

Lógica borrosa para la estimación de estados críticos de una pila de combustible PEM

Wilton E. Agila¹, Victor M. Huilcapi²

¹ CIDIS-FIEC, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, P.O. Box 09-01-5863.

² GISCOR, Facultad de Ingenierías, Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Robles 107 y Chambers 227 y 5 de Junio, Guayaquil, Ecuador, P.O. Box 09-01-4752.

Autores para correspondencia: wagila@espol.edu.ec, vhuilcapi@ups.edu.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre 2014

RESUMEN

La determinación en tiempo real de los estados críticos de operación de la pila de combustible de membrana intercambio protónico (siglas en inglés, PEM) es uno de los principales retos para los sistemas de control de pilas de combustible PEM. En este trabajo, se presenta el desarrollo e implementación de un método no invasivo de bajo coste basado en técnicas de decisión borrosa que permite estimar los estados críticos de operación de la pila de combustible PEM. La estimación se realiza mediante perturbaciones al estado de operación de la pila y el análisis posterior de la evolución temporal del voltaje generado por la pila. La implementación de esta técnica de estimación-percepción de estado de la pila de combustible para la detección de estados críticos constituye una novedad y un paso hacia el control autónomo en óptimas condiciones de la operación de las pilas de combustible PEM.

Palabras clave: Caracterización de pilas de combustible PEM, estado de inundación y deshidratación de la membrana polimérica, árbol de decisión borroso, control, lógica difusa.

ABSTRACT

The real time determination of the critical states of operation of the fuel cell proton exchange membrane (acronym in English, PEM) is one of the main challenges for the control systems of PEM fuel cells. In this paper, the development and implementation of a non-invasive low cost method based on fuzzy decision techniques to estimate the critical states of operation of the PEM fuel cell is presented. The estimation is performed by perturbations of the state of operation of PEM fuel cell and the subsequent analysis of the temporal evolution of the voltage generated by the cell. The implementation of this stimulation-perceived technique of the state of fuel cell for the detection of critical states is a novelty and a step towards autonomous control in optimal operation of PEM fuel cells.

Keywords: PEMFC characterization, membrane flooding and dehydration state, fuzzy decision tree, control, fuzzy logic.

1. INTRODUCCIÓN

Los estados críticos de operación de la pila PEM están ligadas de manera directa a la mayor o menor hidratación de la membrana polimérica. De hecho, los problemas causados por la inundación y deshidratación de la membrana polimérica durante la operación de la pila de combustible PEM se mencionan en Natarajan & Van Nguyen (2005) y Marrony *et al.* (2008), donde se aprecia como ambos estados deterioran significativamente la respuesta eléctrica de la pila combustible. Los fenómenos

locales de “starvation” provocados por la inundación de agua en la zona de reacción electroquímica de la pila PEM, son comentados en Akira *et al.* (2008) y O’Hayre *et al.* (2001). Sin embargo, para detectar estas incidencias negativas o zonas críticas de operación de la pila PEM se precisa de técnicas de inspección e instrumentación dedicada; como la presentada en Wang *et al.* (2008), en donde se hace uso de la Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y diagramas de Nyquist para estudiar el grado de humidificación de la membrana. En Minard *et al.* (2006), se usa imágenes de resonancia magnética para visualizar el contenido de agua dentro de la pila PEM durante su funcionamiento, posteriormente estas imágenes son correlacionadas a la corriente de salida y a las características de operación de la pila PEM. Una metodología para la caracterización de la inundación en el cátodo, sequedad de la membrana y envenenamiento en el catalizador del ánodo de la pila PEM es presentado en Rubio *et al.* (2010), en él se proponen dos modelos analíticos de funcionamiento de la pila PEM y una validación a partir de las variaciones detectadas en el espectro de impedancia compleja.

Las técnicas y/o métodos propuestos para el diagnóstico de la deshidratación e inundación de la membrana y envenenamiento de la misma en las pilas PEM, incluyen, por una parte, equipos como: analizadores de Espectros de Impedancia Compleja (EIC) e imágenes de resonancia magnética (MRI) que aumentan drásticamente el coste y la complejidad de los sistemas de monitorización y control para pilas PEM, lo que limita el uso en aplicaciones de las pilas de combustible PEM, donde se necesitan sesiones de operación continua y desatendida, durante largos períodos de tiempo.

En este trabajo se presenta una técnica innovadora, económica, sencilla, y de fácil implementación en las tareas de monitorización en tiempo real de las pilas de combustible PEM. El sistema estimulación-percepción de estados propuesto permite detectar estados críticos de operación de la pila de combustible PEM, como la deshidratación e inundación.

2. PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACIÓN

2.1. Pila de combustible y estación de ensayos

Un corte transversal del tipo de pila de combustible PEM utilizada para el desarrollo y validación de la técnica de detección de estado propuesta, es presentado en la Figura 1. Esta pila PEM fue diseñada y desarrollada en el LERH-CSIC¹, y, está dotado de dos placas bipolares de láminas corrugadas. En la zona exterior, las piezas de fuera hacia dentro son: placas terminales 80x80mm², sellos 50x50, marcos de teflón 50x50, ensamblaje electrodo-membrana (Nafión 115) con prensado en caliente 55x55.

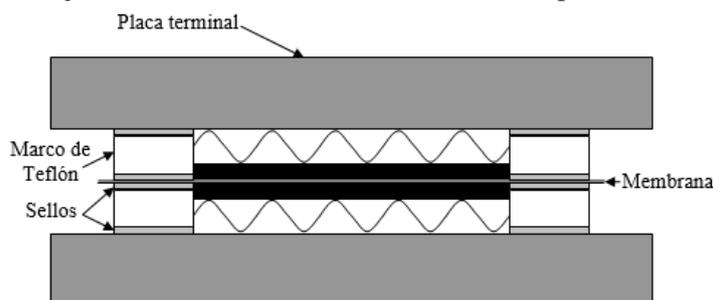


Figura 1. Pila de combustible PEM utilizada en la caracterización de los estados de operación de la pila.

Para controlar los flujos, temperatura, humedad y presión de los gases anódicos y catódicos, y la resistencia eléctrica entre cátodo y ánodo, así como medir la intensidad y tensión generada por la pila de combustible, se utilizó la estación integral desarrollada en el LERH-CSIC (Agila *et al.*, 2007), Fig. 2.

¹ Laboratorio de Energías Renovables e Hidrogeno del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España.

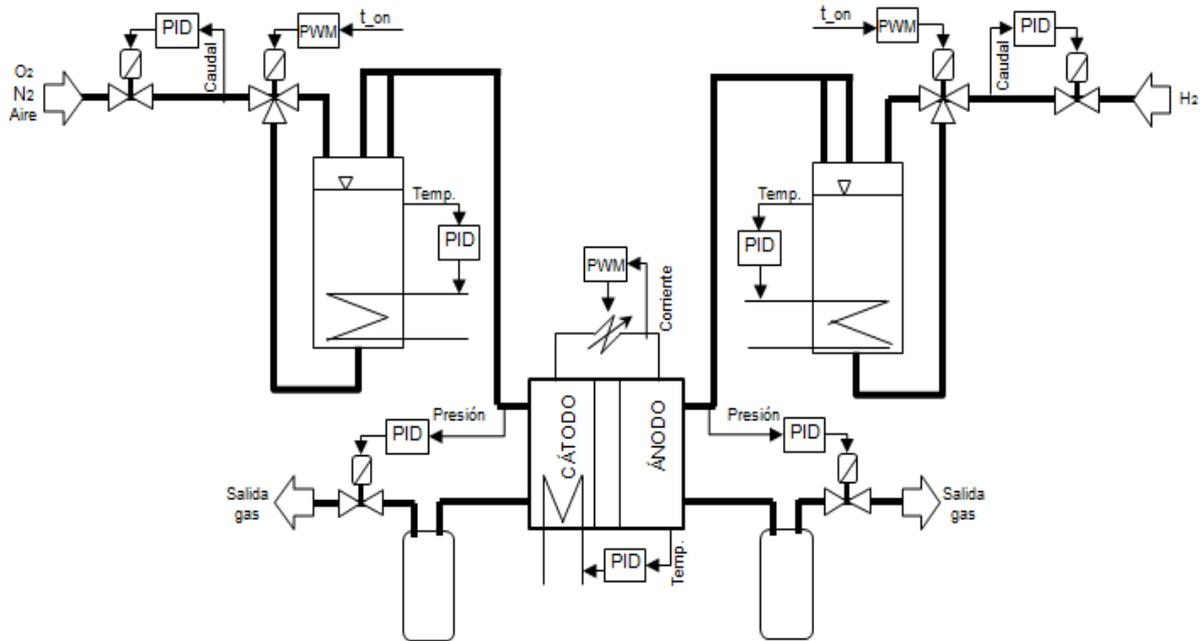


Figura 2. Diagrama de la estación de ensayos utilizada.

2.2. Desarrollo de la experimentación

Se han elegido tres estados de operación de la pila de combustibles. Estos estados son: SECO, NORMAL e INUNDADO. La diferencia entre ellos es en el grado de agua contenido en la membrana polimérica de la pila de combustible PEM. Las condiciones estándares de operación de la pila (Larminie & Dicks, 2000), describen el estado normal, mientras que las condiciones correspondientes a los estados seco e inundado han sido provocados de manera intencional.

El plan de experimentación está basado fundamentalmente en aplicar a la pila de combustible diferentes perturbaciones, posteriormente su respuesta eléctrica voltaje-intensidad (V-I) en el tiempo es analizada. Las perturbaciones propuestas son: a) Salto de carga, corresponde a un delta intensidad en aumento y disminución, cuyo valor es 40 mA; b) Oscilaciones de intensidad, corresponde a una frecuencia de variación de un valor pequeño de intensidad aplicado al punto de carga solicitado; y, c) Salto de caudal, corresponde a un delta caudal en suministro de oxígeno en el cátodo en aumento y disminución, su valor mantiene relación directa con el caudal de referencia.

Las perturbaciones se han aplicado en tres puntos diferentes de la curva de polarización V-I (Larminie & Dicks, 2000). El primer punto se corresponde a la corriente de cortocircuito (I_{cc}), comprendida en la zona de difusión; el segundo punto se corresponde a la zona de pérdidas óhmicas, mitad de corriente de cortocircuito ($I_{cc/2}$); finalmente, el tercer punto se corresponde a la zona de activación, décima parte de corriente de cortocircuito ($I_{cc/10}$). De esta manera se tiene información global del comportamiento eléctrico de la pila de combustible PEM.

2.3. Análisis de series temporales

Se pretende encontrar características o patrones que sean: similares entre distintos casos de un mismo estado, pero suficientemente diferentes entre casos de distintos estados. Luego, estas características se emplean para determinar en qué estado opera la pila.

Así, en el análisis de la evolución del voltaje en el salto de carga, Fig. 3 izquierda. Ante el aumento de carga la caída de tensión es mayor en el estado inundado que en los otros dos estados. Los resultados hacen pensar que los valores finales de los voltajes en estado estable, se deben más a los valores de carga aplicados que al propio estado de la pila. Por ello, se propone trabajar con el voltaje normalizado, esto permite comparar con fiabilidad el voltaje entre distintos niveles, e incluso, en distintos sentidos, aumento o disminución de carga.

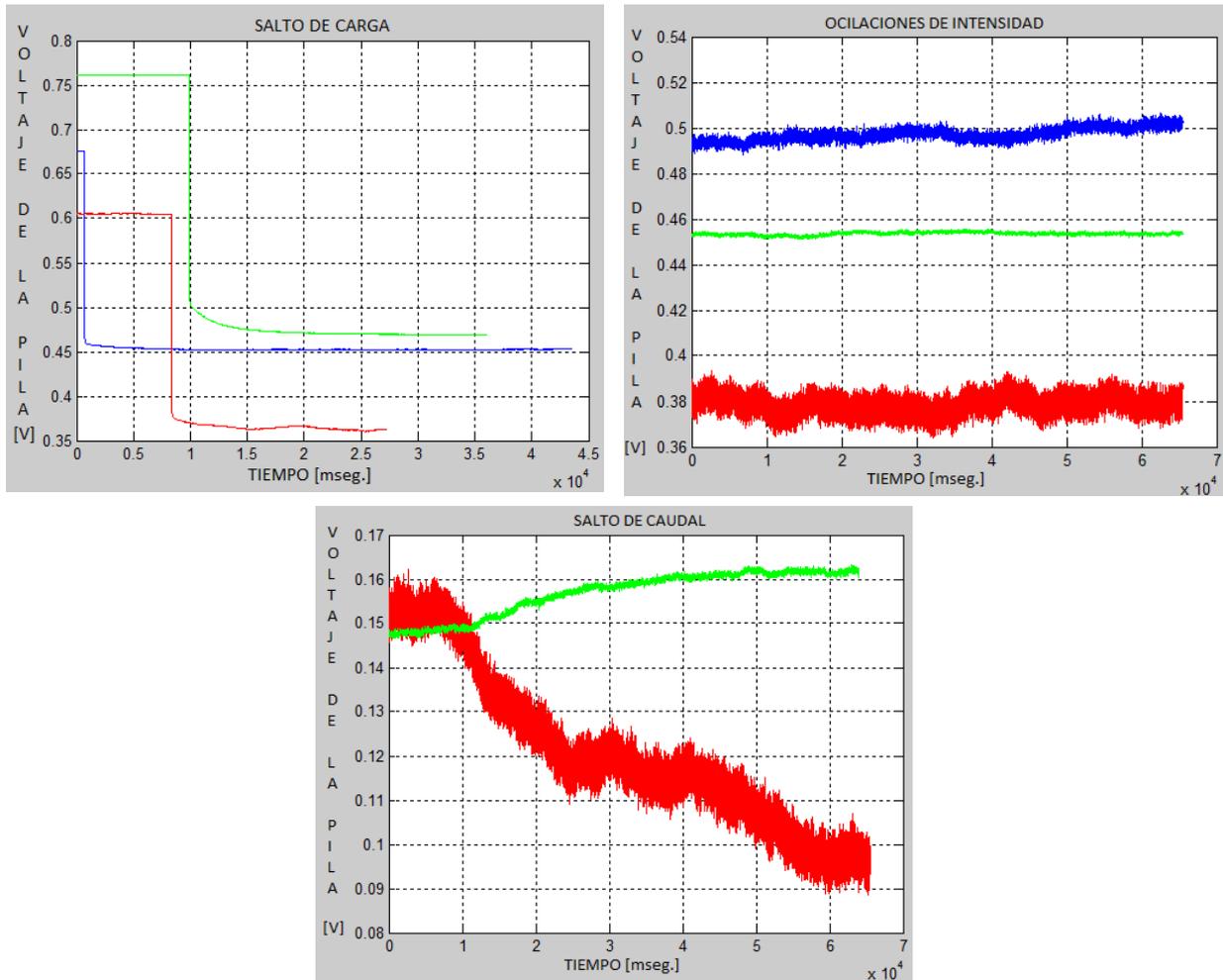


Figura 3. Evolución temporal del voltaje generado por la pila de combustible en sus tres estados de operación (rojo-estado seco; azul-estado normal; verde-estado inundado), y bajo la influencia de las diferentes perturbaciones: salto de carga, oscilaciones de intensidad y salto de caudal.

El análisis de la evolución del voltaje bajo las oscilaciones de solicitud de intensidad se demuestra en la Fig. 3. En esta figura se encuentra una característica que diferencia a los tres estados, esto es, a mayor grado de humedad en la pila menor es la amplitud de oscilación del voltaje generado por la misma, curva-verde. Sin embargo, a menor grado de humedad en la pila, mayor es la amplitud de oscilación del voltaje, curva-rojo.

Para el análisis de la evolución del voltaje en el salto de caudal, la Fig. 3 indica que aumentos de caudal provocan la caída del voltaje generado por la pila, sin embargo, ante disminuciones de caudal, el efecto es justo lo contrario.

3. MODELO LINGÜÍSTICO PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLOS

3.1. Adquisición del conocimiento

Con el objetivo de ajustar con la máxima precisión el conocimiento a integrar en los algoritmos de razonamiento en la toma de decisiones, en este apartado se procede a extraer los patrones característicos a cada estado. El “punto de cambio de pendiente” en el salto de carga, se inicia con la normalización del voltaje generada por la pila PEM. Para ello, al voltaje inicial le corresponde un

voltaje normalizado de uno, al voltaje final le corresponde un voltaje normalizado de cero, y para los demás valores, el voltaje normalizado cambia linealmente con el voltaje real obtenido, Ec. (3.1).

$$v(t) = \frac{V(t) - V_{fin}}{V_{ini} - V_{fin}} \quad (3.1)$$

donde: $v(t)$ es el voltaje normalizado en el instante t , $V(t)$ voltaje real en el instante t , V_{ini} voltaje inicial promediado de un número determinado de muestras, y V_{fin} voltaje final promediado después de transcurridas 15.000 muestras, tiempo de estabilización.

Esta normalización no permitió encontrar patrones que diferencien a cada estado. Por tanto, se analiza el punto en el cual la caída del voltaje normalizado cambia de pendiente. El significado físico del parámetro “cambio de pendiente (Δp)”, se corresponde a la velocidad de respuesta eléctrica de la pila PEM. La sensibilidad ante el cambio de carga está relacionada con el contenido de agua en la membrana polimérica.

El otro parámetro, “amplitud de oscilación de voltaje” en respuesta ante la solicitud de oscilaciones de intensidad, su magnitud es obtenido a partir de la desviación típica móvil (σ_v). Esto es, determinar la desviación típica por fracciones de n muestras, ($n < N$). Luego, estas desviaciones típicas son promediadas, Ec. (3.2).

$$\sigma_v = \frac{\sum_{i=1}^{N-n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [V(i) - \bar{V}]^2}{n}}}{N-n} \quad (3.2)$$

donde: \bar{V} es el voltaje medio de n muestras analizadas, y N es el número total de muestras.

Finalmente, el parámetro “delta voltaje (Δv)” en el salto de caudal, se corresponde a la diferencia entre el voltaje final V_{fin} , después de aplicar la perturbación, y el voltaje inicial de la pila V_{ini} , antes de aplicar la perturbación. Sin embargo, esta diferencia cambia de signo según si se produce un aumento o una disminución del salto de caudal. Por tanto, esta diferencia es dividida entre un factor corrector de signo f . El factor tendrá uno u otro signo según si la variación del voltaje es ante un aumento o disminución de caudal, Ec. (3.3).

$$\Delta V = \frac{V_{fin} - V_{ini}}{f} \quad (3.3)$$

3.2. Segmentación del espacio de estados

Se utilizó el corte borroso para la división del parámetro, ya que recoge la incertidumbre y gradualidad de la realidad. A los valores intermedios se les asigna a la vez dos estados con sus respectivos grados de pertenencia (Yager & Filev, 2001; García-Alegre *et al.*, 1991), por lo que la transición es gradual. El valor de pertenencia de un valor del parámetro para cualquier conjunto borroso es calculado a través de la Ec. (3.4), Fig. 4.

$$\mu(v) = \max \left\{ 0, \min \left(1, \frac{V_4 - v}{V_4 - V_3}, \frac{v - V_1}{V_2 - V_1} \right) \right\} \quad (3.4)$$

donde: V_1 , V_2 , V_3 y V_4 , son los vértices de un conjunto borroso (etiquetas lingüísticas), v el valor medido del parámetro, $\mu[v]$ la pertenencia del valor medido v para un conjunto borroso (Bajo, Medio, Alto).

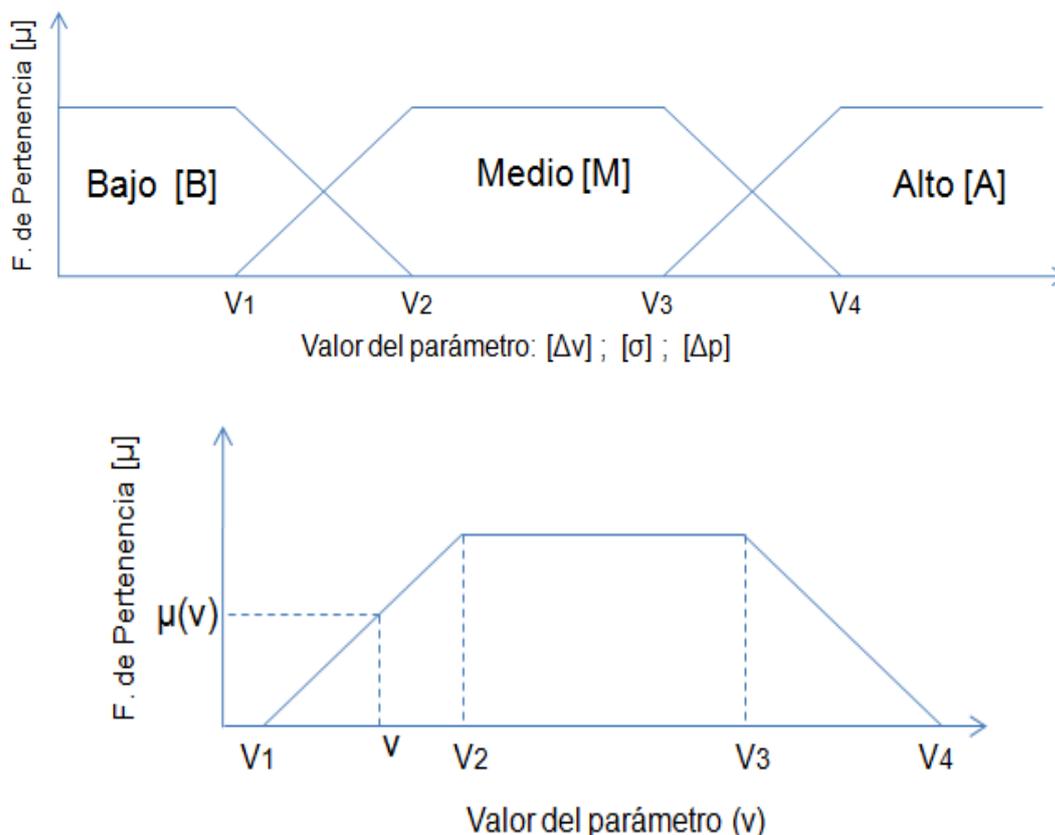


Figura 4. Representación general de: superior) el conjunto borroso (Bajo, Medio, Alto) asociado a los parámetros: amplitud de oscilación de voltaje σ_v , punto cambio de pendiente ΔP , delta voltaje ΔV , y, inferior) definición de vértices.

En la Tabla 1 se muestra los valores numéricos de los vértices de las funciones de pertenencia trapezoidal asociado a los conjuntos borrosos de las diferentes características.

Tabla 1. Valores numéricos de los vértices de los conjuntos borrosos.

PARÁMETRO	Conjuntos borrosos definidos por funciones trapezoidales	V1	V2	V3	V4
Oscilación VOLTAJE [σ_v]	Alto	0,003	0,0034	0,006	0,02
	Medio	0,002	0,0023	0,003	0,0034
	Bajo	-0,002	0,0	0,002	0,0023
Cambio Pendiente [ΔP]	Alto	0,41	0,43	0,60	0,70
	Medio	0,30	0,32	0,41	0,43
	Bajo	-0,10	0,10	0,30	0,32
DELTA voltaje [ΔV]	Negativo	-0,01	0,0	0,03	0,06
	Positivo	0,0	-0,01	-0,05	0,07

3.2. *Árbol de decisión borroso*

Esta sección, presenta el árbol de decisión borroso como técnica de clasificación para detectar los estados críticos de operación de la pila PEM, por tanto, las inferencias de conocimiento están basadas en sistemas de reglas borrosos. Para inducir el árbol de decisión desde un conjunto de datos es necesario el uso de un criterio de evaluación para cada condición del parámetro, y elegir desde estos el

apropiado como nodo inicial del árbol (García-Alegre, 2010). En el caso de estudio, la prioridad viene marcada por la fiabilidad de discriminación que tiene cada parámetro de cara a la estimación del estado de operación de la pila, quedando los parámetros en orden decreciente en prioridad: amplitud de oscilación de voltaje y punto cambio de pendiente. En función de los valores de pertenencia correspondientes al parámetro de mayor prioridad se avanza por una u otra rama, luego, en función de los valores de pertenencia del parámetro de menor prioridad, se avanza por una u otra subdivisión de la rama. Al final, tras las divisiones y subdivisiones, se llega a una estimación del estado de operación de la pila PEM (nodo terminal del árbol borroso), Fig. 5.

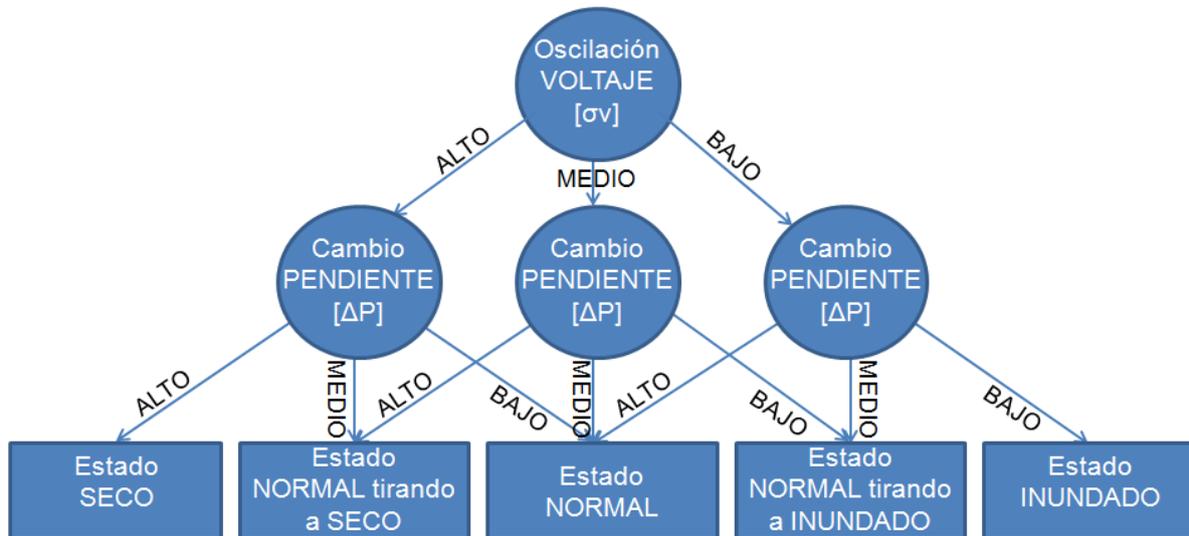


Figura 5. Árbol de decisión borroso implementado para estimar el estado de operación de la pila PEM.

El cálculo del grado de pertenencia de cada rama, procede como sigue: 1) Si para llegar al estado de operación se toman varias opciones consecutivamente (similar a un operador “and”) Ec. (3.5), entonces se multiplican los valores de sus funciones de pertenencia, Ec. (3.6); y 2) Si para llegar al estado de operación se puede ir alternativamente por varias opciones (similar a un operador “or”) Ec. (3.7), entonces se suman los valores de las funciones de pertenencia, Ec. (3.8).

$$(\sigma v)_{alto} \wedge (\Delta P)_{alto} \Rightarrow SECO \tag{3.5}$$

$$\mu(\sigma v)_{alto} \cdot \mu(\Delta P)_{alto} = \mu SECO \tag{3.6}$$

$$[(\sigma v)_{alto} \wedge (\Delta P)_{medio}] \vee [(\sigma v)_{medio} \wedge (\Delta P)_{alto}] \Rightarrow NORMAL a SECO \tag{3.7}$$

$$[\mu(\sigma v)_{alto} \cdot \mu(\Delta P)_{medio}] + [\mu(\sigma v)_{medio} \cdot \mu(\Delta P)_{alto}] = \mu NORMAL a SECO \tag{3.8}$$

Tal y como se ha planteado el árbol, en lugar de quedarse en un único estado, se considera que la pila PEM está en más de un estado a la vez, con un grado de pertenencia a cada estado. Esto permite recoger la gradualidad y la incertidumbre de la situación real de la pila PEM.

4. RESULTADOS

Para ajustar los límites de los conjuntos borrosos de cada parámetro y validar la técnica de estimación de estados críticos de operación de la pila PEM, se realizaron varias tandas de experimentación llevando a la pila a funcionar en sus tres estados de operación.

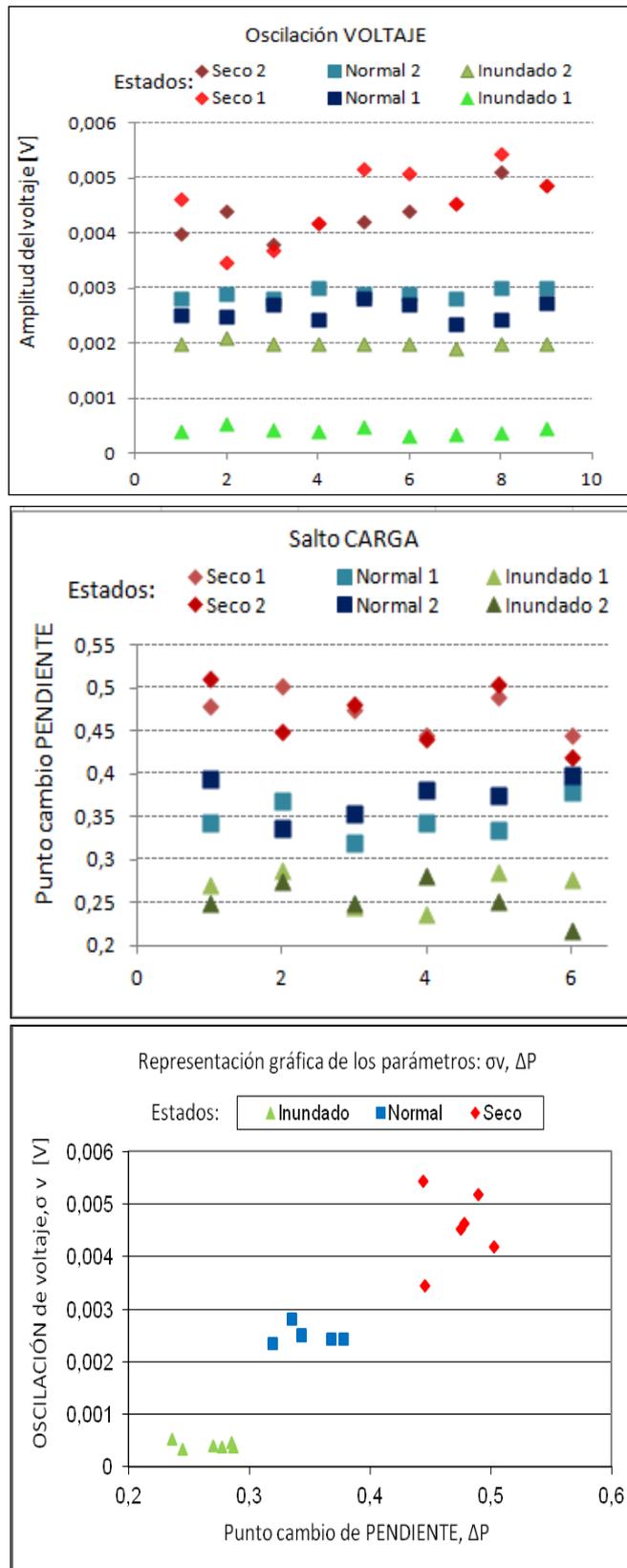


Figura 6. Reproducibilidad de los resultados obtenidos con la técnica de estimación de estados: top) amplitud de oscilación de voltaje; medio) punto cambio pendiente; abajo) representación de los valores oscilación voltaje versus punto cambio pendiente.

- La Fig. 6 (parte superior), muestra la reproducibilidad de los resultados de amplitud de oscilación del voltaje generado por la pila PEM. El estado inundado presenta diferencias entre las tandas de experimentación, lo cual se debe a que la pila se ensayó en diferentes grados de humedad.
- La Fig. 6 (centro), presenta los resultados del parámetro punto cambio de pendiente, el parámetro no presenta diferencias significativas entre las tandas de experimentos. No se obtuvieron solapamientos en los valores de los parámetros entre los estados, y sus valores permiten discernir adecuadamente el estado de operación de la pila.
- La Fig. 6 (parte inferior), muestra la representación gráfica de los parámetros con mayor fiabilidad en la estimación del estado: amplitud de oscilación de voltaje y punto de cambio de pendiente. Al estado seco le corresponden valores altos de ambos parámetros, al estado normal valores medios y al estado inundado valores bajos. De ahí, lo de emplear el árbol de decisión borroso para combinar la información entre parámetros justifica de manera rápida porque en el árbol de decisión, alto-alto corresponde a seco, medio-medio corresponde a normal y bajo-bajo corresponde a inundado. Las otras combinaciones de etiquetas en el árbol de decisión presentan cierta incertidumbre, y se corresponden a la aproximación a las regiones conocidas más cercanas.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta la implementación del sistema de estimación–percepción de estado para la detección en tiempo real de estados críticos de operación de la pila de combustible PEM. La incorporación de técnicas de decisión borrosa para la estimación de estados, da mayor robustez y exactitud al sistema, y permite obtener otras combinaciones que se aproximan a la región conocida más cercana, como es el caso de los estados: normal tirando a seco y normal tirando a inundado, esto recoge la gradualidad y la incertidumbre de la situación real de la pila PEM.

El sistema estimación-percepción de estados representa una potente herramienta, tanto para determinar el estado de operación de la pila, como para el control de estos estados. El conocer en tiempo real el estado de operación de la pila, permitirá tomar las acciones necesarias para llevar el punto de funcionamiento de la pila a lugares óptimos o salir de aquellos lugares de inestabilidad, trabajo a realizar dentro de la línea de investigación en el área de las pilas PEM.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado gracias a la colaboración del LERH, los miembros del Grupo de Investigación del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Sistemas (CIDIS) de la ESPOL y los miembros del Grupo de Investigación en Sistemas de Control y Robótica (GISCOR) de la UPS sede Guayaquil.

REFERENCIAS

- Agila, W., D. Guinea, E. Villanueva, M.C. García-Alegre, D.M. Guinea, 2007. *Test station for Proton-Exchange-Membrane fuel-cells characterization*. Patente Española. Referencia de patente: CSIC 200700544. Solicitada en 2007.
- García-Alegre, M.C., 1991. Inteligencia artificial en el control de procesos: Controladores borrosos, *Mundo Electrónico*, 214, 42-49.
- García-Alegre, M.C., J. Rivas, D. Martín, M. Santos, 2010. *Aprendizaje mediante arboles de decisión*. © RA-MA.Hombrados, J.A., L. González, M.A. Rubio, W. Agila, D. Guinea, E. Chinarro, B.

- Moreno, J.R. Jurado, 2005. Symmetrical electrode mode for PEMFC characterization by impedance spectroscopy. *Journal of Power Sources*, 151, 25-31.
- Larminie, J., A. Dicks, 2000. *Fuel cell systems explained*. John Wiley & Sons, Inc.
- Marrony, M., R. Barrera, S. Quenet, S. Ginocchio, 2008. Durability and lifetime prediction of baseline proton exchange membrane fuel cell under severe operating conditions. *Journal of Power Sources*, 182, 469-475.
- Minard, K.R., W. Viswanathan, P.D. Majors, L.Q. Wang, P.C. Rieke, 2006. Magnetic resonance imaging (MRI) of PEM dehydration and gas manifold flooding during continuous fuel cell operation. *Journal of Power Source*, 161, 856-863.
- Natarajan, D., T. Van Nguyen, 2005. Current distribution in PEM fuel cells. Part 1: Oxygen and fuel flow rate effects. *AIChE*, 51(9), 2587-2598.
- O'Hayre, R., S.W. Cha; W. Colella; F.B. Prinz, 2001. *Fuel cell fundamentals*. John Wiley & Sons, Inc.
- Rubio, MA., A. Urquia, S. Dormido, 2010. Diagnosis of performance degradation phenomena in PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 2586-2590.
- Taniguchi, A., T. Akita, K. Yasuda, Y. Miyazaki, 2008. Analysis of degradation in PEMFC caused by cell reversal during air starvation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 2323-2329.
- Wang, F.B., B.S. Jou, C.W. Li, A. Su, S.H. Chan, 2008. The effect of low humidity on the uniformity and stability of segmented PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 181, 251-258.
- Yager, R.R., D.P. Filev, 1994. *Essentials fuzzy modeling and control*. John Wiley & Sons, Inc.