

Diseño y construcción de una celda de combustible tipo PEM para la generación de energía

Design and construction of a PEM fuel cell for power generation

Romero Ramírez José Octavio¹, Elizalde Blancas Francisco¹

¹ División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca.
jo.romero.ramirez@ugto.mx, franciscoeb@ugto.mx

Resumen

En este trabajo se realizó un análisis experimental del funcionamiento de celdas de combustible tipo PEM a partir de un banco de pruebas didáctico modificado, así como la fabricación de un prototipo funcional. La investigación se centró en obtener información sobre el funcionamiento de esta tecnología, implementando los fundamentos teóricos y comparando los datos con los resultados experimentales. Se implementaron modificaciones eléctricas y electrónicas para mejorar la adquisición de datos. El rendimiento de la celda de combustible se evaluó bajo distintas temperaturas y se analizó la generación de hidrógeno del electrolizador al variar la corriente suministrada. Los resultados se presentan en curvas de polarización y de potencia que caracterizan el funcionamiento de la celda en cada condición de prueba.

Palabras clave: Análisis experimental, celdas de combustible tipo PEM, banco de pruebas didáctico, curvas de polarización, generación de hidrógeno.

Introducción

Los orígenes de las celdas de hidrógeno se remontan a más de 160 años. En 1839, William Grove revirtió la dirección de un proceso electrolítico al experimentar con baterías para generar electricidad. La electrólisis es un proceso que separa los elementos de un compuesto aplicando electricidad, liberando electrones por los aniones en el ánodo y su captura por los cationes en el cátodo. La idea de Grove fue la combinación de oxígeno con hidrógeno para producir electricidad y generar agua como residuo. Mediante catalizadores de platino (sustancias que aceleran una reacción química) logró realizar este proceso. Gracias a su descubrimiento, su investigación ayudó a entender los principios de funcionamiento de una celda de combustible y fue la base de posteriores aportaciones de esta tecnología (Bossel, 2007). Posteriormente surgieron más descubrimientos y aportaciones con el paso de los años. Durante los años 80's y 90's se tuvo mayor desarrollo de estos dispositivos al implementar pequeñas plantas de potencia.

Hoy en día, las celdas de combustible son usadas en el campo aeroespacial y generación de energía estacionaria; sin embargo, aún no se han implementado en la mayoría de las aplicaciones debido a los altos costos de fabricación y transporte del hidrógeno.

La contaminación del aire contiene varias sustancias nocivas en la atmósfera que afectan la salud humana y ambiental. Sus causas incluyen la quema de combustibles fósiles y emisiones de desechos que producen la industria y los medios de transporte. Como consecuencia, se tienen enfermedades respiratorias, cardíacas, cáncer de pulmón, derrames cerebrales, incremento de tasa de mortalidad y afección en el desarrollo del cuerpo y sus órganos; de la misma manera, produce lluvia ácida, la cual genera daños en el ecosistema. Para solucionar esto se han desarrollado tecnologías que reducen residuos contaminantes, resultando viable adoptar el uso de energías renovables y el transporte sostenible.

Como respuesta ante esta problemática, una de las tecnologías sustentables es la celda de combustible. Estos son dispositivos de conversión de energía sin involucrar partes móviles; así, la celda es capaz de operar de manera silenciosa. La energía liberada en forma de calor y electricidad puede almacenarse y utilizarse.

El proceso comienza con la alimentación de gas hidrógeno al ánodo de la celda, este es uno de los electrodos en donde ocurre la separación de los átomos de hidrógeno en electrones y protones. Los protones o iones de hidrógeno atraviesan la membrana de intercambio de protones (PEM) hacia el otro electrodo, siendo este el cátodo de la celda, el cual está siendo alimentado con oxígeno. Los electrones no pueden pasar por esta membrana o electrolito, por lo que viajan a través de un circuito externo. El circuito contiene una carga eléctrica, dicha carga puede ser un diodo emisor de luz LED, un motor pequeño o una simple resistencia que emule una carga al circuito. Los electrones se dirigen al mismo cátodo de la celda, donde los protones y electrones se vuelven a combinar y se enlazan con oxígeno gaseoso para crear moléculas de agua.

Metodología

Modelado del banco de pruebas

Los elementos que componen el banco de pruebas son:

- **Amperímetro y voltímetro:** El amperímetro y multímetro que se utilizaron se encargan de medir de forma cuantitativa la intensidad de corriente y voltajes, respectivamente, demandados por la carga (motor eléctrico).

Estos se encuentran conectados al motor de corriente directa que funciona como la carga del circuito de la celda de hidrógeno, de esta forma podemos observar la demanda de corriente y voltaje del ventilador. Los dispositivos colocados en la base del banco de pruebas son de tipo analógico. Adicionalmente se conectaron multímetros en el circuito y en las terminales de la celda para registrar las magnitudes eléctricas activas y tener un mayor rango de precisión.

- **Electrolizador de hidrógeno:** Es un dispositivo que se basa en el fenómeno de electrólisis, el cual es un proceso mediante el cual se separan los componentes de una sustancia a través de una corriente eléctrica aplicada a sus electrodos. Se utilizó agua destilada por varias razones relacionadas con la prevención de daños por corrosión y evitar la formación de incrustaciones. Los electrolizadores tienen fundamentos termodinámicos y electroquímicos detrás de la electrólisis del agua, incluyendo las reacciones en el ánodo y cátodo, el potencial necesario y la eficiencia energética (Godula-Jopek & Stolten, 2015).

A pesar de que inicialmente se optó por un electrolizador prefabricado debido a su mejor construcción, funcionalidad y apariencia, la corrosión no pudo evitarse con el transcurso de las pruebas, llevando a que el equipo dejara de funcionar.

Como puede observarse en la Figura 1, se elaboró un sencillo electrolizador casero a partir de materiales reciclados como solución a la situación anterior, para ello se requirió de los siguientes elementos básicos:

- Electrodos: Tornillos de hierro, son conductores eléctricos que se sumergen en el electrolito (agua destilada). Estos tornillos son las terminales del electrolizador y aquí es donde se aplicará la corriente mediante una fuente de poder.
- Electrolito: Se utilizó agua destilada; este tipo de agua se obtiene a través de su evaporación y condensación.
- Fuente de poder o corriente continua: inicialmente se utilizó una fuente de poder regulable de 12 V y 5 W, sin embargo, se sustituyó por un conjunto de paneles solares de 12 V y 3 W.

En el interior del recipiente se tiene una pared, igualmente de plástico reciclado, que se encarga de dividir los gases generados.



Figura 1. Electrolizador casero elaborado con materiales reciclados.

- **Elemento de Carga:** En términos de electricidad, aquel componente de un circuito eléctrico (motor, resistencias, componentes electrónicos) que consume y represente una resistencia al flujo de electrones es considerado una carga o consumidor de corriente. En este caso, el flujo de electrones es proporcionado por la celda de hidrógeno. La demanda de corriente de la carga debe ser menor o igual a la capacidad de movilización de electrones producida por parte de la celda. Si no se cumple esta capacidad de suministro, el equipo no será capaz de energizarse, resultando en movimientos lentos o nulos. Además de utilizar un ventilador de bajos requerimientos, también se describe el comportamiento de la celda sustituyendo la carga inicial con potenciómetros de distinta capacidad.

- **Paneles Solares:** Se adquirieron cuatro paneles solares de 12 V y 3 W como sustitutos de la fuente de poder. Apoyándose en un banco de capacitores con la finalidad de disminuir la variación de voltaje y corriente, y de esta manera proporcionar los requerimientos suficientes del electrolizador, logramos la funcionalidad del electrolizador casero. Los paneles se conectaron en serie con la finalidad de obtener un mayor voltaje

- **Resistencias variables:** Después de confirmar la operatividad de la celda, la fuente de poder y el electrolizador, se iniciaron las pruebas para generar las curvas de polarización. En esta etapa, la carga original del sistema, motor eléctrico con ventilador, se sustituyó por resistencias variables (potenciómetros de 5 K y 10 K, respectivamente). Esto permitió variar la demanda de corriente y registrar el funcionamiento de la celda bajo diferentes cargas.

Celda de combustible tipo PEM

Se recopiló información acerca de la constitución básica de una celda de combustible tipo PEM en función de un modelo didáctico, inicialmente realizando un desensamble y separando cada uno de sus componentes para visualizar su estructura.

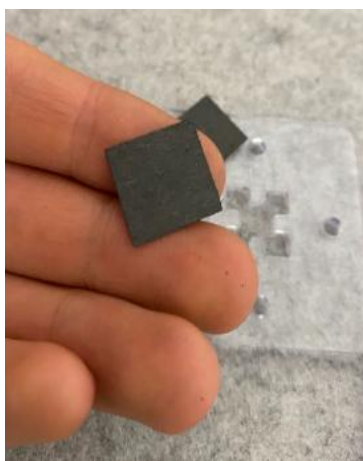
La estructura de la celda de combustible tiene un diseño sencillo, en comparación con otros modelos de escala industrial, consistiendo en los siguientes elementos:

1. **Membrana de intercambio de protones (PEM):** Se trata de una membrana PEM Nafion N-117, la cual es una película delgada plástica transparente capaz de transportar iones H^+ atravesando su estructura, tiene un espesor de 183 micrones, químicamente estabilizada y usos comunes como almacenamiento de energía y procesos electrolíticos diversos (Nafion™, 2025). Es un elemento clave en este tipo de celdas. Poseen alta conductividad de protones, impermeabilidad a gases y combustibles, tienen alta estabilidad térmica y química y son aislantes eléctricos, teniendo un excelente desempeño en este tipo de aplicaciones (Wilkinson *et al.*, 2010).
2. **Electrodos:** La celda de combustible posee dos electrodos, ánodo y cátodo, respectivamente. Los electrodos tienen un tamaño de 1 cm por lado y un espesor ligeramente mayor que la membrana de intercambio de protones.

Los electrodos de la Figura 2(a) están fabricados de papel de carbón con tratamiento de platino como catalizador. Las concentraciones exactas de platino se desconocen; sin embargo, al tratarse de un dispositivo didáctico y de bajo costo, se aproxima al 10% de platino por cada gramo de polvo de carbón.

En la Figura 2(b) se observa un hueco en la estructura donde se colocará cada electrodo, y en su parte posterior se puede observar una malla delgada fabricada con materiales poliméricos con relleno conductor donde lleva una de sus dos terminales.

Es crucial conocer la concentración del catalizador debido al impacto en el rendimiento, el costo y la durabilidad de cualquier proceso de catálisis, especialmente en sistemas como las celdas de combustible. Optimizar esta concentración es un equilibrio delicado que afecta múltiples aspectos clave como el rendimiento, la eficiencia, la durabilidad, la estabilidad, el diseño, la fabricación y los costos (Navarro et al., 2008).



a)



b)

Figura 2. a) Electrodos de la celda y b) Malla delgada con material conductor.

El área efectiva de los electrodos resulta compleja de calcular debido a su porosidad, y para ello se emplea una técnica llamada **voltamperometría cíclica** que caracteriza sistemas electroquímicos mediante la variación de voltaje en la celda y de esta manera observar el comportamiento que se tiene ante diversas corrientes resultantes. De esta forma se obtiene una mejor aproximación al área efectiva de los electrodos, además de proporcionar datos sobre la transferencia de carga, reacciones electroquímicas y velocidades de reacción.

3. **Canales de distribución y enfriamiento:** Esta celda posee unos canales de distribución en forma de red, los cuales se pueden apreciar en la Figura 2(b) en una estructura tipo malla. Las variaciones en el diseño de los canales de distribución en una celda de combustible intervienen en su desempeño. Estos canales se encuentran grabados en las placas bipolares (o placas de flujo), teniendo múltiples funcionalidades.

La celda en cuestión no posee un sistema de enfriamiento ya que aprovecha el aire circundante para lograr enfriarse y disipar el calor que se genera. Existen técnicas para disipar el calor generado como un sistema de distribución que envuelve por completo a la celda con el mismo aire a altas velocidades; no obstante, se requiere de un dispositivo externo para lograr esta tarea, lo que conlleva un mayor gasto energético.

La opción viable es colocar canales en la placa bipolar; de esta forma, el aire que ingresa pasará a través de estos canales para enfriar la superficie de la celda.

4. **Placa bipolar:** Proporciona un soporte mecánico, distribuye y separa los reactantes (óxido y reductor), actúa como canales de flujo para enfriamiento y distribución del gas que participa en el electrodo poroso, mejora la conexión entre celdas y facilita la gestión de calor y agua. Las placas deben ser impermeables, buenos conductores de electricidad, buenos disipadores de calor, resistentes a temperaturas elevadas y a la corrosión. Los materiales predominantes de fabricación son compuestos, aleaciones de metales y grafito.

Pruebas de la Celda de Combustible

Una vez montado el banco de pruebas con sus respectivos elementos, se inició con la prueba de funcionamiento de la celda de combustible para observar que produzca corriente y alimente a la carga (inicialmente un motor con ventilador).

Al aplicar la corriente que proporcionan los paneles solares a las terminales del electrolizador, como antes se mencionó, comenzará el proceso de separación de los componentes del agua en oxígeno e hidrógeno, almacenándose ambos gases dentro del electrolizador. La sección correspondiente al hidrógeno tiene una abertura donde se conectará a la terminal de alimentación de la celda mediante un tubo delgado y flexible.

La celda es alimentada con hidrógeno y oxígeno suministrados por el electrolizador y el medio circundante, respectivamente. Una vez dentro de la celda, se realiza un proceso de electrólisis inversa, recombinando nuevamente el hidrógeno y el oxígeno, produciendo corriente eléctrica. Si esto se cumple, el ventilador comenzará a moverse y habrá lectura en los dispositivos analógicos de medición de corriente y voltaje, convirtiendo la energía química del hidrógeno en energía eléctrica.

Para comprobar que la celda funciona, la carga se conectará directamente a las terminales de la celda de combustible. La medición de la corriente y el voltaje producidos se realizará mediante un circuito instrumentado con multímetros digitales y análogos integrados en la base del banco de pruebas.

En un inicio no será perceptible movimiento alguno de la carga (motor eléctrico) debido al tiempo de activación de la celda de combustible, humidificación de la membrana, inercia mecánica de la carga y corriente de arranque necesaria (inrush current).

Las causas principales de bajas corrientes producidas por la celda son la distancia entre los electrodos-electrolito debido a la resistencia del flujo de la corriente eléctrica y la poca área de contacto entre los elementos de la celda, gas, electrodo y electrolito, respectivamente (Larminie & Dicks, 2003).

Obtención de las Gráficas de Polarización

Una gráfica de polarización representa el comportamiento de la celda. Si consideramos que el sistema es reversible, podría darnos un voltaje de 1.2 V operando por debajo de los 80-100°C; sin embargo, el término reversible es una forma de idealizar el sistema, en la práctica es menor que 1.2 V debido a una caída de voltaje.

Los términos que producen estos cambios respecto a un modelo idealizado son los siguientes (Larminie & Dicks, 2003):

Cruce de combustible y corrientes internas: El electrolito solo debe transportar iones, pero puede presentarse difusión de combustible.

Pérdidas Óhmicas: En este caso se debe a la resistencia de flujo de electrones a través del material de conexión y electrodos. Es proporcional a la densidad de corriente, además de lineal.

Transporte de masa y problemas de concentración: El flujo de reactantes a través de la celda no es constante, por lo que resulta en un cambio de concentración de los reactantes en la superficie de los electrodos. La cantidad de reactantes que ingresan a la celda afecta el voltaje, por ello se llama pérdida de concentración.

Al haber un cambio de concentraciones, no hay un transporte suficiente de reactantes sobre la superficie del electrodo, a esto se le conoce como pérdidas debido al transporte de masa.

Pérdidas de activación: Representan la energía que se requiere para que las reacciones electroquímicas comiencen en la superficie de los electrodos a cierta velocidad.

Para obtener la curva de polarización, con la carga ya sustituida por la resistencia variable (ver Figura 3), se reguló la perilla de tal forma que pasamos de baja a alta demanda de corriente, lo que provocará cambios en el voltaje de la celda. En cada cambio de corriente se registró el valor con su voltaje correspondiente.

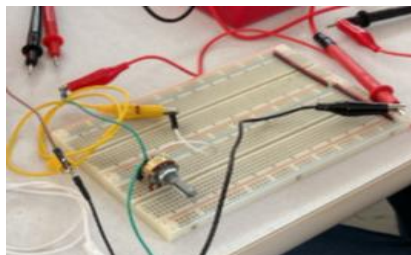


Figura 3. Circuito con potenciómetro conectado a la celda de combustible y multímetros.

El procedimiento para obtener las curvas de polarización a distinta temperatura será el mismo, variando la demanda de corriente al girar la perilla hasta llegar al límite y observar el voltaje mínimo que alcanza la celda.

Efecto de la Temperatura

Se realizaron pruebas a diferentes temperaturas: 23.5, 46.6 y 57.7 °C aplicando calor con el uso de una pistola térmica regulable. La pistola se colocó a una distancia considerable para obtener menos variación de temperatura de la celda. Para determinar la temperatura de la celda se usó una cámara termográfica FLUKE TI480.

Conociendo el valor de emisividad del material de la celda (policarbonato), se configuró la cámara para mostrar las regiones a distintas temperaturas y tomar captura de cada prueba, como se muestra en la Figura 4.

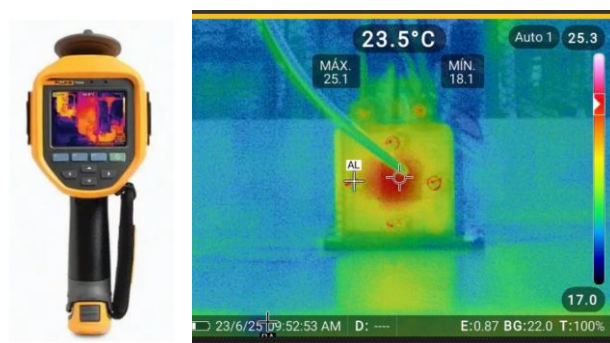


Figura 4. Fotografía térmica de la celda operando inicialmente a 23.5 °C con uso de pistola FLUKE TI480.

Resultados

Las curvas de polarización obtenidas experimentalmente se muestran en color rojo, mientras que la curva azul es una aproximación polinomial que representa mejor la tendencia de la curva. De la misma manera, las gráficas de potencia incluyen esta aproximación, en donde la curva de tonalidad roja se obtuvo experimentalmente.

Las temperaturas de operación de la celda no son constantes debido a variaciones con tolerancia de ± 1 °C aproximadamente.

En la Figura 5, se observa la curva de polarización a una temperatura de operación de 23.5°C donde obtenemos un voltaje máximo de la celda de 0.65 V cuando la demanda de corriente de nuestra carga es mínima. A medida que incrementamos la resistencia, demandará mayor corriente y producirá cambios (disminución) en el voltaje. El voltaje mínimo que se obtuvo es de alrededor de 0.25 V. La forma de la curva se aproxima a una "S" como se menciona en algunas bibliografías. En las mediciones experimentales pueden verse algunas variaciones que se deben a las condiciones en donde se lleva a cabo la prueba o al ruido de la medición.

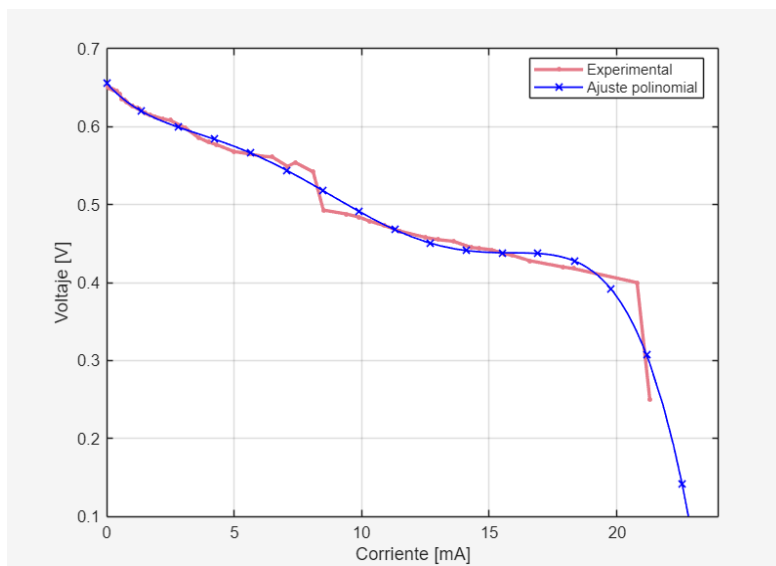


Figura 5. Curva de polarización a 23.5 °C.

La caracterización de la celda a una temperatura de operación de 46.6°C, como se muestra en la Figura 6, proporciona una representación de la curva de polarización de la celda que es más suave, al igual que los cambios de voltaje. A medida que la corriente aumenta desde cero, el voltaje experimenta una ligera caída inicial. Resulta más complicado identificar las regiones que causan la caída de potencial (pérdidas óhmicas, concentración, activación, etc.) en comparación con la prueba anterior a menor temperatura.

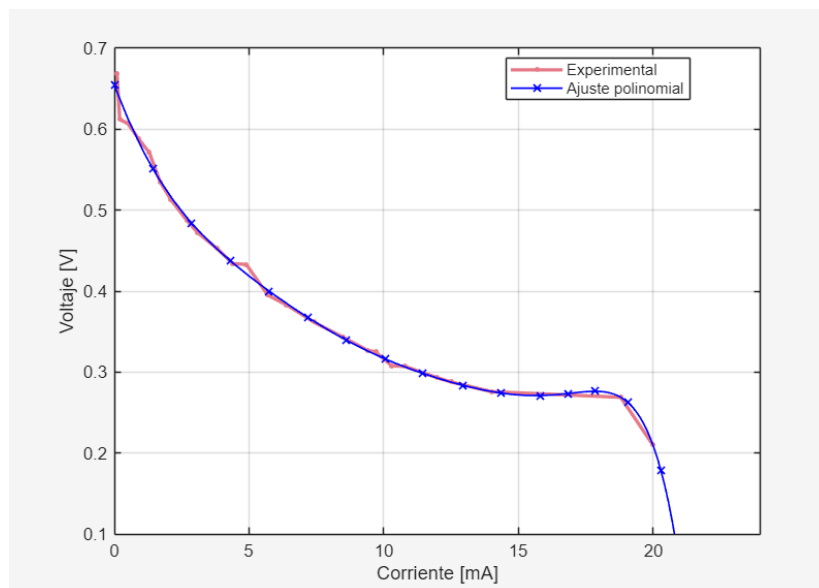


Figura 6. Curva de polarización a 46.6 °C.

Como se puede inferir de la Figura 7, la diferencia de temperatura entre esta y la prueba anterior fue de 11.1 °C, lo cual contrasta con los 23.1 °C registrados entre las dos primeras mediciones. Al incrementar la temperatura de la celda por encima de los 60 °C, las mediciones de voltaje y corriente resultaron ser demasiado bajas para una representación gráfica significativa. Esto llevó a la deducción de que la temperatura máxima de operación para esta celda en particular fue de 60 °C.

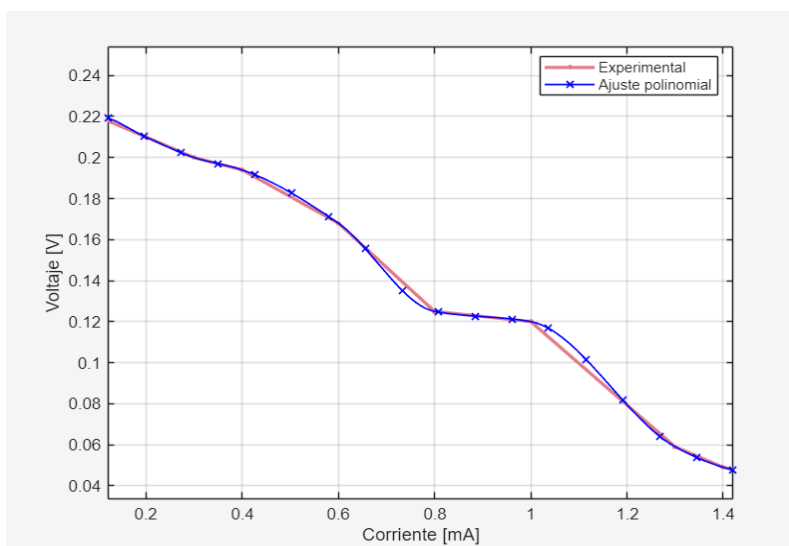


Figura 7. Curva de polarización a 57.7 °C.

En la Figura 8 se muestra la curva de potencia vs. corriente de la misma celda de combustible didáctica, medida a una temperatura de operación de 23.5 °C. Esta se obtiene de la curva de polarización (voltaje vs. corriente) que se analizó anteriormente, ya que la potencia instantánea (P) se calcula como el producto del voltaje (V) y la corriente (I) ($P=V \times I$). Esta gráfica es esencial para determinar el punto de operación óptimo de la celda de combustible, es decir, la corriente a la cual la celda puede entregar su máxima potencia de salida a la temperatura de 23.5 °C. La forma de la curva es normal para una celda que presenta las pérdidas típicas de activación, óhmicas y de concentración.

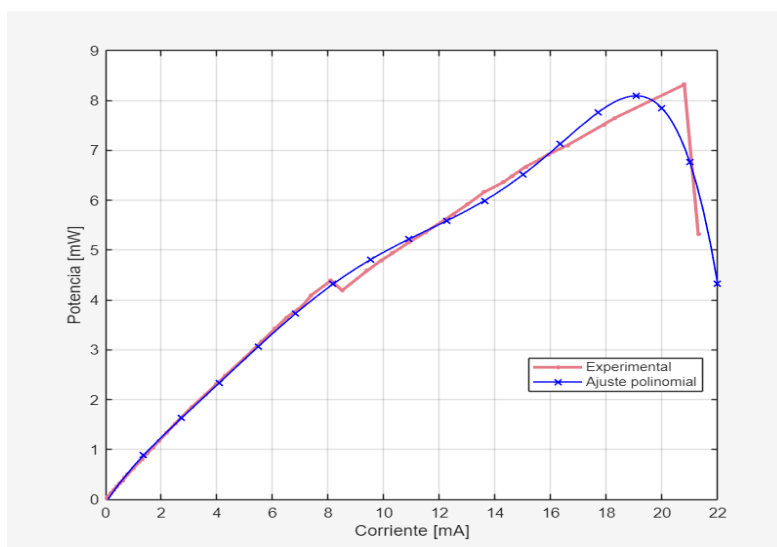


Figura 8. Curva de potencia a 23.5 °C.

La Figura 9 muestra la potencia entregada por la celda a una temperatura de operación de 46.6°C . Se percibe claramente un punto de máxima potencia bien definido alrededor de los 19 mA, donde la celda entrega aproximadamente 5 mW. La curva es suave y consistente, lo que indica un comportamiento estable de la celda a esta temperatura intermedia.

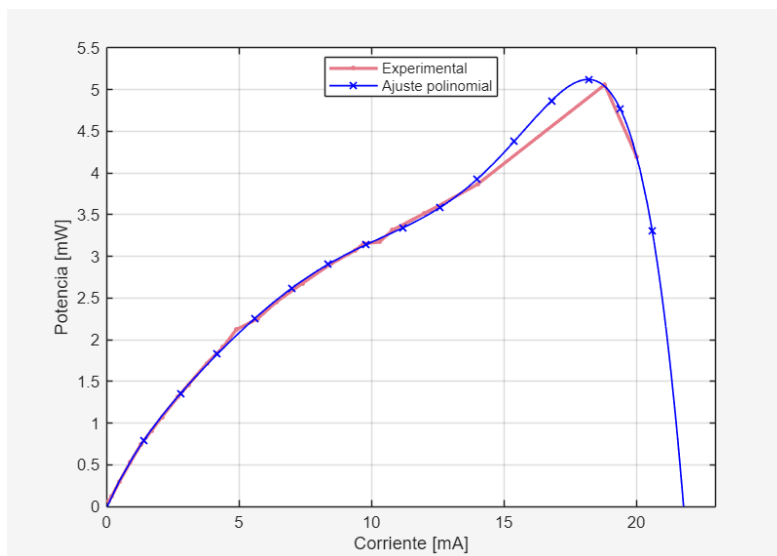


Figura 9. Curva de potencia a 46.6°C .

La potencia entregada por la celda de combustible operando a 57.7°C (ver Figura 10) muestra un punto donde la celda entrega la mayor cantidad de energía, ubicado aproximadamente en 1.3 mA con una potencia de 0.08 mW. La temperatura de operación (57.7°C) es un factor crucial que influye en la cinética de las reacciones electroquímicas y, por ende, en el rendimiento de la celda, que en este caso fue el menor de todos.

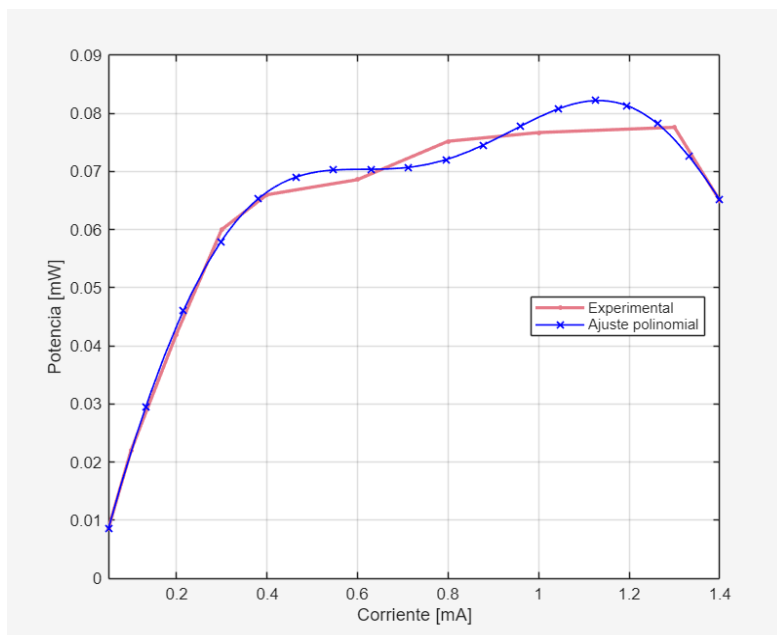


Figura 10. Curva de potencia a 57.5°C .

Conclusiones

El análisis de una celda de combustible tipo PEM didáctica, complementado con la elaboración y utilización de un banco de pruebas, ha proporcionado una comprensión sobre la tecnología de celdas de combustible de membrana de intercambio de protones. La experiencia de desarmar la celda permitió una inmersión directa en su estructura interna, revelando la disposición de componentes como la membrana, las capas de difusión de gas y las placas bipolares con sus canales de flujo. Esta observación práctica consolidó el entendimiento teórico previamente adquirido de cómo la geometría y el diseño de estos elementos son fundamentales para la eficiencia de la reacción electroquímica y el transporte de especies.

El proceso de registrar el voltaje de la celda a diferentes demandas de corriente y la posterior representación gráfica de estos datos resultó ser una metodología práctica para evaluar el rendimiento de la celda. Las curvas de polarización obtenidas permitieron identificar claramente las distintas regiones de pérdidas de voltaje, proporcionando una imagen de los factores que limitan la eficiencia de la celda bajo diversas condiciones de operación.

Este proyecto no solo cumplió con el objetivo de comprender la estructura interna de una celda PEM, sino que también brindó la experiencia práctica en la caracterización de su rendimiento. La capacidad de desarmar, comprender y luego evaluar una celda de combustible mediante la generación de curvas de polarización es fundamental para cualquier persona interesada en la investigación y el desarrollo de tecnologías de energía limpia. Este conocimiento sienta las bases para futuras exploraciones en la optimización de materiales, la mejora de diseños y la implementación práctica de las celdas de combustible como una fuente de energía sostenible y eficiente.

Referencias

- Bossel, U. (2007). *Fuel Cells: From Birth to Maturity* (Synthesis Lectures on Engineering Science, and Technology). Springer, 1-18. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-73256-4>.
- Godula-Jopek, A., & Stolten, D. (2015). *Hydrogen Production: by Electrolysis*. Wiley, 33-52. <https://doi.org/10.1002/9783527693390>
- Larminie, J. & Dicks, A. (2003). *Fuel Cell systems explained* (2nd ed.). Wiley, 2-6. <https://doi.org/10.1002/9781118878330>.
- Nafion. (2025). *Membranas Sulfónicas: Membranas de fundición por extrusión Nafion™*. <https://www.nafion.com/es/products/sulfonic-membranes>.
- Navarro, J. & Cuartas, B. (2017). *Cinética Química y Catálisis Vol. 1: Modelos cinéticos en sistemas*. Académica, 81-87. https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/74851bef-786f-460c-af55-8c2ffc3a040/TOC_6355_01_01.pdf?guest=true
- Wilkinson, D., P., Zhang, J., Hui, R., Fergus, J. & Li, X. (2010). *Proton Exchange Membranes Fuel Cells, Material Properties and Performance*. CRC Press Taylor & Francis Group, 107-129. <https://doi.org/10.1201/b10290>