

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE DOS DISEÑOS DE CAMPO DE FLUJO DE PLACA BIPOLAR EN EL DESEMPEÑO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM

F. Loyola-Morales, U. Cano-Castillo

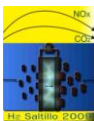
Grupo de Hidrógeno y Celdas de Combustible del Instituto de Investigaciones Eléctricas,
Av. Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos C. P. 62490.

Tel (777) 362-38 11, ext. 7798, Fax (777) 362-3881, ext. 7781, feloyola@yahoo.com.mx

RESUMEN

Los diseños de campo de flujo (CF) de las placas bipolares tienen un papel fundamental en el desempeño de un conjunto de celdas de combustible tipo PEM. Los CF tienen una relación directa con diversos procesos que ocurren al interior de las celdas como: alimentación y distribución homogénea de gases reactivos y manejo de agua producida por la reacción electroquímica global. Por esta razón, es de suma importancia contar con un diseño de CF que promueva cada uno de estos procesos de manera óptima para lograr el máximo desempeño de un conjunto de celdas de combustible. En el presente trabajo se evaluó el impacto que tienen dos diferentes CF's en el desempeño de la celda de combustible. Los diseños de CF evaluados fueron "4 serpentines paralelos" ("4SP") y "2 serpentines a contraflujo" ("SC"). Las pruebas de estabilidad de la operación de la celda aplicadas a cada uno de los campos de flujo fueron: tolerancia a la inundación, tolerancia a condiciones de deshidratación y desempeño a estequiometrías de 1.1, 1.3, 1.5 y 2.5. El diseño "4SP" mostró alta estabilidad de su desempeño durante la operación bajo un proceso de inundación gradual del sistema y operación a diferentes estequiometrías y sólo en la prueba bajo condiciones de deshidratación mostró disminución gradual de su desempeño hasta en un 27 %. En comparación con estos resultados, el diseño "SC" mostró una rápida caída de 45 % de su desempeño al operar bajo condiciones de inundación gradual del sistema, caída constante de su desempeño (también de alrededor de 45 %) a estequiometrías de 1.1, 1.3 y 1.5 por acumulación de agua, y sólo a estequiometría de 2.5 mostró alta estabilidad de su desempeño como resultado de un buen manejo de agua. En la prueba de operación bajo condiciones de deshidratación el desempeño del diseño "SC" cayó hasta un 40 % y permaneció en este valor durante el resto de la prueba. De acuerdo con estos resultados, el desempeño del diseño "4SP" fue más estable que el "SC" en todas las pruebas implementadas.

Palabras clave: Campos de flujo, PEMFC, estabilidad del desempeño, inundación, deshidratación.



1. Introducción

Las placas bipolares (PB), tienen diferentes funciones dentro de un conjunto de celdas de combustible tipo PEM: unen eléctricamente las celdas conectadas en serie, distribuyen el gas combustible y oxidante sobre el área activa, facilitan el manejo del agua, remueven el calor generado, separan el flujo de combustible del oxidante, además, proveen cierta estabilidad y estructura mecánica al conjunto de celdas.¹ Algunas de estas funciones están asociadas a las propiedades del material seleccionado para su fabricación,^{2,3} en tanto que otras (i. e. distribución de gases y manejo de agua), están relacionadas con el diseño de campos de flujo^{1,4}. Para obtener un buen desempeño de la celda o conjunto de celdas, la distribución homogénea de gases reactivos al interior de la celda, así como el manejo adecuado de agua, son cruciales; lo que las convierte en unas de las principales “variables objetivo” durante el proceso de diseño.

El diseño de placas bipolares enfocado a la distribución uniforme de gases en la celda, es sumamente importante para el tiempo de vida de cada celda individual y por lo tanto de todo el conjunto. La existencia de excesivos gradientes de concentración a lo largo del área activa, implica que la cinética de reacción se verá más favorecida en algunas zonas en tanto que en otras no, lo que se traduce en zonas con mayor cantidad de reacción y por lo tanto con mayor generación de calor y el consecuente incremento de la temperatura en esas mismas zonas. Estas condiciones llevan al desgaste o degradación heterogénea del ensamble membrana electrodo, lo que a la larga limitará su tiempo de vida.

La configuración del campo de flujo de la placa bipolar, tiene un fuerte impacto en los aspectos mencionados antes.¹ La configuración más común de los canales de flujo es la de serpentín simple (figura 1a),⁵ aunque no la más adecuada para conseguir una operación eficiente de la celda, sobre todo cuando se trabaja con áreas grandes. Algunos beneficios que se obtienen de esta configuración son: mayor uso de combustible y oxidante, el paso de todo el flujo de gas por un solo canal evita su taponamiento por agua condensada. Sin embargo, también podríamos señalar algunas limitaciones: la diferencia de concentración intrínseca entre la entrada y la salida del sistema incrementa con la distancia recorrida, se presentan mayores gradientes de temperatura entre la entrada y la salida del sistema lo que lleva a un uso heterogéneo del área activa, además, si no hay una hidratación adecuada de gases, se propicia la deshidratación del sistema en las primeras zonas de recorrido del canal. Una manera de atenuar los gradientes que se presentan en la configuración anterior es mediante el uso de serpentines en paralelo (figura 1b). A mayor número de serpentines en paralelo, mayor es la atenuación de los gradientes.⁶ Esta tendencia, tiene como límite justamente el uso de canales rectos paralelos (figura 1c). Sin embargo, esta última configuración requiere de un análisis cuidadoso, pues una de las mayores limitantes que presenta está asociada a la definición de los puntos de alimentación de gas a la celda y su suministro a todos los canales, además, al incrementar el número

de canales, también incrementa la probabilidad de su taponamiento por agua condensada cuando no se dispone de ella adecuadamente durante su operación. Los canales bloqueados quedan deshabilitados por completo, con lo que disminuiría el uso efectivo del área activa de la celda.

En el diseño de placas bipolares, la disponibilidad de configuraciones es sumamente amplia, cada una con sus propios beneficios y limitaciones. Cada una responde a una serie de consideraciones hechas, las cuales definen también de cierta manera, las condiciones de operación y aplicaciones a las cuales son funcionales. En el presente trabajo, se evaluó el efecto que tiene el diseño de dos campos de flujo, “4 serpientes paralelos” (4SP) y “Serpentines a contraflujo” (SC), mostradas en las figuras 1b y 1e respectivamente, en el desempeño global de una monocelda de combustible tipo PEM a diferentes condiciones de flujo de gas oxidante. Estas actividades se desarrollaron como parte de un programa de diseño y construcción de un conjunto de celdas de combustible que se desarrolla en el Laboratorio de Celdas de Combustible e Hidrógeno (LCCH) del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), y corresponden a la etapa de selección de diseño de campo de flujo.

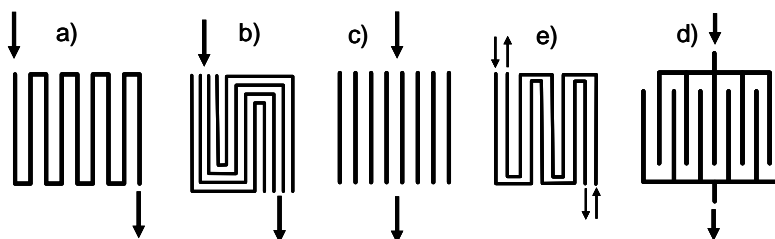


Figura 1. Configuraciones de campos de flujo en placas bipolares

2. Condiciones experimentales

La evaluación de los diseños de campo de flujo se llevó a cabo bajo diferentes condiciones de operación como: inundación, deshidratación y desempeño a estequiometría constante de 1.1, 1.3, 1.5 y 2.5. La operación bajo condiciones de inundación y deshidratación tiene el objetivo de conocer el comportamiento de cada diseño a condiciones de operación drásticas para la celda. En tanto que la operación a estequiometría constante, tiene el objetivo de determinar el flujo o intervalo de flujos estequiométricos bajo los cuales cada diseño muestra estabilidad en su desempeño a lo largo del tiempo de operación.

2.1. Desempeño bajo condiciones de inundación

Una vez acondicionado el sistema^a, se inició una prueba cronoamperométrica a 0.3 V de celda manteniendo cerrada la salida de gases tanto en ánodo como en cátodo (H_2/O_2) para permitir que el agua que se producía al interior de la celda como producto de la reacción catódica se acumulara y de esta manera inducir la inundación. Cada 1346 segundos a lo largo de la prueba se hicieron curvas de polarización y mediciones EIS para evaluar el estado del sistema.

2.2. Desempeño bajo condiciones de deshidratación

Después de acondicionar el sistema, se inició una prueba cronoamperométrica a 0.3 V de celda, durante la cual se introdujo un flujo de oxígeno correspondiente a una estequiometría de 4 del lado del cátodo para provocar la deshidratación gradual del sistema. Cada 855 segundos a lo largo de la prueba se hicieron curvas de polarización y mediciones EIS para evaluar el estado del sistema.

2.3. Desempeño a estequiometría constante

La prueba a estequiometría constante, consistió en llevar a cabo en primer lugar el acondicionamiento del sistema y posteriormente una prueba cronoamperométrica durante 3000 s a 0.3 V de celda a una estequiometría dada: 1.1, 1.3, 1.5 y 2.5 en cátodo. En cada prueba, se evaluó el estado inicial del sistema y el alcanzado después de la prueba cronoamperométrica mediante curvas de polarización y mediciones de EIS, posteriormente se purgó el sistema para eliminar la posible acumulación de agua líquida durante la prueba y se evaluó nuevamente el estado del sistema con una curva de polarización y una prueba EIS.

Para las pruebas en que se estableció una estequiometría diferente de 1 en cátodo, el flujo de oxígeno alimentado a la celda, dada una estequiometría (ϵ), se calculó considerando que este provenía de aire, por lo que se alimentó un excedente de gas considerando que este correspondía al nitrógeno:

$$(Fo_2)_{tot} = (Fo_{2(reac)})(\epsilon)(100/21) \quad (1)$$

Las diferentes pruebas planeadas para la evaluación experimental de los diseños propuestos se llevaron a cabo en una monocelda de 50 cm^2 . El ensamble membrana electrodo empleado fue fabricado en el LCCH del IIE, la carga de catalizador es de 0.7 mg Pt / cm^2 depositado de manera simétrica en membrana Nafion NRE-212. El difusor de gases usado fue papel de carbón con capa micro-porosa GDL-30-BC. Las condiciones de operación fueron 343.15 K (70°C) y 69 kPa (10 lb/in^2) de presión en ánodo y cátodo. El gas

^a Procedimiento que se lleva a cabo para hidratar completamente el electrolito de la celda (membrana Nafion) sin llegar a inundación.

alimentado en ánodo fue hidrógeno a estequiometría de 1 para todas las pruebas, en tanto que en cátodo se varió la estequiometría de acuerdo a la prueba experimental en turno. En todos los casos, los gases se alimentaron sin previa humidificación. El control de las condiciones de presión, temperatura y flujo de gases se llevó a cabo mediante el uso de una estación de pruebas Electro-Chem, Inc. MTS 150. Las curvas de polarización se llevaron a cabo a velocidad de barrido de 4 mV/s y a la estequiometría establecida para cada prueba. Las pruebas cronoamperométricas se llevaron a cabo a 0.3 V de celda y también a la estequiometría establecida para cada prueba. Ambos tipos de mediciones se hicieron mediante el uso de un potencióstato Solartron 1287 acoplado a un booster Solartron 1290. Las pruebas EIS se hicieron mediante el uso de un analizador de respuesta de frecuencia Solartron 1260 acoplado al potencióstato y Booster. El intervalo de frecuencia utilizado fue de 1 a 10000 Hz y la amplitud de señal aplicada fue de 80 mV.

3. Resultados y análisis

3.1. Desempeño bajo condiciones de inundación

En la figura 2a, se muestra el desempeño de los dos diseños propuestos cuando se sometieron a un proceso de inundación gradual del sistema. En esta se observa que el diseño 4SP presenta una caída de su desempeño global del 19 % en los primeros 7500 s como resultado de la acumulación de agua en su interior. Al final de la prueba (alrededor de 8000 s) se observa una pequeña recuperación, la cual se debió a la salida de una pequeña cantidad de agua líquida del sistema. Por su parte, el diseño SC presenta una rápida caída de su desempeño (del 45 %) al irse acumulando el agua en su interior durante los primeros 4500 s de operación, a partir de este tiempo y hasta los 6000 s muestra estabilidad en su desempeño y posteriormente se observa una recuperación significativa del sistema, que al igual que en el caso del diseño 4SP, se debió a la salida de agua líquida del sistema. Esta salida de agua ocurrió mientras se determinaba la curva de polarización “SC 5584 s” de la figura 2c, por lo que en esta se puede observar una mejora en el desempeño de la celda a partir del punto 0.4 V de celda y 0.1 A/cm². De manera general, la serie de curvas de polarización hechas a lo largo de cada prueba cronoamperométrica (figuras 2b y 2c) también muestran esta disminución gradual del desempeño de la celda en cada caso al irse inundando, siendo mayor para el diseño SC. Para contar con una herramienta más de análisis, el proceso de inundación gradual de la celda también se verificó a través de mediciones de EIS, en las que se observó mayor variación del ángulo de fase a bajas frecuencias (figuras 3c y 3d) para el diseño SC, que de acuerdo a lo reportado en la literatura, se relaciona con un mayor grado de inundación.^{7, 8, 9} Estos resultados indican mayor estabilidad de la operación para el diseño 4SP respecto al SC bajo condiciones de inundación. Al parecer, la diferencia en el número de canales en que se divide el campo de flujo, cuatro canales para el diseño 4SP y dos para el diseño SC, es la principal variable que influye para

obtener mayor o menor estabilidad del desempeño en cada diseño. Esto es, si el agua condensada bloquea el flujo de gas de un canal del diseño 4SP, se estaría dejando de alimentar gas reactivo a una cuarta parte del total de la zona catalítica, por otro lado, cuando se bloquea un canal del diseño SC, se estaría dejando de alimentar gas reactivo a una mitad del total de la zona catalítica. Por esta razón, el bloqueo de canales en el diseño 4SP no afecta demasiado el desempeño global de la celda, sin embargo, en el caso del diseño SC, el bloqueo de canales por agua condensada lleva a un rápido decremento de su desempeño; pero también lo puede llevar a su rápida recuperación por eliminación de agua líquida, como el mostrado después de 6000 s de operación.

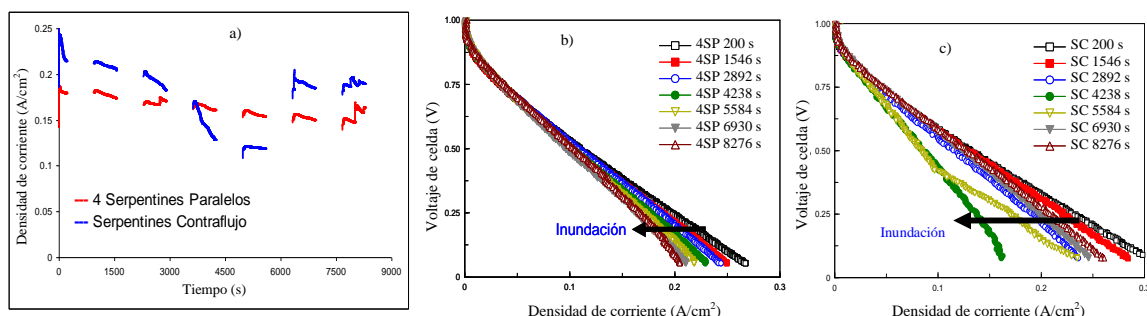


Figura 2. a) Desempeño de celda bajo condiciones de inundación gradual del sistema para dos diseños de campo de flujo. b) y c) Curvas de polarización determinadas a lo largo del mismo proceso para 4SP y SC, respectivamente.

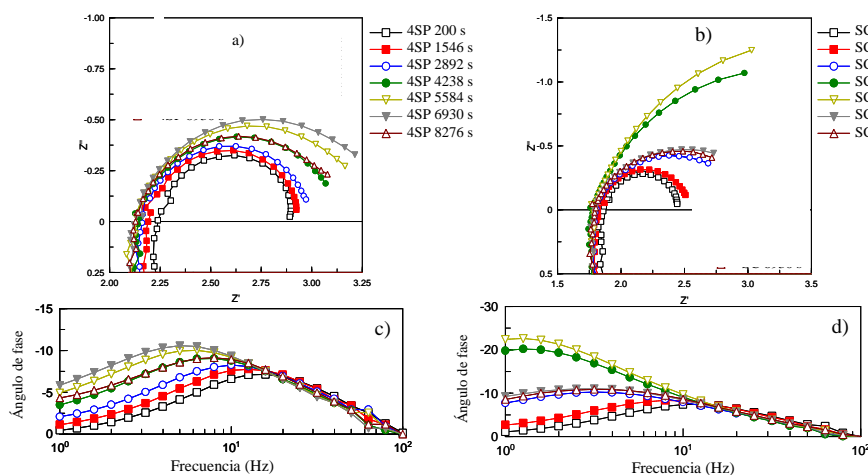


Figura 3. Análisis de la evolución del estado de inundación de la celda mediante pruebas EIS. a) y b) diagramas de Nyquist para 4SP y SC, respectivamente. c) y d), diagramas de Bode (ángulo de fases vs. frecuencia) para 4SP y SC, respectivamente.

3.2. Desempeño bajo condiciones de deshidratación

En la figura 4a se puede ver el desempeño mostrado por los diseños en estudio al someterse a un proceso de deshidratación. El diseño SC muestra mayor rapidez de deshidratación en comparación con el diseño 4SP. El diseño SC alcanza su mayor grado de deshidratación a los 2000 s, disminuyendo su densidad de corriente producida de 0.2 a 0.12 A/cm², por su parte el diseño 4SP muestra una disminución más suave de su densidad de corriente producida desde un valor de 0.193 A/cm² y con tendencia a alcanzar un valor cercano a 0.12 A/cm² pero en un intervalo de 5000 s. Las curvas de polarización (figuras 4b y 4c) y mediciones de EIS (figura 5) determinadas a lo largo del proceso de deshidratación para ambos diseños, corroboran la velocidad con que se deshidrata cada sistema: el diseño 4SP lo hace gradualmente y de una manera suave, en tanto que el diseño SC alcanzó su máximo de deshidratación a los 1910 s (prueba “SC 1910 s” de las figuras 4c para curvas de polarización y 5b y 5c para las mediciones EIS: incremento de la resistencia iónica en figura 5b y variación de ángulo de fase a altas frecuencias en figura 5c). Este resultado, muestra que el diseño SC fue más susceptible a las condiciones deshidratantes en comparación con el diseño 4SP, aún cuando se podría pensar que la configuración de serpentines a contraflujo tendría mayor capacidad para redistribuir el agua al interior de la celda y con ello lograr la auto-hidratación interna. Podemos decir entonces que, la operación a condiciones de deshidratación fue más estable cuando se usó el diseño 4SP. Posiblemente, la capacidad que tiene 4SP para mantener algunos de sus canales inundados en tanto que otros se deshidratan por el flujo aplicado, provoca una menor velocidad de deshidratación al contar con “depósitos” de agua líquida al interior la misma, a partir de los cuales se rehidrata el sistema.

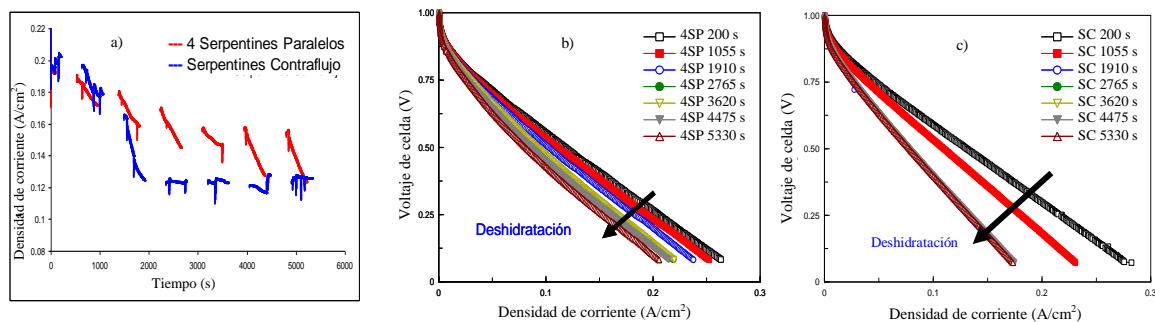


Figura 4. Desempeño de celda bajo condiciones de deshidratación gradual del sistema para dos diseños de campo de flujo. Curvas de polarización determinadas a lo largo del mismo proceso para 4SP y SC, respectivamente.

A lo largo del proceso de deshidratación se hicieron purgas periódicas para garantizar la no acumulación de agua al interior, en estas se observó salida de pequeñas cantidades de agua líquida todas las

veces, lo que indica que aún cuando el flujo es alto, con lo que se espera remoción total de agua líquida tanto en fase líquida como vapor, el transporte de agua en fase líquida es sumamente importante e inevitable a las condiciones del experimento, por esta razón, el hacer consideraciones diferentes, puede llevar a un mal diseño de sistemas de PEMFC's. El transporte de agua en fase líquida implica taponamiento parcial o total, temporal o definitivo de canales de flujo, cuyos efectos en el desempeño del sistema, los observamos a lo largo de los procesos de inundación. Por esta razón es sumamente importante contar con un diseño en el que la condensación de agua al interior de la celda no tenga un fuerte impacto en el desempeño de la celda.

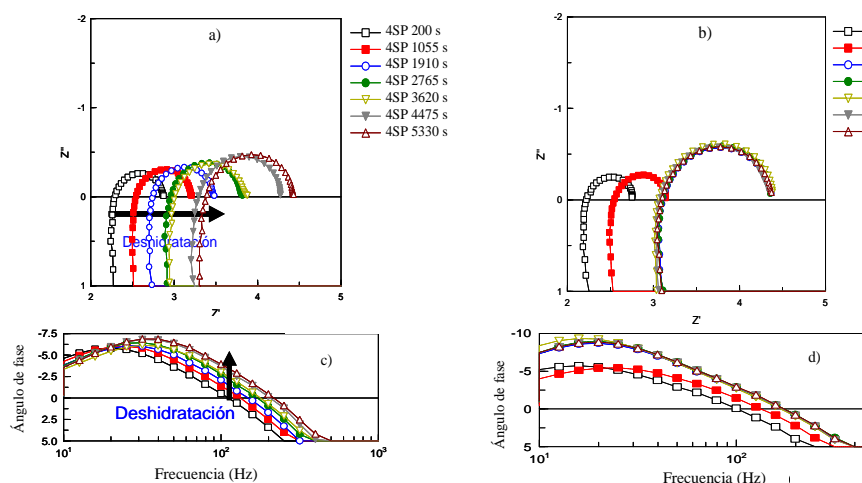


Figura 5. Análisis de la evolución del estado de deshidratación de la celda mediante pruebas EIS. a) y b) diagramas de Nyquist para 4SP y SC, respectivamente. c) y d), diagramas de Bode (ángulo de fases vs. frecuencia) para 4SP y SC, respectivamente.

3.3. Desempeño a estequiometría constante

3.3.1. Estequiometría de 1.1

En las pruebas de desempeño a estequiometría constante de 1.1, nuevamente el diseño 4SP mostró mayor estabilidad de su desempeño a lo largo de los 3000 s de operación, por su parte, el diseño SC mostró estabilidad sólo durante los primeros 600 s, después de este tiempo se observó la disminución de su desempeño de 0.22 a 0.195 A/cm², el cual recuperó al hacer la purga del sistema al final de la prueba cronoamperométrica de 3000 s (figura 6a). Esta disminución del desempeño mostrado por el diseño SC se nota sólo ligeramente al comparar las curvas de polarización hechas al inicio y término de la prueba cronoamperométrica (figura 6c), lo mismo ocurre con la ganancia en desempeño alcanzado después de la

purga. En cambio, de acuerdo a la figura 7, las pruebas EIS sí mostraron variaciones: para el caso 4SP, en la figura 7c se observa un incremento de 0.55 del ángulo de fase a bajas frecuencias entre las pruebas correspondientes al inicio y final de la prueba cronoamperométrica, indicando que el diseño 4SP sufrió inundación ligera durante esta prueba.⁹ De la misma manera, en la figura 7d se observa que el diseño SC sufrió también inundación pero más severa al obtener un incremento del ángulo de fase de 4.364 (comparación entre pruebas efectuadas al inicio y final de prueba cronoamperométrica). Se puede decir entonces, que la principal causa de la caída del desempeño mostrado por ambos diseños fue la inundación del sistema, pues no se detectaron indicios de deshidratación a lo largo de la prueba, como lo indica el nulo incremento de la resistencia total del sistema asociado al valor de la componente real de la impedancia total cuando el espectro generado cruza el eje real en el diagrama de Nyquist¹⁰ (comparación entre “Inicio de prueba” y “Final de prueba” en figura 7a para diseño 4SP y en figura 7b para el diseño SC).

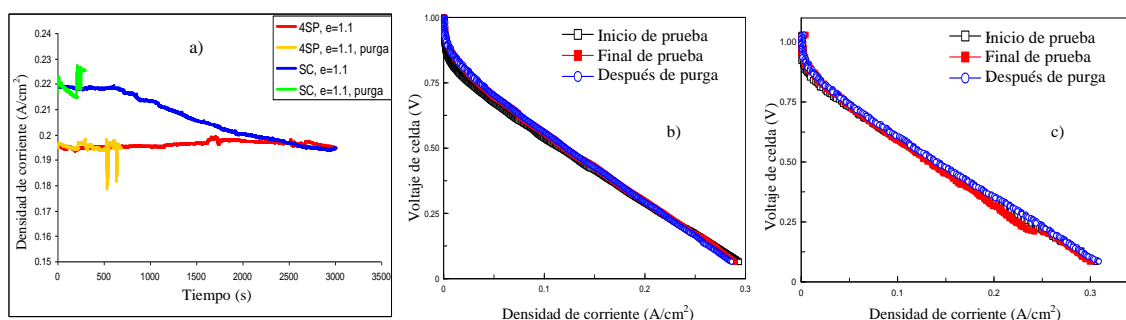


Figura 6. a) Desempeño de celda a estequiometría constante de 1.1. b) y c) Curvas de polarización determinadas al inicio y final de prueba cronoamperométrica y posterior a la purga del sistema, para 4SP y SC respectivamente.

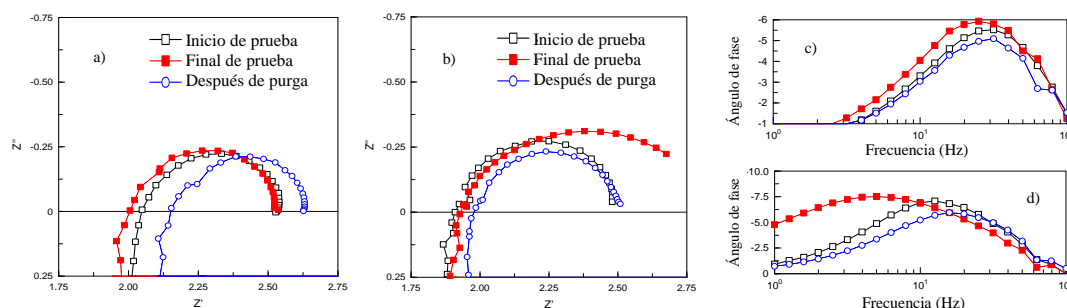


Figura 7. Análisis de los estados inicial y final de la prueba cronoamperométrica a estequiometría de 1.1 y posterior a la purga, mediante pruebas EIS. a) y b) diagramas de Nyquist para 4SP y SC, respectivamente. c) y d), diagramas de Bode (ángulo de fases vs. frecuencia) para 4SP y SC, respectivamente.

3.3.2. Estequiometría de 1.3

Para el caso en que los diseños se probaron a estequiometría de 1.3 (figura 8a), el diseño 4SP mostró estabilidad de su desempeño durante los primeros 1800 s, posteriormente disminuyó su producción de corriente gradualmente de 0.2 a 0.18 A/cm² en los últimos 1000 segundos de la prueba. Esta vez, sí se percibe claramente la disminución del desempeño en las curvas de polarización determinadas al inicio y final de prueba cronoamperométrica (figura 8b). Las mediciones de EIS mostraron que esta disminución se debió a la inundación del sistema, como lo indica el incremento en 2.33 del ángulo de fase observado en la figura 9c al comparar las pruebas “Inicio de prueba” y “Final de prueba”. No se observó incremento de resistencia entre las mismas pruebas mencionadas antes (figura 9a), por lo que se descarta deshidratación del sistema. Por otra parte, el diseño SC mostró una rápida y constante caída de su desempeño en los primeros 2000 s, desde 0.225 hasta 0.12 A/cm²; posterior a este tiempo, se mantuvo estable hasta los 3000 s. Esta enorme caída de su desempeño se ve reflejada en la curva de polarización determinada al final de la prueba cronoamperométrica (figura 8c). Las pruebas de EIS aplicadas para este caso, muestran que aún cuando hay un ligero incremento de la resistencia iónica del sistema, la razón principal de la caída del desempeño fue una severa inundación del sistema al incrementarse el valor del ángulo de fase de 2 a 18 unidades (comparación entre pruebas “Inicio de prueba” y “Final de prueba” en la figura 9d), el cual disminuyó hasta un valor de 3 después de la purga; prueba adicional de que el sistema se encontraba inundado.

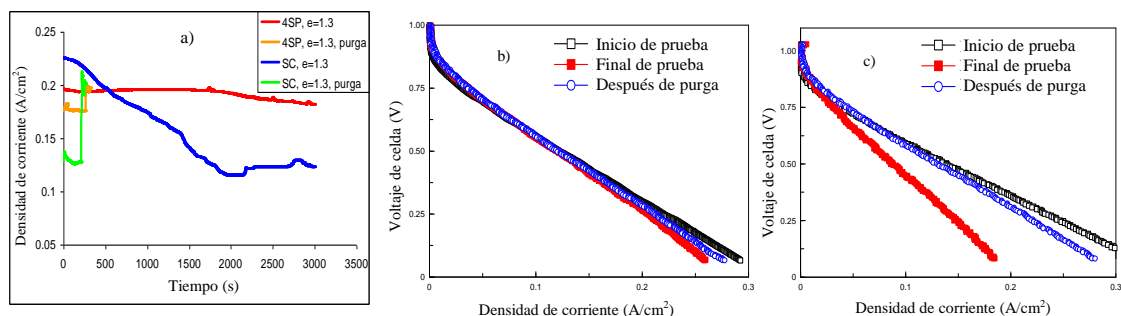


Figura 8. a) Desempeño de celda a estequiometría constante de 1.3. b) y c) Curvas de polarización determinadas al inicio y final de prueba cronoamperométrica y posterior a la purga del sistema, para 4SP y SC respectivamente.

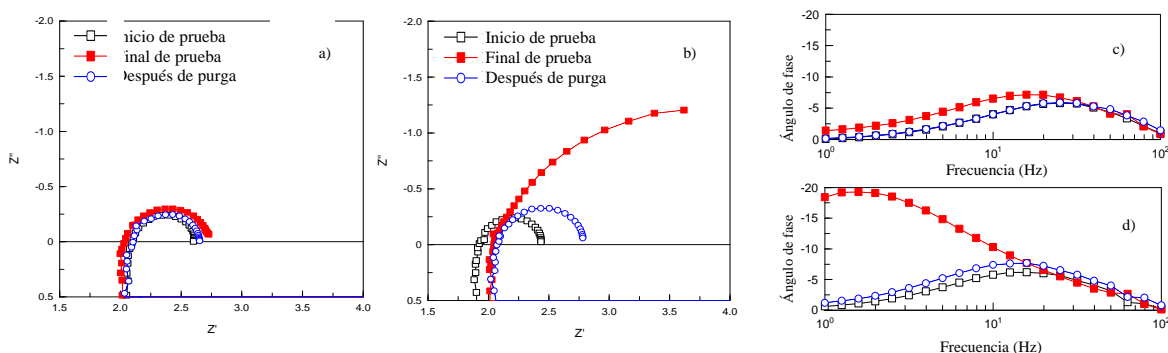


Figura 9. Análisis de los estados inicial y final de la prueba cronoamperométrica a estequiometría de 1.3 y posterior a la purga, mediante pruebas EIS. a) y b) diagramas de Nyquist para 4SP y SC, respectivamente. c) y d), diagramas de Bode (ángulo de fases vs. frecuencia) para 4SP y SC, respectivamente.

3.3.3. Estequiometría de 1.5

En las pruebas de desempeño a estequiometría de 1.5, el diseño 4SP mostró muy buena estabilidad a lo largo de toda la prueba (figura 10a) con una ligera presencia de inundación de celda. La poca diferencia que mostraron entre sí las curvas de polarización determinadas al inicio y final de la prueba cronoamperométrica, así como la poca recuperación del sistema después de la purga (figura 10b), confirman esta aseveración. Las pruebas de EIS, técnica que suele ser más sensible a estas pequeñas diferencias en el estado que guarda este tipo de sistemas, muestra que efectivamente, la pequeña disminución de desempeño mostrado por el diseño 4SP, se debió a la presencia de inundación en el sistema (figura 11c). Como un dato extra, se puede decir que de acuerdo con los valores Z' al cruce del eje real en el diagrama de Nyquist (figura 11a), el sistema no presentó deshidratación durante la prueba cronoamperométrica. Por su parte, el diseño SC mostró una rápida caída de su desempeño después de los 750 s, de 0.19 hasta 0.11 A/cm² (figura 10a). Las pruebas de EIS aplicadas, mostraron que esta disminución del desempeño se debió exclusivamente a la inundación del sistema por agua condensada (figuras 11b y 11d), ya que el sistema se recuperó completamente después de la purga, como se observa en la propia curva de desempeño (figura 10a), en las de polarización (figura 10c) y en las de impedancia (figuras 11b y 11d).

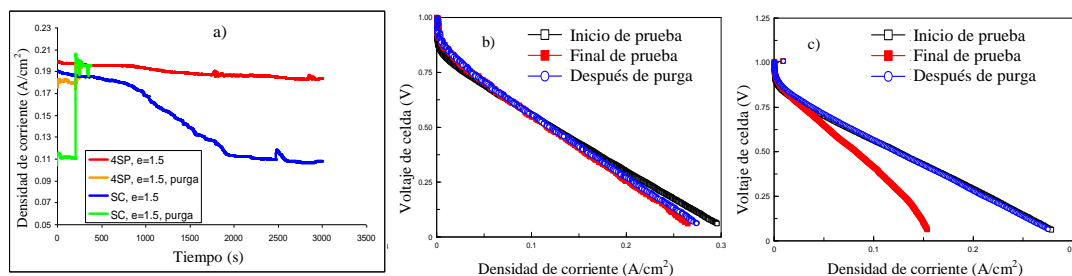


Figura 10. a) Desempeño de celda a estequiometría constante de 1.5. b) y c) Curvas de polarización determinadas al inicio y final de prueba cronoamperométrica y posterior a la purga del sistema, para 4SP y SC respectivamente.

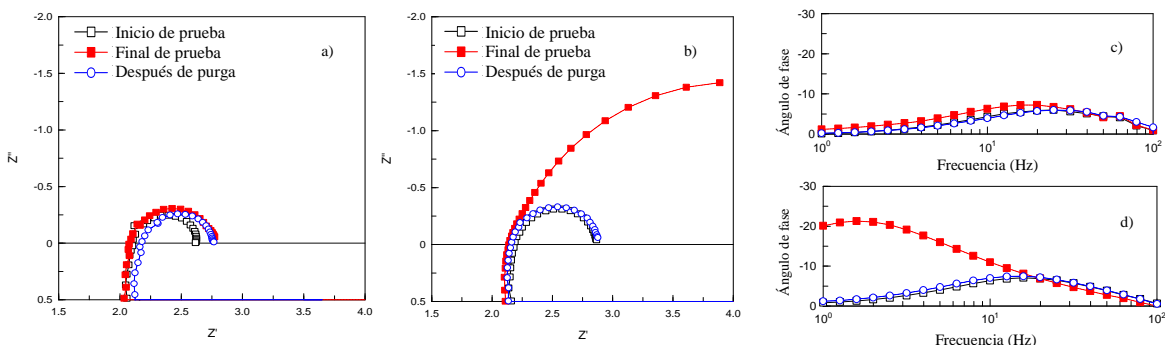


Figura 11. Análisis de los estados inicial y final de la prueba cronoamperométrica a estequiometría de 1.5 y posterior a la purga, mediante pruebas EIS. a) y b) diagramas de Nyquist para 4SP y SC, respectivamente. c) y d), diagramas de Bode (ángulo de fases vs. frecuencia) para 4SP y SC, respectivamente.

3.3.4. Estequiometría de 2.5

Para el caso de las pruebas a estequiometría de 2.5, ambos diseños mostraron buena estabilidad de su desempeño a lo largo de la prueba cronoamperométrica (figura 12a), así lo confirma la poca variación entre las curvas de polarización determinadas, para ambos casos, al inicio, final de prueba y posterior a la purga del sistema (figuras 11 b y 11c). Las pruebas EIS (figuras 13a y 13b), mostraron que no hubo deshidratación en ninguno de los casos a lo largo de la prueba. Por otra parte, el análisis de la variación del ángulo de fase (figuras 13c y 13d), indicó que al término de la prueba cronoamperométrica, el diseño SC presentaba una ligera inundación pero que ésta era mayor a la que presentaba el diseño 4SP.

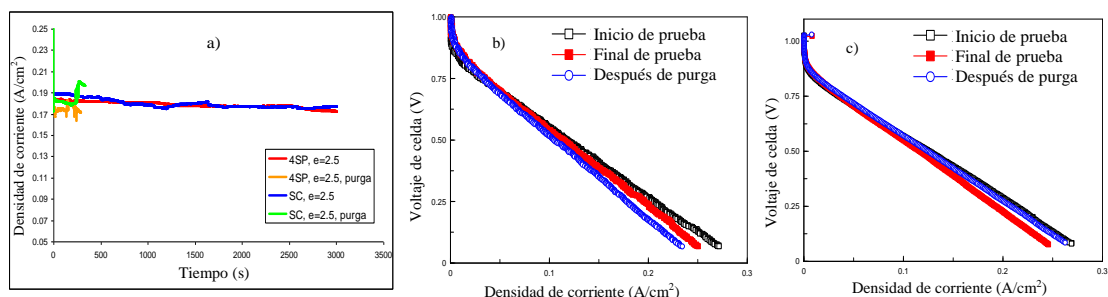


Figura 12. a) Desempeño de celda a estequiometría constante de 2.5. b) y c) Curvas de polarización determinadas al inicio y final de prueba cronoamperométrica y posterior a la purga del sistema, para 4SP y SC respectivamente.

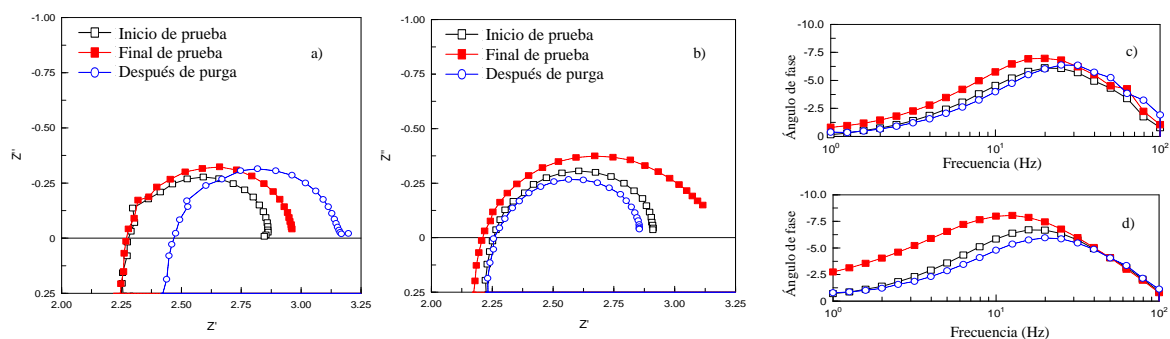
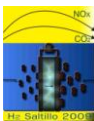


Figura 13. Análisis de los estados inicial y final de la prueba cronoamperométrica a estequiometría de 2.5 y posterior a la purga, mediante pruebas EIS. a) y b) diagramas de Nyquist para 4SP y SC, respectivamente. c) y d), diagramas de Bode (ángulo de fases vs. frecuencia) para 4SP y SC, respectivamente.

4. Conclusiones

Los resultados de la evaluación experimental de los diseños de campo de flujo llevada a cabo en este trabajo, mostraron que el diseño 4SP presentó una mayor tolerancia a la operación bajo condiciones drásticas como es la inundación y la deshidratación del sistema, por su parte el diseño SC mostró alta sensibilidad a la presencia de estados de inundación y deshidratación del sistema. En las pruebas a estequiometría constante, el diseño 4SP mostró mayor estabilidad en su desempeño tanto a estequiometrías pequeñas como a elevadas. El diseño SC mostró buena estabilidad de su desempeño sólo a estequiometrías de 2.5; menores a esta, su desempeño fue decayendo a lo largo de la prueba. En prácticamente todas las pruebas, se encontró que la principal causa de la caída del desempeño de los diseños era la inundación del sistema. Indicando que la



formación de agua líquida al interior del sistema aún a estequiometrías altas (~ 2.5) es significativa e inevitable a las condiciones de operación a las que se llevaron a cabo los experimentos.

5. Agradecimientos

Agradecemos profundamente al Instituto de Investigaciones Eléctricas por el financiamiento económico de este trabajo bajo el proyecto 12491. Al CONACyT por la beca económica otorgada durante el desarrollo del presente trabajo bajo el número de registro 202748.

6. Referencias

1. X. Li, I. Sabir, *Int. J. Hydrogen Energy*, 30 (2005) 359.
2. V. Mehta, J. Smith, *J. Power Source* 114 (2003) 32.
3. H. Tawfik, Y. Hung, D. Mahajan, *J. Power Source* 163 (2007) 755.
4. A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol, *Int. J. Hydrogen Energy* 30 (2005) 1297.
5. D. S. Watkins, K. W. Dircks and D. G. Epp, *US Patent Number 510884*. (1992).
6. S. Shimpalee, S. Greenway, J. W. Van Zee, *J. Power Source* 160 (2006) 398.
7. W. Mérida, D. A. Harrington, G. Malean, and J. M. LeCanut, *J. Power Sources* 161 (2006) 264.
8. T. Kurz, A. Hakenjos, J. Krämer, M. Zedda, C. Agert, *J. Power sources* 180 (2008) 742.
9. U. Cano, F. Loyola, Memorias del “International Symposium on *diagnostic tools for fuel cell technologies*”, Trondheim, Norway, Junio (2009).
10. K. R. Cooper, V. Ramani, J. M. Fenton, H. R. Kunz, *Experimental methods and data analyses for polymer electrolyte fuel cells*, published by Scribner Associates Inc., USA (2005).