



Análisis Experimental en una Celda de Combustible tipo PEM

Alexis Sánchez Angeles¹, Adrián Corona Muñiz¹, J. Luis Luviano Ortiz¹, Abel
Hernández Guerrero¹

¹Universidad de Guanajuato División de Ingenierías
Campus Irapuato-Salamanca

Resumen

En este trabajo se realiza un análisis de varianza a un procedimiento experimental realizado a una celda de combustible con placas difusivas con una geometría no convencional y una membrana comercial de intercambio protónico de Nafion® 117, con la finalidad de definir si las condiciones de experimentación permiten evaluar de manera satisfactoria el desempeño de la celda en una curva de polarización.

Introducción

El proyecto consiste en la realización de pruebas experimentales a una celda de combustible tipo PEM, en donde haciendo variar una carga resistiva conectada a la celda se obtienen voltajes y corrientes que permiten elaborar una curva de polarización y así establecer la máxima potencia eléctrica proporcionada por la celda. Para llevar a cabo cada uno de los experimentos se aseguró que las condiciones de operación y los materiales en cada prueba fueran constantes, garantizando que los resultados experimentales sean consistentes y replicables.



Garantizar la estabilidad en las condiciones de operación del experimento involucró en primer instancia mejorar la construcción y el ensamble de la celda, así como desarrollar mecanismos que permitieran ajustar las condiciones de operación empleadas. Una vez conectada la celda de combustible a la carga resistiva, tuvo lugar la instrumentación del experimento, en donde dos variables: el voltaje y la corriente fueron medidas y recopiladas. Por último, se realizó un análisis de varianza que permite identificar si los resultados de la experimentación son realmente significativos, y encontrar los posibles errores en la experimentación, que podrían ser corregidos en trabajos futuros.

Objetivos

Determinar la influencia de las condiciones de operación en las mediciones corriente-voltaje en una celda de combustible de intercambio protónico mediante un análisis de varianza (por sus siglas en inglés, ANOVA).

Justificación

En el mundo actual, un problema que ha tomado relevancia es la contaminación que producen los residuos de la combustión, específicamente en el campo de la transportación, lo cual incide directamente en el cambio climático. Energías alternativas tales como las celdas de combustible proporcionan un mecanismo eficiente y limpio para la conversión de energía.

Las celdas de combustible tipo PEM (Proton Membrane Exchange, por sus siglas en inglés) son los dispositivos más prometedores para las aplicaciones de transporte debido a su alta densidad de potencia, alta eficiencia, además de que el producto de reacción es únicamente agua y funcionan bajo condiciones de operación fácilmente reproducibles.

Existen ciertas condiciones que de no controlarse de manera adecuada provocarían que la alta eficiencia mencionada anteriormente no fuera satisfactoria, es por ello por lo que en este proyecto se busca encontrar condiciones de operación que permitan obtener resultados significativos al momento de comprobar el funcionamiento de una celda de combustible tipo PEM.



Metodología

A. Construcción y ensamble de la celda de combustible.

La celda de combustible tipo PEM utilizada en este trabajo tiene un área activa de 5 cm x 5 cm, por lo que a partir de esta dimensión se realiza el diseño del resto de los componentes. El ensamble membrana-electrodo que se utiliza es la membrana comercial Nafion® 117. La Figura 1 presenta los componentes para la construcción del prototipo. Para el diseño de los componentes se utilizó el software Inventor®.

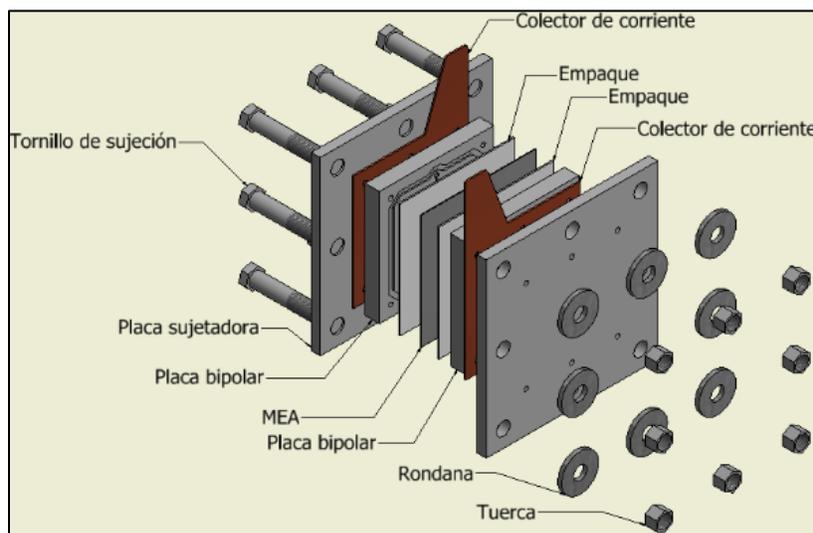


Figura 1. Ensamble de una celda de combustible tipo PEM.

Las placas bipolares son elementos clave en la celda. Estas placas se encargan del transporte de los electrones hacia el circuito externo, además de brindar soporte a la MEA (Membrane Electrode Assembly). En estas placas se maquinan los canales de flujo para la distribución uniforme de los gases reactantes. Para el lado del cátodo la geometría a utilizar es el serpentín para ayudar a desalojar el agua que se produce en la reacción, mientras que para el lado del ánodo se propone una geometría novedosa.

Existen dos etapas importantes durante el proceso de ensamblado: la alineación correcta de todos los componentes y ajustar el torque adecuado de los tornillos de sujeción. El primer paso es limpiar y preparar todos los elementos a utilizar. Después se coloca la placa sujetadora del ánodo con los tornillos de sujeción. Enseguida, se acoplan las guías de alineación sobre la placa sujetadora. La placa



de grafito se coloca con el campo de flujo boca arriba y se asegura un buen contacto con el colector de corriente. Subsecuentemente, se coloca el empaque. A continuación, se coloca la MEA, asegurando que el área activa esté en contacto con el campo de flujo, poniendo otro empaque igual al mencionado anteriormente. Se coloca la segunda placa de grafito boca abajo y se ejerce una ligera presión sobre el apilamiento. Después, el colector de corriente se pone en posición. Finalmente, se termina el ensamble colocando la segunda placa sujetadora. Todos los pasos anteriores se ilustran en la Figura 2.

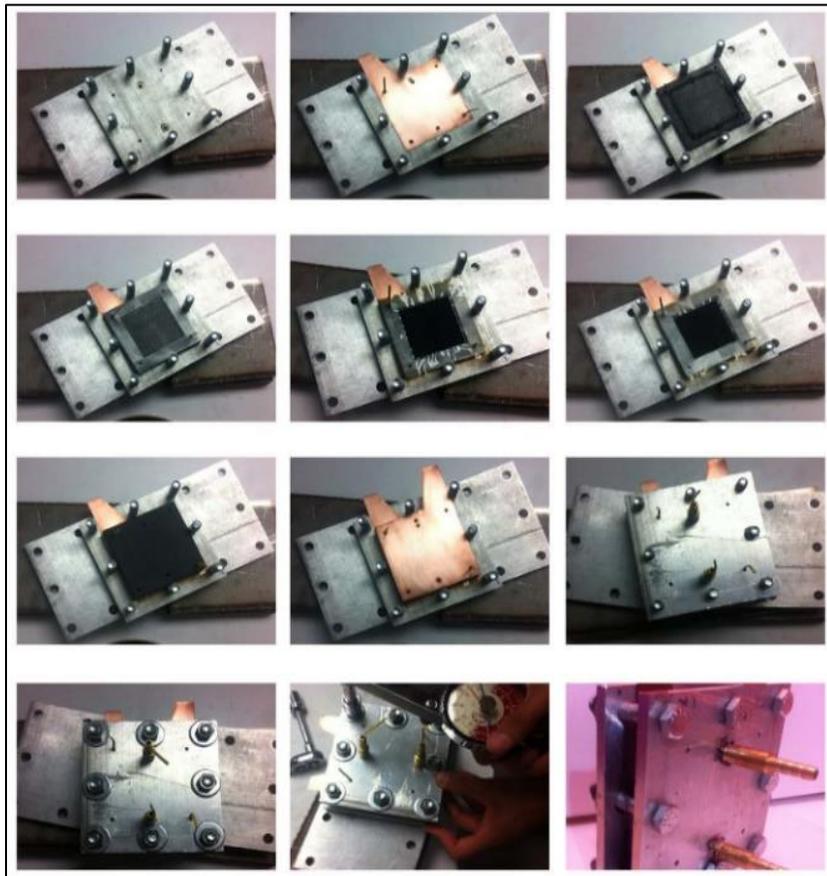


Figura 2. Ensamble del prototipo.

B. Ajuste de las condiciones de operación

Para llevar a cabo los diferentes experimentos es de vital importancia asegurarse que las condiciones de operación y los materiales en cada prueba sean constantes, para así asegurar que los resultados experimentales sean consistentes y replicables.



Las condiciones de operación se resumen de manera general en los siguientes puntos:

- Reactivo en el ánodo: Hidrógeno (H_2)
- Reactivo en el cátodo: Oxígeno (O_2)
- Características de operación de los reactivos:
 - Temperatura: 70 °C
 - Humedad: 55%
 - Presión en el ánodo: 0.141 psi
 - Presión en el cátodo: 0.177 psi

Resultados

De acuerdo con la metodología mencionada anteriormente, una vez conectada la celda de combustible a la carga resistiva y bajo las condiciones de operación ya mencionadas, se midieron y se registraron los valores de voltaje y corriente para 64 valores de carga electrónica que van desde 0.001 Ω hasta los 1.2 M Ω , realizando un total de 4 muestras para cada medición.

Con los valores medidos se obtuvo el valor numérico de la densidad de corriente para los 64 mediciones, las cuales se muestran en la Figura 3. Análogamente, en la Figura 4 se presentan valores de voltaje para los mismos valores de carga que en la Figura 3. En ambas figuras se muestra el promedio de las 4 muestras recabadas, además de la inclusión de las barras de error para considerar la variación entre sí de las mediciones que se realizaron.

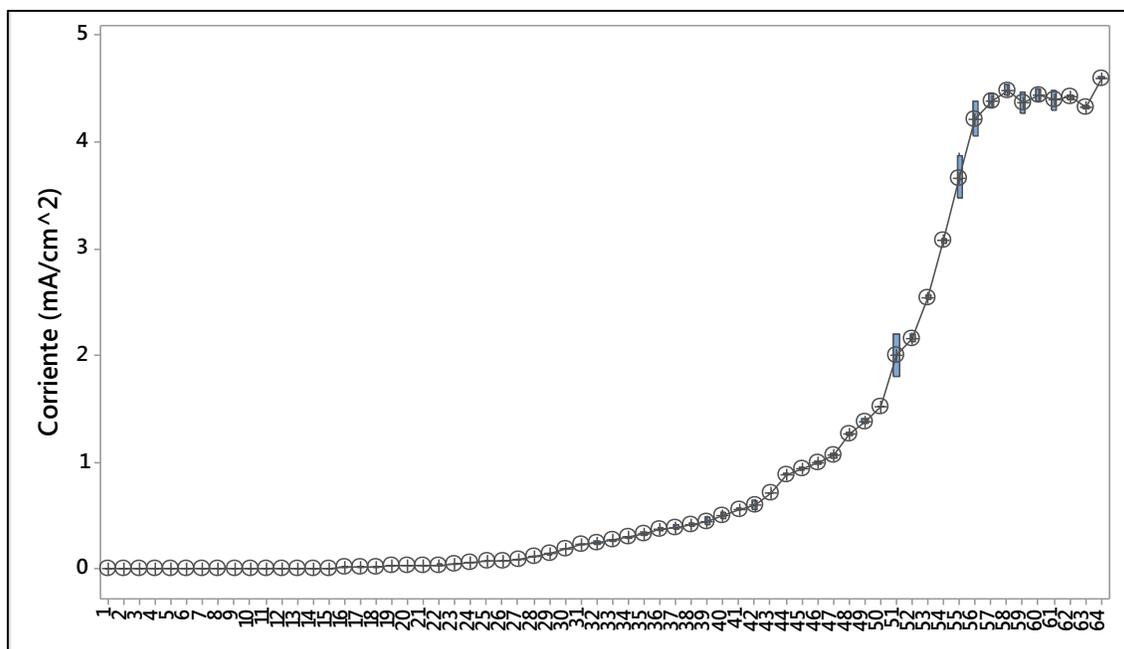


Figura 3. Gráfica de densidad de corriente.

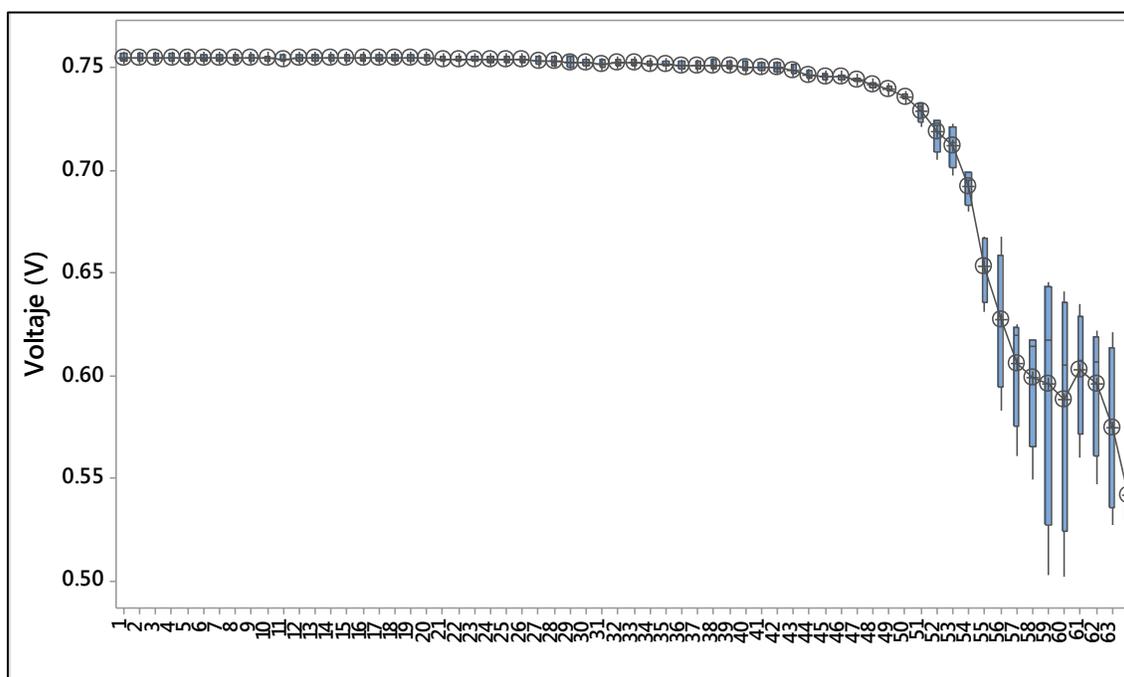


Figura 4. Gráfica de densidad de voltaje.

A. Tamaño de muestra

El primero punto consiste en garantizar que se tomaron la cantidad de muestras correctas, por lo que entonces mediante la ecuación (1) se calculará el tamaño de muestra adecuado que se debe utilizar para estos experimentos.



Al estar el tamaño de muestra en función de la desviación estándar, para este análisis se consideró la desviación estándar de las muestras de voltaje (Figura 5), debido a que resultaron ser mucho mayores que las calculadas en las muestras de corriente. Además, en esta investigación resulta más significativo estudiar la sección central de los datos, ya que como es posible percibir en la Figura 4, el error en los valores muestreados no es muy grande en comparación con el extremo derecho de la gráfica, tal como se confirma en la Figura 5, donde la varianza aumenta para dicha sección. De acuerdo con Montgomery, Runger y Medal (1996) la ecuación 1, se modela como sigue:

$$n = \left(\frac{\sigma \cdot Z_{1-\frac{\alpha}{2}}}{d} \right)^2 \quad (1)$$

donde:

n = tamaño de muestra

σ = desviación estándar

Z = valor extraído de la tabla de distribución normal

d = error estándar

Al examinar la parte izquierda de la gráfica de la Figura 5, se puede notar que dichos valores no dependen directamente de los instrumentos de medición ni del procedimiento realizado, por lo que para la desviación estándar se toma el promedio que existe a lo largo de las mediciones en el resto de la gráfica, la cual es en promedio 0.001. Luego, se considerará $d=0.001$, dado que las medidas se diferencian en 1 mV. Después, el valor de Z con $\alpha=0.05$ se busca en las tablas de distribución acumulativa normal estándar y de acuerdo con Montgomery et al. (1996), este valor quedaría en 1.96.

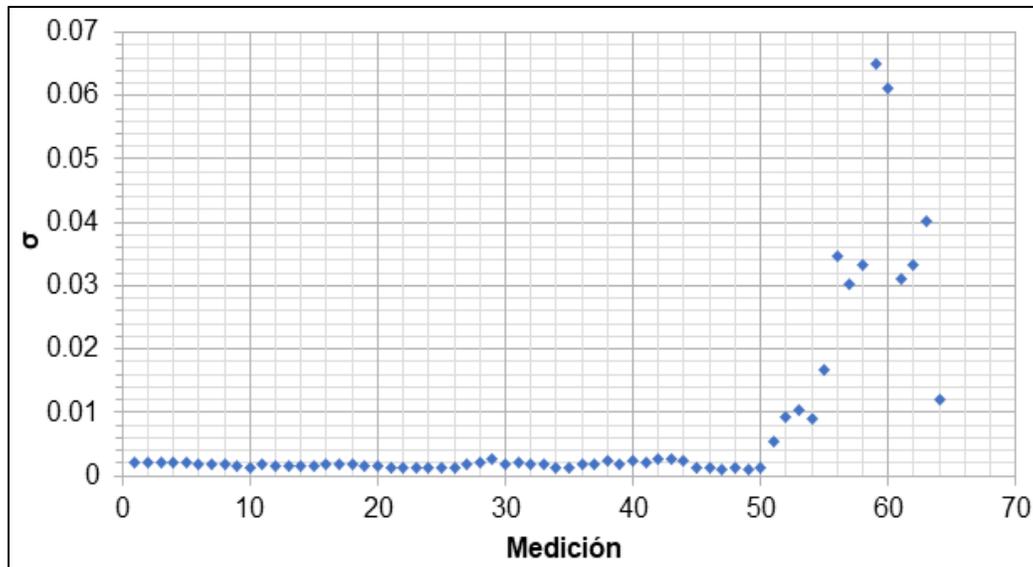


Figura 5. Gráfico de la Desviación estándar de las mediciones del Voltaje

Por último, sustituyendo los datos calculados en la ecuación (1) el valor de n queda cómo:

$$n = \left(\frac{0.001 \cdot 1.96}{0.001} \right)^2 = 3.98 \cong 4 \text{ numero de muestras}$$

Lo cual indica que fue correcto el número de experimentos realizados.

B. ANOVA

Para analizar los datos que surgen de las pruebas experimentales, tanto las mediciones de corriente como las de voltaje se deben someter a un análisis ANOVA para confirmar si los resultados obtenidos son válidos.

Las hipótesis del análisis de varianza para la densidad de corriente son las siguientes:

- H_0 : Todas las medias de las mediciones de la densidad de corriente son iguales.
- H_1 : Al menos una de las medias es diferente al resto.

Tabla 1. ANOVA de Corriente

Fuente de Variación	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor P
Factor	63	614.398	9.75235	3407.37	0.000
Error	192	0.550	0.00286		



Total 255 614.947

Como, $P < \alpha$, se rechaza H_0 y se acepta H_1 . Esto quiere decir que al menos una de las medias es diferente al resto.

Las hipótesis del análisis de varianza para el voltaje son las siguientes:

- H_0 : Todas las medias de las mediciones de voltaje son iguales.
- H_1 : Al menos una de las medias es diferente al resto.

Tabla 2. ANOVA de Voltaje

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Valor P
Factor	63	0.82673	0.013123	53.08	0.000
Error	192	0.04747	0.000247		
Total	255	0.87420			

Como $P < \alpha$, se rechaza H_0 y se acepta H_1 . Esto quiere decir que al menos una de las medias es diferente al resto.



C. Prueba Tukey

Con los resultados hasta aquí obtenidos se observa que existe una diferencia significativa entre las mediciones de corriente y de voltaje, sin embargo, en ciertas zonas de la gráficas de las Figuras 4 y 5, las mediciones permanecen constantes, por ello es necesario realizar un análisis estadístico extra que permita identificar que mediciones son las que realmente son diferentes, una herramienta estadística que nos permite determinar éste comportamiento es la prueba Tukey, la cual se muestra a continuación. En ambas pruebas, las muestras se agrupan con una letra, dichas mediciones no presentan una diferencia significativa mayor al 5%.

Comparación de medias Tukey para la Corriente.

Información agrupada usando el método Tukey y 95% Confiabilidad

Factor	N	Media	Grupo
64	4	4.60200	A
58	4	4.4880	A B
60	4	4.4400	B C
62	4	4.4200	B C
61	4	4.3920	B C
57	4	4.3880	B C
59	4	4.3700	B C D
63	4	4.32600	C D
56	4	4.2200	D
55	4	3.667	E
54	4	3.0740	F
53	4	2.5460	G
52	4	2.1640	H
51	4	2.002	I
50	4	1.52200	J
49	4	1.3860	J K
48	4	1.2680	K
47	4	1.0644	L
46	4	0.9998	L M
45	4	0.93780	L M
44	4	0.88840	M
43	4	0.71640	N
42	4	0.6040	N O
41	4	0.56140	N O P
40	4	0.5018	O P Q
39	4	0.4514	O P Q R
38	4	0.4176	P Q R S
37	4	0.3944	Q R S T
36	4	0.37240	Q R S T U
35	4	0.33040	R S T U V
34	4	0.29860	R S T U V W
33	4	0.27220	S T U V W X
32	4	0.24760	T U V W X Y
31	4	0.236200	U V W X Y Z
30	4	0.189200	V W X Y Z AA
29	4	0.14240	W X Y Z AA AB
28	4	0.115200	X Y Z AA AB
27	4	0.096600	Y Z AA AB
26	4	0.083600	Z AA AB
25	4	0.073800	AA AB
24	4	0.058000	AA AB
23	4	0.04920	AA AB
22	4	0.041800	AA AB
21	4	0.03720	AA AB



20	4	0.032400	AA	AB
19	4	0.02960		AB
18	4	0.02480		AB
17	4	0.01960		AB
16	4	0.01480		AB
15	4	0.01200		AB
14	4	0.008400		AB
13	4	0.006800		AB
12	4	0.005200		AB
11	4	0.004400		AB
10	4	0.004000		AB
9	4	0.002800		AB
8	4	0.002000		AB
7	4	0.001200		AB
6	4	0.001000		AB
5	4	0.000600		AB
4	4	0.000600		AB
3	4	0.000400		AB
2	4	0.000400		AB
1	4	0.000000		AB

Comparación de medias Tukey para el Voltaje

Información agrupada usando el método Tukey y 95% Confiabilidad

Factor	N	Media	Grupo
4	4	0.75525	A
3	4	0.75525	A
2	4	0.75525	A
20	4	0.755000	A
19	4	0.755000	A
15	4	0.755000	A
14	4	0.755000	A
13	4	0.755000	A
12	4	0.755000	A
9	4	0.755000	A
5	4	0.75500	A
1	4	0.75500	A
18	4	0.754750	A
17	4	0.754750	A
16	4	0.754750	A
10	4	0.754750	A
8	4	0.754750	A
7	4	0.754750	A
6	4	0.754750	A
11	4	0.754500	A
23	4	0.754250	A
22	4	0.754250	A
21	4	0.754250	A
26	4	0.754000	A
25	4	0.754000	A
24	4	0.754000	A
27	4	0.753750	A
28	4	0.75325	A
29	4	0.75300	A
30	4	0.752750	A
33	4	0.752500	A
32	4	0.752500	A
31	4	0.75225	A
35	4	0.752000	A
34	4	0.752000	A
37	4	0.751500	A
36	4	0.751500	A
38	4	0.75150	A
39	4	0.751250	A
41	4	0.75075	A
40	4	0.75075	A
42	4	0.75025	A
43	4	0.74925	A
44	4	0.74675	A



45	4	0.746000	A
46	4	0.745750	A
47	4	0.744250	A
48	4	0.742000	A
49	4	0.740000	A
50	4	0.736000	A B
51	4	0.72925	A B
52	4	0.71875	A B
53	4	0.71200	A B
54	4	0.69250	B C
55	4	0.65350	C D
56	4	0.6272	D E
57	4	0.6062	E F
61	4	0.6025	E F
58	4	0.5990	E F
59	4	0.5960	E F
62	4	0.5958	E F
60	4	0.5882	E F G
63	4	0.5745	F G
64	4	0.54200	G

D. Puntos de mayor voltaje y potencia

La mayor capacidad de la celda se puede encontrar en 2 puntos, el primero es cuando se obtiene el mayor voltaje, el segundo cuando se consigue la mayor potencia de operación. En la Figura 5, se muestra el gráfico de Densidad de Corriente vs Voltaje junto con una regresión polinomial de la curva generada. En la Figura 6, se muestra el gráfico de Densidad de Corriente vs Densidad de Potencia, junto con una regresión polinomial de la curva generada. A las curvas mostradas en las Figuras 6 y 7 se les conocen como curvas de polarización y servirán para identificar cuáles son los puntos máximos para el voltaje y la potencia.

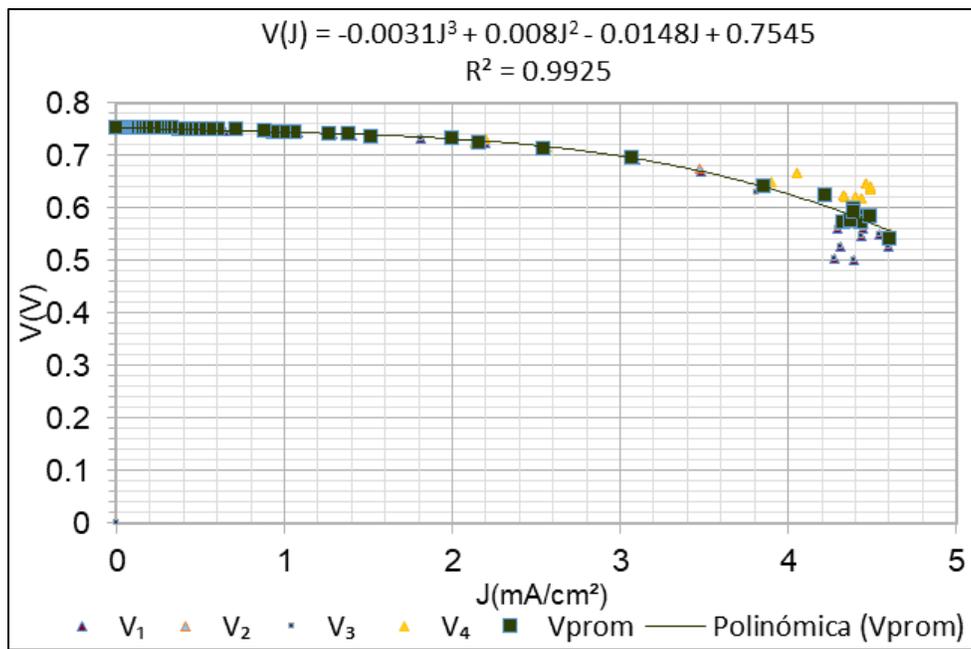


Figura 6. Curva de Polarización Densidad de Corriente vs Voltaje.

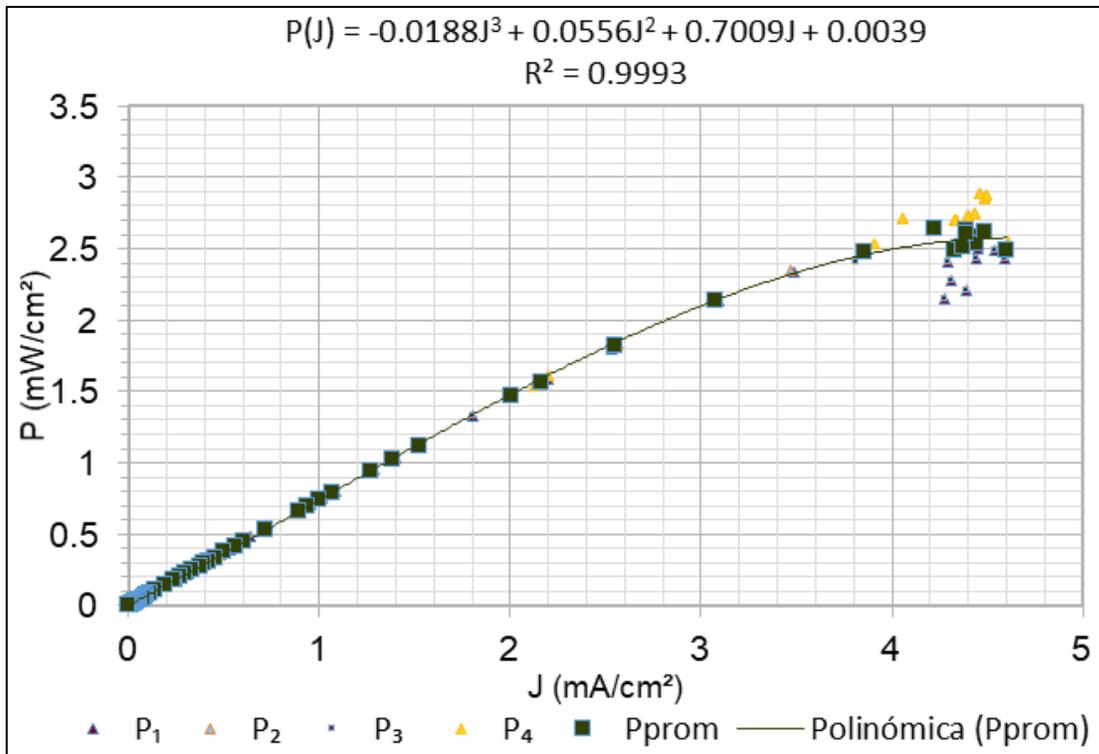


Figura 7. Curva de Polarización Densidad de Corriente vs Densidad de Potencia.

Conclusiones

El análisis ANOVA y la prueba Tukey permitieron identificar qué puntos se vuelven más significativos al momento de medir la corriente y el voltaje, pues ratificó en que cargas electrónicas existen cambios más significativos. En este caso, para las mediciones 1 a 23 no existen variaciones que permitan ver cambios en la estructura tanto de la corriente como el voltaje, la carga electrónica que se aplicó en esa sección corresponde a valores mayores que 400 Ω . La zona más significativa, es decir, donde existe un mayor cambio con respecto al punto anterior, de acuerdo con el análisis ANOVA, corresponde a las mediciones con cargas que varían entre los 0.4 Ω y los 400 Ω (mediciones 23 a 54). Asimismo se distinguió que para cargas muy pequeñas se vuelve más compleja la medición de los 2 parámetros pues hasta la más mínima variación de flujo altera significativamente los resultados.

Además, de acuerdo con la Figura 6 se determinó que el punto de mayor potencial de la celda para las condiciones de operación bajo las cuales se trabajó fue para una carga de 1 Ω , pues para esa carga electrónica se obtuvo un valor de densidad

Vol. 6 (2019) 7º Encuentro de Jóvenes Investigadores



de potencia de 2.639 mW/cm^2 . Asimismo, se comprobó que para cargas muy pequeñas, se encuentran los valores más altos de potencia, mientras que cuando se tienen cargas muy grandes, los valores de potencia disminuyen, mientras que los de voltaje aumentan.

Se recomienda que para experimentos futuros se debe utilizar un voltímetro de mayor precisión pues en ciertas zonas la variación entre una medida y otra fue prácticamente nula, de igual manera se aconseja mejorar el control del flujo que existe en los experimentos para así disminuir la variación con las cargas resistivas de menor valor.

Referencias

- [1] Wang B et al., Investigation of the effect of humidity at both electrode on the performance of PEMFC using orthogonal test method, *International Journal of Hydrogen Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.139>
- [2] Yin L, et al., Experimental analysis of optimal performance for a 5 kW PEMFC system, *International Journal of Hydrogen Energy* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.157>
- [3] Andronie, A., Stamatina, I., Girleanu, V., Ionescu, V., & Buzbuchi, N. (2019, 5 marzo). Experimental Study of a PEMFC System with Different Dimensions of the Serpentine Type Channels from Bipolar Plate Flow Field. *Mechanika*, 25(1), 11–16.
- [4] Montgomery, D. C., Runger, G. C., & Medal, E. G. U. (1996). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. México DF, México: McGraw-Hill.