Jansen Iberia, [En línea]. Available: <https://jansen.es/acero-galvanizado-ventajas-y-desventajas/>. [Último acceso: 2023].
- [26] K. S. P. W. A. A. B. A. P. J. W. R. D. C. Caballero, «Obtención de acetato de celulosa a partir de papel reciclado: una alternativa para la producción de acetato de celulosa en Colombia,» *Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção APREPRO*, 2020.
- [27] N. Mansouri, N. Rikhtegar, H. A. Panahi, F. Atabi y B. K. Shahraki, «Porosity, characterization and structural properties of natural zeolite - clinoptilolite - as a sorbent.,» *Environment Protection Engineering*, vol. 39, n° 1, pp. 139-152, 2013.
- [28] G. V. Tsitsishvili, T. G. Andronikashvili, G. R. Kirov y L. D. Filizova, «Natural Zeolites.,» *Ellis Horwood Limited*, 1992.
- [29] B. E. Vizcaino Ramón, «Identificación y Caracterización de la Zeolita Natural tipo Clinoptilolita,» *Universidad Autónoma de Nuevo León*, 1998.

- [30] A. B. J. L. R. d. A. L. R. d. G. B. Ramirez, «Materiales polimeros de tipo hidrogeles: revisión sobre su caracterización mediante flir, dsc, meb y met,» *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 36, n° 2, 2016.
- [31] Subsecretaría de Minería , «Perfil de Mercado del Carbón,» 2017.
- [32] A. S. S. K. C. Sedra, *Microelectronic Circuits*, vol. 4, Oxford University Press, 1998.
- [33] R. L. N. L. Boylestad, *Electronic Devices and Circuit Theory*, vol. 11, Pearson, 2012.
- [34] E. M. Purcell, *Electricidad y Magnetismo*, Reverté, 2005.
- [35] N. Bizon, «Optimal filtering of the fuel cell power probing signal for maximum power point robust adaptive tracking,» *IEEE*, 2010.
- [36] E. S. D. J. D. Dana, *Manual of Mineralogy*, vol. 21, New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [37] J. D. Dana, *Manual of Geology*, vol. 4, New York: American Book, 1895.
- [38] Mastergis, [En línea]. Available: <https://mastergis.com/sobre-mastergis>.
- [39] A. W. A. M. P. Fajdek-Bieda, «Clinoptilolite as a natural, active zeolite catalyst for the chemical transformations of geraniol,» *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, vol. 133, p. 997–1011, 2021.
- [40] A. d. J. F.-L. N. C. P.-M. Y. A. P.-C. O. C.-d. L. G. G.-R. S. P. & G.-Z. M. Montes-Luna, «Caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca<sup>2+</sup> por distintos métodos fisico-químicos para su posible aplicación en procesos de separación de gases,» *Superficies y vacío*, vol. 20, n° 1, pp. 5-11, 2015.
- [41] RUFF, «Clinoptilolite,» [En línea]. Available: <https://rruff.info/Clinoptilolite-Ca/R060662>. [Último acceso: 2023].
- [42] «SGM,» [En línea]. Available: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Petrografia.html>].
- [43] SCAI Universidad de Málaga, «Microscopía Electrónica de Barrido,» [En línea]. Available: <https://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>.
- [44] J. C. P. J. A. G. S. L. X. Melgarejo, «Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera,» *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 62, n° 1, pp. 1-23, 2010.
- [45] Universidad de Málaga, «SEM,» [En línea]. Available: <https://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>. [Último acceso: 2023].
- [46] Thermofisher, «XRF,» [En línea]. Available: <https://www.thermofisher.com/mx/es/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/oes-xrd-xrf-analysis/x-ray-fluorescence.html>. [Último acceso: 2023].

- [47] Zeiss, «Zeiss,» [En línea]. [Último acceso: 2023].
- [48] «JEOL Ltd,» [En línea]. Available: <https://www.jeol.com>. [Último acceso: 2023].
- [49] Solidworks, [En línea]. Available: <https://solid-bi.es/solidworks/>. [Último acceso: Agosto 2023].
- [50] «Fuel Cell Store,» [En línea]. Available: <https://www.fuelcellstore.com/flex-stack-bipolar-graphite-plate>. [Último acceso: 2023].
- [51] C. R. J. J. D. Bernal, «Evaluación de una celda de combustible DMFC utilizando etanol, con miras a determinar la flexibilidad de las celdas y el uso eficiente de recursos energéticos fase 1,» *Educación en Ingeniería*, nº 6, pp. 20-28, 2008.
- [52] E. Katz y P. Bollella, «Fuel Cells and Biofuel Cells. From Past to Perspectives.,» *Israel Journal of Chemistry*, vol. 60, pp. 1-18, 2020.
- [53] «Thermofisher,» [En línea].
- [54] F. S. J. M. Andújar, *Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries*, Huelva: Department of Electronic, Computer Science and Automatic Engineering, University of Huelva Crta..
- [55] R. Narayan, *Encyclopedia of Sensors and Biosensors*, 2023, Elsevier, 2023, pp. 212-230.
- [56] M. F. M. C. M. F. O. Hernández, «Celdas de combustible. Promesa de un futuro limpio para vehículos híbridos eléctricos,» 2021. [En línea]. Available: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=537&IdBoletin=193>. [Último acceso: 2023].
- [57] Departamento de Educación Vasco, «Densidad de Corriente,» [En línea]. Available: [https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/E/E01/es\\_IEA\\_E01\\_Contenidos/website\\_1081\\_densidad\\_de\\_corriente.html](https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/E/E01/es_IEA_E01_Contenidos/website_1081_densidad_de_corriente.html).
- [58] Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, «Potencia Eléctrica,» 2019. [En línea]. Available: [https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P\\_Presentaciones/b\\_sahagun/2019/emmg-electricidad-2.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/b_sahagun/2019/emmg-electricidad-2.pdf).
- [59] Fundación Bancaria Ibercaja, «Cristalografía,» [En línea]. Available: <https://aulaenred.fundacionibercaja.es/contenidos-didacticos/cristalografia/redes-cristalinas-2448/>. [Último acceso: 2023].