

SELLOS PARA PEMFC: ANÁLISIS DE COMPROMISOS Y PRUEBAS DE OPTIMIZACIÓN DE SU ESPESOR

Félix Loyola Morales^{1*}, Ulises Cano Castillo¹, I. Lorena Albarrán Sánchez¹

¹ Instituto de Investigaciones Eléctricas. Calle Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos C. P. 62490

* Tel (777) 362-38 11, ext. 7798, Fax (777) 362-3881, ext. 7781, felix.loyola@iie.org.mx

RESUMEN

El sello, es un componente crucial para el buen desempeño de las PEMFC, sin embargo, en la mayoría de las veces este componente no recibe la atención necesaria durante las etapas de diseño, dimensionamiento y construcción de celdas de combustible. En el presente trabajo, se llevó a cabo un análisis de los compromisos que se generan en el sistema “celda de combustible” relacionados con el sello. Algunos de los aspectos discutidos fueron: espesor, características físicas y químicas, contacto eléctrico, protección de estructura porosa de difusor y capa catalítica, invasión de canales de alimentación de gas y sellado. Además, se llevaron a cabo pruebas experimentales para evaluar calidad de contacto eléctrico y deformación de componentes porosos (difusor y capa catalítica) basado en la resistencia óhmica del sistema determinada a partir de pruebas de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) a circuito abierto. Adicionalmente se hicieron pruebas para optimizar el espesor de sello para un caso real de celda de combustible en el que se evaluó la efectividad del sellado y la resistencia óhmica del sistema como medida de control. Los resultados mostraron que la deformación requerida en los componentes porosos para alcanzar un buen contacto eléctrico se encuentra entre 18 y 28 %. Este valor es de suma importancia para determinar el espesor óptimo de sello en función de sus propiedades mecánicas como son su deformación en función de una presión aplicada. Para el caso estudiado, el espesor de sello óptimo en el que se garantizó un buen contacto eléctrico y al mismo tiempo el sellado total del sistema, se encontró entre 0.348 y 0.373 mm.

1.- Introducción

Los materiales encargados de mantener a los gases hidrógeno y oxígeno (o aire) contenidos en su compartimento, así como evitar la mezcla física de estos en una celda o conjunto de celdas combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC, por sus siglas en inglés: Proton Exchange Membrane Fuel Cell) reciben el nombre de sellos o empaques, sin embargo, si analizamos con un poco más de detalle, encontraremos que además de “sellar”, estos materiales tienen muchas más funciones y juegan un papel importantísimo en el desempeño de una celda de combustible: forman parte de la estructura de un conjunto de celdas, su espesor y propiedades mecánicas se relaciona directamente con el grado de contacto eléctrico que hay entre los componentes internos, resguarda la integridad física de los componentes porosos, sus propiedades fisicoquímicas podrían determinar la vida útil de la celda, entre otras. Estas particularidades están íntimamente relacionadas, por lo que la modificación de alguna de ellas afecta a las demás generando así compromisos inherentes. En este trabajo se presenta un análisis de dichos compromisos, en el que se involucran aspectos como espesor, características físicas y químicas, contacto eléctrico, protección de estructura porosa de difusor y capa catalítica, invasión de canales de alimentación de gas y sellado. Además, se presentan resultados de pruebas experimentales llevadas a cabo para evaluar calidad de contacto eléctrico y deformación de componentes porosos (difusor y capa catalítica) basado en la resistencia óhmica del sistema. Adicionalmente se hicieron pruebas para optimizar el espesor de sello para un caso real de celda de combustible en el que se evaluó la efectividad del sellado y la resistencia óhmica del sistema como medida de control.

2.- Análisis de compromisos

Uno de los principales compromisos que se da en el sistema celda de combustible relacionado con los sellos, y quizá el más complejo, es el que involucra el espesor de éstos con: calidad de contacto eléctrico, sellado e integridad de la estructura de los componentes porosos. Para visualizarlos, planteemos los siguientes casos extremos, en los que para una mayor claridad, se considerará que los sellos son incompresibles y nos basaremos en el esquema mostrado en la figura 1:

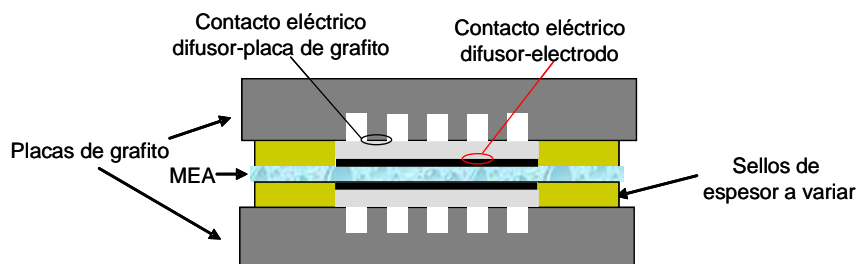


Figura 1. Componentes típicos de una celda de combustible tipo PEM

2.1 Sello grueso

Al tener un sello de espesor mayor a la suma de los espesores de la capa catalítica (CL) y de difusor (DL), se garantiza el sellado y se protege físicamente la estructura porosa de CL y DL, sin embargo, en esta condición la placa de grafito (BBP) se aleja del difusor y si el difusor a su vez no se encuentra adherido a la capa catalítica, estos componentes también se separarán; teniendo como resultado un contacto eléctrico deficiente en las interfaces BBP-DL y DL-CL. Visto este efecto en la curva de polarización de una celda (característica de su desempeño), en la que podemos identificar tres zonas de caída de voltaje relacionadas con pérdidas por activación, óhmicas y resistencia al transporte de masa (figura 2) [1,2], tendríamos que el desempeño de la celda se verá mermado como resultado de la alta resistencia óhmica del sistema. Dicho de otra manera, aún cuando el sistema se encuentre en óptimas condiciones como: membrana 100 % hidratada, sin inundación, gases puros (H_2/O_2) y presurizados, cargas de Pt en catalizador elevadas, etc. el sistema mostrará un bajo desempeño (figura 3a).

2.2 Sello delgado

En el caso opuesto, en el que se tiene un sello con espesor mucho menor que la suma de los espesores de CL y DL (en más de 30 %), al ensamblar la celda, los materiales porosos sufrirán una compresión que se traducirá en una deformación de al menos el porcentaje en que el sello es menor que CL y DL. Tendremos como resultado un excelente contacto eléctrico (resistencia óhmica mínima), sin embargo, la deformación excesiva CL y DL tendrá como consecuencia la destrucción de la estructura porosa de los mismos, situación que afectará directamente el desempeño de la celda por problemas de transporte de masa

(Figura 3b). Es decir, la estructura porosa destruida limitará el paso de los gases reactivos desde los canales de distribución de gas hasta las zonas reactivas ubicadas en el cuerpo de la capa catalítica. Todo esto, bajo el supuesto de que fue posible sellar la celda y superó las pruebas neumáticas para detectar fugas; situación que se complica al incrementar el porcentaje en que el espesor de sello es menor respecto a la suma de CL y DL.

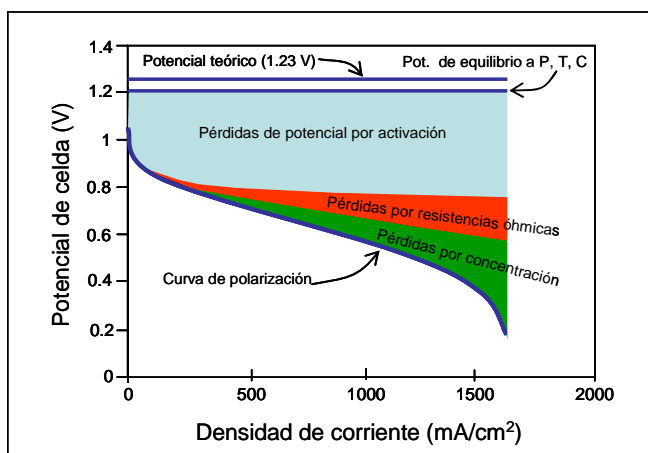


Figura 2. Curva de polarización típica de una celda de combustible tipo PEM

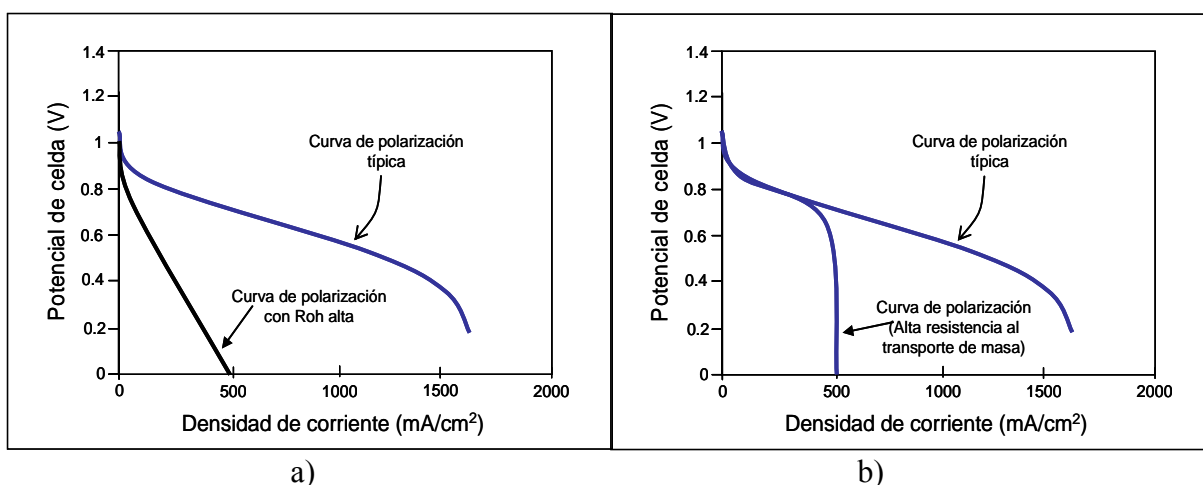


Figura 3. a) Representación del efecto de una alta resistencia óhmica en la curva de polarización de una celda de combustible tipo PEM. b) Representación del efecto de una alta resistencia al transporte de masa.

2.3 Propiedades fisicoquímicas

Un sello o empaque (junta), se define como un material deformable fijado entre dos superficies esencialmente estacionarias para prevenir el paso de material a través de una abertura o unión [3]. Por lo tanto, para que un material se considere como sello, este debe ser capaz de sufrir una deformación mínima que permita cubrir las imperfecciones de la superficie del material con que se pondrá en contacto; en las celdas de combustible tipo PEM, estos materiales típicamente son placa de grafito, en un caso, y membrana de intercambio protónico en el otro. En el mercado existen diversos materiales que se usan como sellos o empaques (tabla 1), sin embargo, no todos ellos cumplen con las características fisicoquímicas necesarias para usarse en las celdas de combustible tipo PEM, en donde son expuestos a ambientes ácidos, gases húmedos como hidrógeno y oxígeno, temperaturas alrededor de 80 °C y refrigerantes líquidos, además de estar sujetos a compresión de manera permanente. El U. S. Fuel Cell Council (USFCC), recomienda una serie de pruebas estándar que deben practicarse a los materiales candidatos para determinar sus propiedades fisicoquímicas así los cambios que estas sufren como resultado del añejamiento [3,4] Los materiales más comunes usados en las celdas de combustible han sido: “Teflon®”, “Silicone Rubber”, “EPDM Rubber”, “Mylar” laminado y Fluoroelastómeros [4, 5]. En general, los silicones son los materiales más atractivos por su bajo costo y fácil preparación [6].

Además de cumplir con las propiedades químicas requeridas en un material para seleccionarlo como sello, las propiedades mecánicas son otro factor crucial. En este campo, el desempeño óptimo del sello, depende de diversas variables, sin embargo, conocer la capacidad de un material para recuperar su forma original después de haber sido sometido a una compresión o “grado de resiliencia” (Compression Set) y la fuerza necesaria para deformarlo en un porcentaje determinado respecto a su tamaño original (Compression Deflection), es crucial para definir el material que constituirá al sello [8]. La evaluación de estas propiedades mecánicas de los materiales, se basa en pruebas estandarizadas ASTM: “Compression Set” y “Compression Deflection” respectivamente [9, 10]. Un material con un alto grado de resiliencia, podrá usarse como sello múltiples veces o someterse a ciclos de compresión y relajación; en nuestro caso, las PEMFC son sistemas que típicamente sólo

se comprimen una vez y se mantienen así por periodos largos (todo su tiempo de vida), por lo que en este caso podría no ser tan crucial que el sello tuviera un porcentaje de recuperación cercano a 100 para proporcionar un sello efectivo. A menos que se encuentre en etapa de pruebas experimentales, en el que el armado y desarmado de celdas es cotidiano. Por otro lado, si no se considera el grado de deformación de un material al ser sometido a compresión (Compression Deflection), podría padecerse un problema de invasión de canales de flujo de gas por parte del material, principalmente de entradas y salidas; esto aplica para el caso en que se selecciona uno con alto grado de deformación (figura 4).

Tabla 1. Materiales usados como sellos o empaques disponibles en el mercado¹ [7]

Virgin Teflon® Sheets-Rods-Tubing	EPDM Rubber
Flexible Graphite	EPDM - White - Food Grade
Silicone Sponge	Nitrile/Buna N
Silicone Rubber	Butyl
Silicone Rubber-Fiberglass Reinforced	Nitrile - White - Food Grade
Neoprene	Neoprene - White - Food Grade
Red Rubber	Natural Gum Rubber
Wire Inserted Red Rubber	Urethane
Cork & Neoprene®	Rubber Diaphragm-Polyester Inserted
Vegetable Fiber	Neoprene Duck Inserted
Cork & Rubber	Neoprene Nylon Inserted
Fiber Cork Sheet	EPDM - Nylon Inserted Diaphragm
Plain Cork	Nitrile Nylon Inserted
Cork & Nitrile (Buna N)	Neoprene® Cloth Inserted
Fiberglass Cloth - HTPLAIN	Hi-Temp. Compressed NBR-BINDER
Fiberglass Tacky Cloth Style - Carded	Hi-Temp. Compressed Wire Inserted
Glass Friction Cloth (Non-Metallic)	Hi-Temp. Sheeting - SBR - Binder
Cloth Inserted Rubber	Carbon Fiber Gasket - Super Steam
Vinyl Seal	Closed Cell Sponge
Hypalon®	Viton® (Fluoroelastomer)
Mylar laminated	Fluoroelastomer

¹ Los nombres de los materiales enlistados en la tabla 1, se presentan con su nombre original en el idioma inglés para facilitar su identificación con el manejo en el mercado.

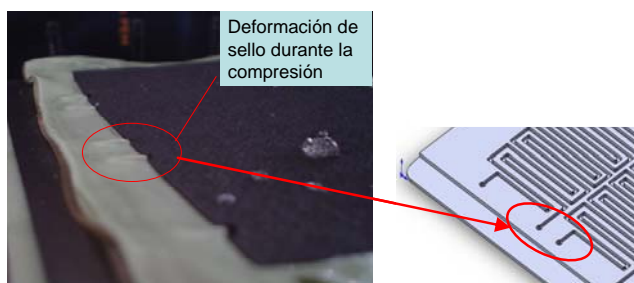


Figura 4. Deformación de sello durante el ensamblado de celda

3. Experimental

3.1. Evaluación de resistencia de contacto eléctrico

Para evaluar la resistencia de contacto eléctrico en la interfaz BPP-DL y DL-CL en función de su deformación, se emplearon como “sellos”² hojas de poliéster con espesores de 0.34, 0.29 y 0.254 mm (tabla 2), que en principio se consideran indeformables al comprimirlos a las presiones de estudio. Como referencia, los espesores de DL y CL medidos experimentalmente son de 0.33 y 0.0243 mm, respectivamente, que sumados resulta: 0.354 mm. La monocelda utilizada para este estudio fue de 25 cm² de área activa geométrica. Los difusores fueron de papel de carbón con capa microporosa GDL-30-BC de la marca SGL, los cuales se sustituyeron por nuevos en cada prueba. El ensamble membrana electrodo fue fabricado en el Laboratorio de Celdas de Combustible del IIE, el cual se mantuvo en un depósito de agua desionizada previo a cada prueba para mantenerlo completamente hidratado. Se emplearon placas de grafito con espesor de 4mm y campo de flujo en serpentin simple. Las placas colectoras fueron de cobre, las cuales fueron pulidas previo a cada prueba. Una vez ensamblada la monocelda, se iniciaron las mediciones de resistencia óhmica total del sistema a cada torque aplicado en incrementos de 0.58 m kg_f (5 in lb_f). El intervalo de torque estudiado fue de 0.58 a 4.03 m kg_f (de 5 a 35 in lb_f). Las determinaciones de resistencia óhmica se llevaron a cabo a partir de mediciones de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) a altas frecuencias. Las pruebas EIS se hicieron mediante el uso de un analizador de respuesta de frecuencia Solartron 1260

² El uso de comillas en la palabra “sello” indica que el material sólo proporciona el espesor correspondiente al sello real, pero no necesariamente funciona como tal.

acoplado a un potenciómetro Solartron 1287. El intervalo de frecuencia utilizado fue de 10 a 1000 Hz y la amplitud de señal aplicada fue de 10 mV. Los valores de resistencia óhmica total (R_i) obtenidos a partir de esta técnica correspondieron a la suma de la resistencia iónica ($R_{i,i}$), la electrónica ($R_{i,e}$) y la de contacto eléctrico ($R_{i,c}$). De estas, la resistencia iónica depende del nivel de hidratación del sistema, la eléctrica depende de las propiedades de conducción eléctrica de los materiales seleccionados y la de contacto eléctrico depende del grado de contacto íntimo que se alcanza entre las interfaces BPP-DL y DL-CL. Algunas consideraciones hechas en esta sección fueron las siguientes:

- Los “sellos” de poliéster son indeformables en su espesor en el intervalo de torque estudiado, por lo que la distancia entre la superficie de la membrana y la de la placa de grafito que se alcanza al mayor torque estudiado corresponde a la del espesor de “sello” de poliéster.
- Al incrementar el torque en cada prueba, el difusor y capa catalítica sufren deformación parcial. Por lo que el valor de la suma de sus espesores al mayor torque aplicado corresponde al “del sello” de poliéster.
- El valor de $R_{i,e}$ y el de $R_{i,i}$ a lo largo de las pruebas permanece constante, por lo que la variación del R_i en estas mismas es resultado exclusivamente de la variación de $R_{i,c}$.

Tabla 2. Espesores de “sello” de poliéster y valores de deformación esperada de DL y CL.

	<i>Espesor de sello</i>	<i>Deformación esperada de DL y CL</i>	<i>Deformación esperada de DL y CL</i>
Casos	(mm)	(mm)	(%)
1	0.340	0.0143	4.04
2	0.290	0.0643	18.15
3	0.254	0.1003	28.31

3.2 Determinación experimental de espesor de sello

Para las pruebas de determinación de espesor óptimo de sello para un caso real, se fabricaron 4 sellos de diferentes espesores (tabla 3) de “Silicone Rubber” de la marca Dow Corning. Tomando como referencia el resultado de la suma de los espesores de CL y DL, que para este caso fue de 0.391 mm (CL = 0.078 y DL = 0.313), el espesor de sello del

caso 1 es mayor a este, el del caso 2 es prácticamente igual y los de los casos 3 y 4 son menores; esta relación de espesores de cada sello con el de CL+DL, se ve reflejada en las columnas de “deformación mínima esperada de DL y CL” de la tabla 3, donde el uso de un signo negativo significa que el espesor de sello es mayor al de CL+DL antes de la compresión y por lo tanto, el dato de deformación citado corresponde a la deformación inicial que tendría que ocurrirle al sello para igualar el espesor de CL+DL e iniciar el primer contacto eléctrico.

Tabla 3. Espesores de sellos fabricados y valores de deformación esperada de DL y CL.

	<i>Espesor de sello</i>	<i>Deformación mínima esperada de DL y CL</i>	<i>Deformación mínima esperada de DL y CL</i>
Casos	(mm)	(mm)	(%)
1	0.433	-0.0418	-10.7
2	0.398	-0.007	-1.8
3	0.373	0.018	4.6
4	0.348	0.043	11.6

La monocelda utilizada para este estudio fue de 50 cm^2 de área activa geométrica. Los difusores fueron de papel de carbón con capa microporosa GDL-35-BC de la marca SGL, los cuales se sustituyeron por nuevos en cada prueba. El ensamble membrana electrodo fue también fabricado en el Laboratorio de Celdas de Combustible del IIE. El resto de la preparación de los componentes y condiciones experimentales de las pruebas, así como la consideración citada en el inciso c, fueron iguales a las descritas en el punto 3.1 de esta misma sección, excepto el intervalo de torque aplicado, que debido al cambio de área activa geométrica y número de tornillos utilizados para el ensamblado, se ajustó a $0.58\text{-}2.02 \text{ kg}_f \text{ m}$ ($5\text{-}17.5 \text{ lb}_f \text{ in}$).

Además de evaluar el contacto eléctrico al incrementar el torque en cada caso, se evaluó la efectividad del sellado. Esto se realizó mediante una prueba neumática de cruce y fugas de gas estableciendo un ΔP de $0.422 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ ($6 \text{ lb}_f/\text{in}^2$) entre compartimentos de ánodo y cátodo.

4. Resultados

4.1. Evaluación de resistencia de contacto eléctrico

En la figura 5a se muestran los resultados de las mediciones de resistencia óhmica total (R_i) en función del torque aplicado para los tres casos de espesor de “sello” estudiados (datos concentrados en la tabla 4). En esta, se puede observar que el “sello” de espesor de 0.34 mm (caso 1) ofrece la mayor R_i (relacionada con la resistencia de contacto eléctrico) en comparación con los otros. Aún cuando el valor de R_i para este mismo caso va disminuyendo al incrementar el torque, este sólo alcanza un valor de 7 ohm cm² a torque de 4.03 kg_f m; condición en la que CL+DL se han deformado un 4 % en total. Este valor de R_i es significativamente alto en comparación con los que se observan típicamente en una monocelda que tiene un buen contacto eléctrico (entre 0.3 y 0.6 ohm cm²). Por otra parte, los casos 2 y 3 mostraron menor resistencia óhmica total que el caso 1 desde el inicio de la prueba (figura 5a y 5b). A la misma condición de torque de 4.03 kg_f m, donde para el caso 2 CL+DL se había deformado un 18 %, la R_i disminuyó hasta un valor de 1.25 ohm cm² y en el caso 3, hasta 0.6 ohm-cm²; donde CL+DL se había deformado un 28.3 %. Como se puede ver, sólo en el caso de espesor de 0.254 se alcanzaron valores de R_i cercanos a los valores típicos. Si bien es cierto que este valor de resistencia óhmica total alcanzado de 0.6 ohm-cm² se encuentra en el límite superior del intervalo de valores típicos, lo que haría suponer que aún es posible disminuirlo, éste espesor de sello se le puede considerar como un valor seguro para garantizar la estructura de los materiales porosos involucrados en el sistema como son difusor y capa catalítica.

Tabla 4. Resistencia óhmica en función del torque aplicado para tres diferentes casos de espesor de “sello”.

Torque (kg _f m)	Espesor de “sello” (mm)		
	0.34	0.29	0.254
	Resistencia (Ohm cm ²)		
0.58	18.15	2.00	1.70
1.15	17.52	1.95	1.17
1.73	16.50	1.53	1.02
2.30	15.25	1.42	0.78
2.88	13.25	1.74	0.72
3.46	11.00	1.25	0.65
4.03	7.00	1.25	0.60

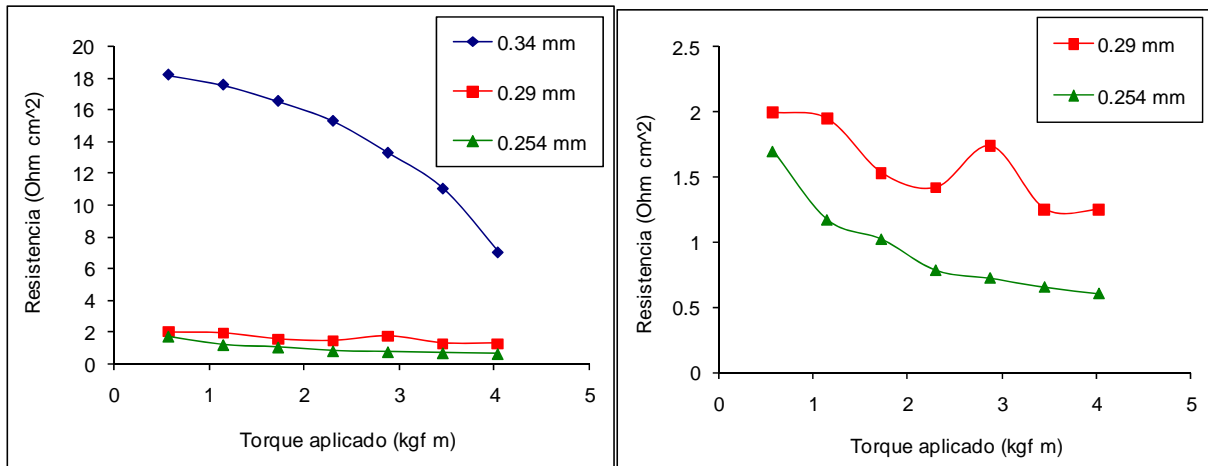


Figura 5. a) Resistencia óhmica total del los casos estudiados a diferentes torques. b) Acercamiento de los resultados obtenidos para espesores de 0.29 y 0.254 mm de “sello”.

4.2 Determinación experimental de espesor de sello

Es importante señalar, que a diferencia del caso analizado antes, en donde los “sellos” se consideraron incompresibles por el tipo de material empleado, en éste, donde el material utilizado fue “Silicone Rubber”, los sellos sí presentarán un grado de deformación al ser sometidos a una compresión. Por lo que, los datos de deformación mínima esperada citados en la tabla 3 necesitan una interpretación diferente: los que se acompañan con un signo negativo, indican que ese valor o porcentaje es el mínimo que se deberán deformar los sellos para iniciar el contacto eléctrico con CL y DL y que podría continuar su deformación aún después de ello si el torque siguiera incrementando; existiendo la posibilidad de obtener un sellado efectivo desde prácticamente el inicio de su deformación. Por otra parte, los positivos, indican que ese valor en *mm* o porcentaje de deformación esperada, es el mínimo que CL+DL deberán deformarse para alcanzar al espesor de sello, sin que exista posibilidad de sellado efectivo hasta antes de esta condición; una vez alcanzada, inician las posibilidades de sellado efectivo en algún punto de la deformación del sello. Los resultados obtenidos en este estudio, mostraron que espesores de sello de 0.433, 0.398 y 0.373 *mm*, tuvieron un sellado efectivo desde el primer valor de torque aplicado (0.58 *kgf m*) y sólo el espesor de 0.348 *mm* mostró cruce de gas en los primeros valores de torque de 0.58 y 0.86

$kg_f m$ de 5 y 2 mL/min , respectivamente, y fuga externa de 1 mL/min en el primer valor de torque; posterior a estos torques, se obtuvo un sellado efectivo (tabla 5). Por otra parte, la evaluación de contacto eléctrico en función del torque (figura 6), mostró que aún cuando el sello de espesor de 0.433 mm presentó sellado efectivo en el intervalo de torque estudiado, este era aún demasiado grueso para la celda, pues el valor inicial de R_i a torque de 0.58 $kg_f m$ fue de 3.0 $ohm cm^2$ y el mínimo alcanzado a torque de 2.02 $kg_f m$ fue de 0.87 $ohm cm^2$, quedando fuera del intervalo típico o aceptable para R_i (0.3-0.6 $ohm cm^2$). En este mismo intervalo de torque, la variación de R_i del sello de espesor de 0.398 mm fue de 1.36 a 0.65 $ohm cm^2$, quedando también fuera del intervalo aceptable de R_i . Para el caso de los espesores de 0.373 y 0.348 mm , ambos entraron en el intervalo aceptable de R_i y lo hicieron prácticamente con el mismo valor: el primero a partir de un torque de 1.7 $kg_f m$ y el segundo a partir de 1.15 $kg_f m$. Desde este punto de vista estos dos últimos sellos permiten que haya un contacto eléctrico aceptable entre los componentes internos de la celda, sin embargo, el de espesor de 0.348 mm , presentó ligeros problemas de sellado a torques iniciales (0.58 y 0.86 $kg_f m$), signo de que la efectividad de sellado ya empieza a sacrificarse, es decir, se encuentra en el límite, representando entonces un problema potencial de fugas a futuro. Por lo tanto, podemos decir que el sello de espesor de 0.373 nos permitirá establecer condiciones seguras que garanticen la ausencia de fugas externas y cruce de gases al interior de la celda de combustible.

Tabla 5. Evaluación de la efectividad de sellado en función del torque para los casos de espesor de sello de “Silicone Rubber” estudiados.

	Caso 1 (0.433 mm)		Caso 2 (0.398 mm)		Caso 3 (0.373 mm)		Caso 4 (0.348 mm)	
Torque ($kg_f m$)	Cruce (mL/min)	Fuga externa (mL/min)	Cruce (mL/min)	Fuga externa (mL/min)	Cruce (mL/min)	Fuga externa (mL/min)	Cruce (mL/min)	Fuga externa (mL/min)
0.58	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.0
0.86	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0
1.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.73	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

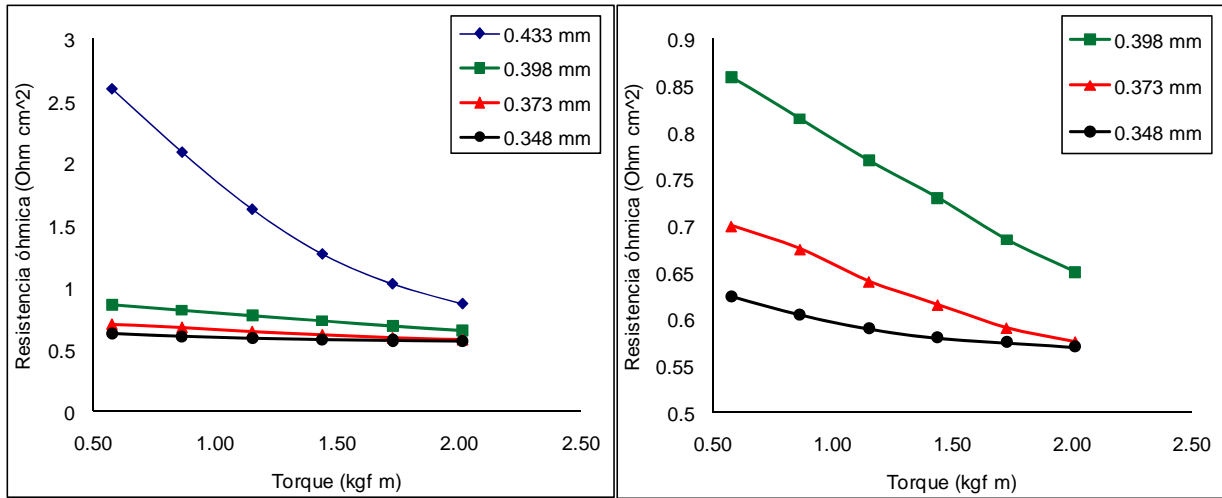


Figura 6. a) Resistencia óhmica total del sistema a diferentes torques para los casos estudiados de espesor de sello de “Silicone Rubber”. b) Acercamiento de los resultados obtenidos para espesores de 0.398, 0.373 y 0.348 mm de sello.

5. Conclusiones

El dimensionamiento del componente *sello* o *empaquet* de una PEMFC, requiere de un análisis minucioso de los compromisos que existen entre este y el resto de los materiales que conforman la celda, en el que se deben incluir las propiedades fisicoquímicas de estos. El análisis de contacto eléctrico en función de la deformación de los componentes porosos CL y DL, mostraron que era necesario una deformación mínima de 18 % de estos componentes; correspondiendo el valor óptimo de contacto eléctrico a una deformación de 28 %. Los resultados del caso real de determinación de espesor óptimo de sello fabricado en “Silicone Rubber”, mostraron que un espesor de 0.373 mm garantiza un sellado efectivo y permite disminuir la resistencia óhmica total del sistema hasta un valor de 0.575 ohm cm², valor que se encuentra dentro del intervalo aceptable de R_i para una PEMFC. Como referencia, este valor de espesor de sello (antes de ser comprimido) es menor en 4.6 % al de la suma de CL y DL.

6. Agradecimientos

Los autores externan su gratitud al Instituto de Investigaciones Eléctricas por el apoyo financiero otorgado para el desarrollo de esta investigación a través del proyecto de infraestructura 13875.

7. Bibliografía

- [1] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd Edition. England: Ed. John Wiley, (2003).
- [2] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, Sustainable World series, edited by Richard C. Dorf. USA: Elsevier Science and Technology Books, (2005).
- [3] www.usfcc.com, US Fuel Cell Council, *USFCC Recommended standard test methods for fuel cell gasket materials*, Document No. 07-004, December 26, (2006).
- [4] Jinzhu Tan, Y.J. Chao, J.W. Van Zee, W.K. Lee, *Materials Science and Engineering*, A 445–446, 669–675, (2007).
- [5] Fuel Cell Store, www.fuelcellstore.com
- [6] M. Schulze, T. Knori, A. Schneider, *J. Power Source* 127, 222–229, (2004).
- [7] Superior Seals and Service, www.superiorseals.com/sheeting.asp .
- [8] Lauren Manufacturing, www.lauren.com/technicalinformation/compression-set-testing.aspx .
- [9] ASTM D-395, Compression Set Test.
- [10] ASTM D-1056, Compression Deflection Test.