

## DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA BASADOS EN PILAS DE COMBUSTIBLE

T. Escobet<sup>1</sup>, D. Feroldi<sup>2</sup>, S. de Lira<sup>1</sup>, V. Puig<sup>1</sup>, J. Quevedo<sup>1</sup>, J. Riera<sup>2</sup>, M. Serra<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Automática (ESAI), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC),  
Rambla Sant Nebridi 10, 08222 Terrassa (España)

<sup>2</sup>Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (IRI),  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)  
Parc Tecnològic de Barcelona, Edifici U, Carrer Llorens i Artigas, 4-6, Planta 2, 08028 Barcelona (España)

**RESUMEN:** *En este trabajo se presenta una metodología de diagnóstico de fallos basada en modelos para sistemas de generación de energía basados en pilas de combustible. La novedad de la metodología se basa en la caracterización de la sensibilidad relativa entre residuos. Para ejemplificar los resultados de dicha metodología se ha utilizado un modelo no lineal propuesto en la literatura y se han incluido en el mismo un conjunto de escenarios de fallos frecuentes en este tipo de sistemas. Finalmente, el trabajo presenta los resultados de diagnóstico para algunos de estos escenarios.*

**ABSTRACT:** In this work, a model based fault diagnosis methodology for PEM fuel cell based systems is presented. The innovation of this methodology is based on the characterization of the relative residuals sensitivity. To illustrate the results, a non-linear fuel cell simulator proposed in the literature is used with modifications to include typical fault scenarios. Finally, this work presents the diagnosis results corresponding to these fault scenarios.

**Palabras clave:** detección de fallos, diagnóstico de fallos, PEMFC.

**Keywords:** *Fault detection, fault diagnostic, PEMFC.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de generación de energía basados en pilas de combustible son sistemas complejos que implican fenómenos de tipo térmico, fluido y electroquímico. Además, requieren de un conjunto de elementos auxiliares (válvulas, compresor, sensores, reguladores, etc.) necesarios para hacer funcionar la pila en el punto de trabajo óptimo. Por ello, son vulnerables a fallos que pueden originar la parada o el daño permanente de la pila de combustible. Para garantizar el funcionamiento fiable, es necesario utilizar técnicas sistemáticas, como los recientes métodos de Control Tolerante a Fallos (CTF), que permiten aumentar la tolerancia a fallos de esta tecnología. La primera tarea a realizar en un sistema de control tolerante activo consiste en el diagnóstico del fallo en tiempo real, llegando no sólo al nivel de su detección y aislamiento sino también a la estimación de su magnitud.

En este trabajo se propone una metodología de diagnóstico basada en modelos como medio para diagnosticar fallos en sistemas basados en pilas de combustible. El diagnóstico de fallos basado en modelos consiste en comparar el comportamiento del sistema monitorizado mediante sensores con un modelo dinámico del mismo simulado en línea. En el caso de que se detecte una discrepancia (residuo) significativa entre el modelo y las medidas obtenidas por los sensores se asume la existencia de

un fallo. Si se dispone de un conjunto de medidas, se puede generar un conjunto de residuos (indicadores) que sean sensibles de forma diferente al conjunto de posibles fallos. Analizando en tiempo real como el fallo afecta a dichos residuos, se puede llegar a aislar el fallo, e incluso en algunos casos se puede llegar a determinar su magnitud. La novedad de la propuesta de este trabajo se basa en la utilización del análisis de sensibilidad de los residuos frente a los fallos que permita aislar fallos que de otra manera no serían separables.

La estructura de este trabajo es la siguiente: en la Sección 2, se presenta la metodología de diagnóstico propuesta. En la Sección 3, se presentan el sistema basado en pilas de combustible propuesto para ilustrar la metodología de diagnóstico así como el conjunto de escenarios de fallo que se han considerado. Finalmente, en la Sección 4 se presentan los resultados de aplicación de la metodología de diagnóstico propuesta en algunos de dichos escenarios de fallos.

### 2. FUNDAMENTOS DE LA METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO

#### 2.1. Diagnóstico basado en modelos

La metodología de diagnóstico de fallos que se utiliza en dicho artículo se fundamenta en la teoría clásica de diagnóstico basado en modelos que se describe por ejemplo, en [1]. Dicha metodología

parte de la utilización de un conjunto de indicadores de la existencia de fallos, denominados **residuos**  $r(k)$ . Dichos residuos se obtienen a partir de las medidas de las entradas  $u(k)$  y salidas  $y(k)$  del sistema monitorizado y las **relaciones analíticas** existentes entre ellas obtenidas a partir del modelo del sistema:

$$r(k) = \Psi(y(k), u(k)) \quad (1)$$

siendo  $\Psi$  la función generadora de residuos que depende del tipo de estrategia de detección utilizada (observador o ecuación de paridad). La etapa de detección en tiempo real consiste en evaluar en cada instante de tiempo la expresión de los residuos (1), utilizando las medidas de las entradas y salidas. Idealmente, dichos residuos deberían ser cero en caso de que no exista fallo, mientras que en caso de fallo serían diferentes de cero. En la práctica, debido a la existencia de ruido e incertidumbre (imprecisión) en el modelo se utiliza un umbral (determinado por ejemplo mediante técnicas estadísticas) a partir del cual se decide la existencia o no del fallo. El resultado de la evaluación de cada residuo  $r_i(k)$  frente a su test de detección permite obtener un conjunto de **firmas observadas de fallo**:

$$\phi(k) = [\phi_1(k), \phi_2(k), \dots, \phi_{n_r}(k)], \quad \text{donde cada}$$

indicador de fallo es:

$$\phi_i(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } |r_i(k)| \leq \tau_i \\ 1 & \text{if } |r_i(k)| > \tau_i \end{cases} \quad (2)$$

La firma observada del fallo la proporciona el módulo de aislamiento del fallo. Este módulo es capaz de aislar el fallo puesto que dispone de la relación existente entre el conjunto de fallos considerado  $f(k) = \{f_1(k), f_2(k), \dots, f_{n_f}(k)\}$  y el conjunto de posibles firmas de fallo observadas  $\phi_i(k)$ . Dichas relaciones se almacenan en una matriz denominada **matriz teórica de firmas de fallo (FSM)**. Cada elemento  $FSM_{ij}$  de dicha matriz es igual a 1 en caso de que el fallo  $f_j(k)$  afecte al residuo  $r_i(k)$  de tal manera que el indicador de fallos  $\phi_i(k)$  será igual a 1 cuando dicho fallo aparezca en el sistema monitorizado. En caso contrario, el elemento  $FSM_{ij}$  valdrá cero.

## 2.2 Análisis de sensibilidad

El problema que presenta la metodología de diagnóstico clásica, presentada en la sección anterior, es que pueden existir varios fallos que presenten la misma firma binaria teórica de fallos. En ese caso, para poder separar dichos fallos se debe realizar un análisis más exhaustivo, utilizando otras informaciones complementarias asociadas a la relación entre los residuos y los fallos como el signo, la sensibilidad, el orden o el tiempo activación de los indicadores de fallo [2].

En este trabajo, se propone la utilización de la información proporcionada por la sensibilidad del residuo frente al fallo para el diseño del diagnosticador. La sensibilidad, tal como la define Gertler [2]

$$S_f = \frac{\partial r}{\partial f} \quad (3)$$

proporciona una información cuantitativa del efecto del fallo sobre el residuo y una información cualitativa sobre su sentido de variación (signo). La utilización de esta información en la etapa de diagnóstico permitirá separar fallos que aún presentando la misma firma de fallos teórica binaria, presentan sensibilidades cualitativamente o cuantitativamente diferentes. Para ello, el algoritmo de diagnóstico propuesto utilizará una **matriz teórica de firmas sensibilidad FSMsensit** de los residuos frente a los fallos en lugar de una tabla de firmas de fallo binaria, de forma que en tiempo real se evaluará la sensibilidad observada frente a la teórica de cara a aislar el fallo. La sensibilidad observada se puede calcular teniendo en cuenta que el valor del residuo  $r_i(k)$  cuando aparezca el fallo  $f_j(k)$  vendrá dado por el valor de la sensibilidad  $S_{r_i f_j}$ :

$$r_i(k) = S_{r_i f_j} f_j(k) \quad (4)$$

## 3. METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO PROPUESTA

La utilización de **FSMsensit** requiere conocer la magnitud del fallo o poder realizar una estimación del mismo. Para solucionar este problema, en el presente artículo se propone diseñar el diagnosticador utilizando el nuevo concepto de sensibilidad relativa en lugar de la sensibilidad absoluta (3). La sensibilidad relativa se define como:

$$S_{r_i f_j}^{rel, obs} = \frac{S_{r_i f_j}}{S_{r_1 f_j}} = \frac{r_i(k) f_j(k)}{r_1(k) f_j(k)} = \frac{r_i(k)}{r_1(k)} \quad (5)$$

la cual se corresponde con el ratio de cada residuo  $r_i(k)$  respecto a uno de los residuos, por ejemplo,  $r_1(k)$ . Por lo tanto, la sensibilidad relativa será insensible a la magnitud de fallo que es desconocida.

Utilizando el concepto de sensibilidad relativa, se propone la generación de una nueva FSM, denominada **FSMsensit\_rel**, matriz teórica de firmas de fallos basada en sensibilidades relativas. Un elemento de la matriz teórica de firmas de sensibilidad relativa  $FSMsensit\_rel_{ij}$ , vendrá dada por

$$S_{r_i f_j}^{rel, teo} = \frac{S_{r_i f_j}}{S_{r_1 f_j}} = \frac{\partial r_i(k) / \partial f_j(k)}{\partial r_1(k) / \partial f_j(k)} \quad (6)$$

de forma que dicha matriz quedará como se muestra en la Tabla 1.

El algoritmo de diagnóstico consistirá en evaluar en tiempo real las sensibilidades relativas observadas a partir de (5), como ratio de residuos, lo que proporcionará un vector en el espacio de ratios. El vector generado se comparará con los vectores de fallo teóricos almacenados en la matriz de sensibilidades relativas. El vector de fallo teórico que presente una distancia mínima con el vector de fallo observado se postulará como posible fallo:

$$\min \{d_{f_1}(k), \dots, d_{f_n}(k)\} \quad (7)$$

donde la distancia se calcula a partir de la distancia euclídea entre vectores:

$$d_{f_i}(k) = \sqrt{(S_{r_2/f_i}^{rel,obs} - S_{r_2/f_i}^{rel,teo})^2 + \dots + (S_{r_m/f_i}^{rel,obs} - S_{r_m/f_i}^{rel,teo})^2}$$

**Tabla 1.** Matriz teórica de firmas de fallo de sensibilidades relativas respecto a  $r_1$ .

	$f_1$	$f_2$	...	$f_n$
$r_2/r_1$	$S_{r_2/f_1}^{rel,teo}$	$S_{r_2/f_2}^{rel,teo}$	...	$S_{r_2/f_n}^{rel,teo}$
$r_3/r_1$	$S_{r_3/f_1}^{rel,teo}$	$S_{r_3/f_2}^{rel,teo}$	...	$S_{r_3/f_n}^{rel,teo}$
...	...	...	...	...
$r_m/r_1$	$S_{r_m/f_1}^{rel,teo}$	$S_{r_m/f_2}^{rel,teo}$	...	$S_{r_m/f_n}^{rel,teo}$

#### 4. PILAS DE COMBUSTIBLE

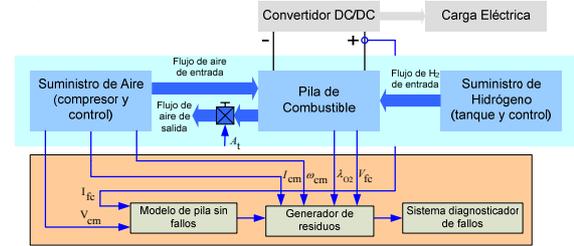
##### 4.1. Descripción del sistema

El trabajo presentado utiliza el modelo no lineal propuesto por Pukrushpan et al. [3] para representar el comportamiento de una pila de combustible PEM. Los principales componentes del sistema (Fig. 1) son la pila de combustible, el compresor, el colector de aire, el colector de hidrógeno y el colector de retorno. El sistema de alimentación de aire (compresor y colector de aire) tiene como principal objetivo mantener constante la presión parcial del oxígeno en el cátodo. Una variable importante es el ratio de exceso de oxígeno definido como:

$$\lambda_{O_2} = O_2 \text{ suministrado} / O_2 \text{ reaccionado}$$

El modelo incluye los fenómenos transitorios del compresor, la dinámica de los colectores del ánodo y del cátodo, las presiones parciales de los reactivos, y la humidificación de la membrana. La tensión de la pila  $V_{fc}$  se calcula a partir de la corriente de carga  $I_{fc}$ , las presiones parciales de hidrógeno y oxígeno, la temperatura de la pila y el contenido de agua de la membrana. En las condiciones de operación normal, se parte de la hipótesis de que se realiza un perfecto control de la temperatura de la pila y de la humidificación del aire a la entrada del cátodo de la pila. La temperatura atmosférica y la presión son consideradas como perturbaciones externas del sistema.

El sistema presenta dos lazos de regulación: mediante un lazo interno se regula el flujo de hidrógeno y mediante un lazo externo se regula el exceso de oxígeno,  $\lambda_{O_2}$ , como una medida indirecta para controlar la eficiencia de la PEM, tal como se propone en [2 y 4]. El objetivo del control de flujo de hidrógeno es minimizar la diferencia de presión del cátodo y el ánodo. La regulación de  $\lambda_{O_2}$  se consigue manipulando el flujo de salida de aire del cátodo y la tensión aplicada al compresor  $V_{cm}$ , por ello el modelo incorpora una servoválvula de área variable,  $A_r$ , a la salida del conducto de aire. La corriente de la pila,  $I_{fc}$ , es considerada como una perturbación conocida del sistema. El sistema dispone además de medidas de la corriente del compresor,  $I_{cm}$ , y de su velocidad,  $\omega_{cm}$ . La Fig. 1 muestra un esquema del sistema PEM, junto con las variables disponibles para realizar el control y la supervisión del mismo.



**Fig. 1.** Esquema del sistema.

##### 4.2. Descripción de los fallos a detectar.

Los hipotéticos fallos considerados en este trabajo, se describen en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Descripción de los fallos

Fallo	Descripción
<b>f1</b>	Incremento del rozamiento en el motor del compresor.
<b>f2</b>	Sobrecalentamiento en el motor del compresor.
<b>f3</b>	Aumento de la resistencia fluidica por obturación de canales o por inundación de la capa difusora en la pila.
<b>f4</b>	Fuga de aire en el colector de alimentación.
<b>f5</b>	Aumento del valor de tensión por debajo del cual no gira el motor.
<b>f6</b>	Aumento de la temperatura por malfuncionamiento de su controlador.

La simulación de cada escenario de fallo descrito se logra mediante adaptación del modelo desarrollado en [3]. Las variables de salida o variables medidas del sistema y, consecuentemente, generadoras de residuos son  $\lambda_{O_2}$ ,  $\omega_{cm}$ ,  $I_{cm}$  y  $V_{fc}$ . Además, se ha incorporado al modelo el algoritmo de detección de fallos descrito en el apartado 2.

#### 5. RESULTADOS

##### 5.1. Obtención de $FSM_{sensit\ rel}$

Mediante las medidas disponibles se obtienen 4 residuos:  $r_1 = \lambda_{O_2} - \hat{\lambda}_{O_2}$ ,  $r_2 = V_{st} - \hat{V}_{st}$ ,  $r_3 = I_{cm} - \hat{I}_{cm}$

y  $r_4 = \omega_{cm} - \hat{\omega}_{cm}$ . Utilizando el modelo de simulación, se ha evaluado la sensibilidad, en estado estacionario, de cada residuo al conjunto de fallos a detectar. Mediante dichos datos se han determinado los valores de  $FSMsensit\_rel$  cuyos valores se muestran en la Tabla 3. Se observa que de utilizarse en este caso la matriz de firmas de fallos binaria, los fallos no serían aislables.

**Tabla 3.** Valores de la matriz teórica  $FSMsensit\_rel$

	$r_2/r_1$	$r_3/r_1$	$r_4/r_1$
$f_1$	1	0.8544	1
$f_2$	0.8238	1	0.9377
$f_3$	0.118	0,197	-0.1277
$f_4$	0.6428	0.2061	-0.1336
$f_5$	0.0361	0.0395	0.1685
$f_6$	-0.2208	0.1512	-0.098

Por otra parte, considerando la matriz de sensibilidades relativas se observa que los fallos descritos en la tabla 1 son aislables, cumpliéndose la condición:

$$S_{r_i r_j}^{rel,teo} \neq S_{r_i r_k}^{rel,teo} \text{ para todo } j \neq k$$

Al representar en un espacio tridimensional los valores de  $r_2/r_1$ ,  $r_3/r_1$  y  $r_4/r_1$ , respecto a cada uno de los fallos evaluados, se obtienen los puntos coloreados de la Fig. 2. Se observa que no hay superposición de los puntos obtenidos, deduciéndose que los seis fallos considerados son diagnosticables.

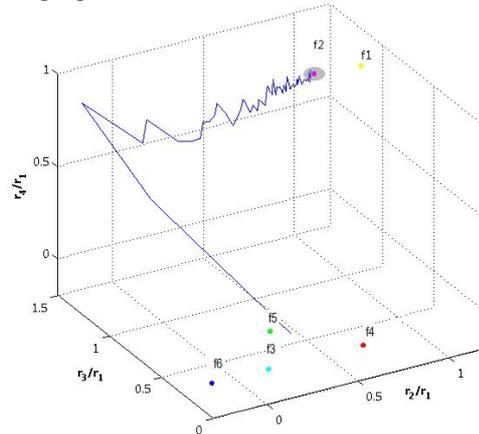
**5.2. Diagnóstico**

Con el objetivo de evaluar la metodología presentada, se ha introducido en el conjunto modelo de simulación y diagnosticador (Fig. 1), los fallos considerados, obteniéndose, en todos ellos un correcto diagnóstico. Como ejemplo, se muestran los resultados obtenidos en el caso de producirse  $f_2$ . En el apartado 2.2, se ha indicado que el diagnóstico de fallos sería el resultado de evaluar la distancia mínima entre el vector de fallo teórico y el vector de fallo observado. La Fig. 3 presenta la evolución de la distancia del vector de fallos observado para cada uno de los vectores de fallo teóricos a partir del instante de tiempo en que se ha detectado la presencia de un fallo. Se puede observar que, desde el instante de detección, la mínima distancia corresponde al fallo  $f_2$ . Por lo tanto el diagnóstico que proporciona la metodología propuesta indica el fallo producido una vez a sido detectado.

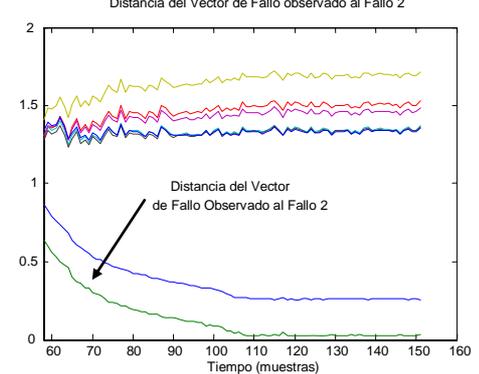
**6. CONCLUSIONES**

En este trabajo se presenta una metodología de diagnóstico de fallos basada en modelos en sistemas de generación de energía basados en pilas de combustible. La novedad de dicha metodología se basa en la caracterización de la sensibilidad de los

residuos y el establecimiento de ratios para insensibilizarlos de la magnitud del fallo. Para ejemplarizar los resultados de dicha metodología se ha utilizado el modelo presentado en la literatura por Pukushpran y se han incluido en el mismo un conjunto de escenarios de fallos típicos. La metodología propuesta permite diagnosticar los 6 fallos propuestos.



**Fig. 2.** Vectores teóricos de fallo (puntos) y evolución del vector observado (azul).



**Fig. 3** Evolución de las distancias entre los vectores de fallo teóricos y el vector de fallo observado.

**Agradecimientos**

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Agencia Catalana de Investigación de la Generalitat de Catalunya (Grup SAC ref. 2005SGR00537) y por el Ministerio de Educación y Ciencia (proyectos CICYT ref. DPI-2005-05415 y ref. DPI2007-62966) y con el apoyo del Departamento de Universidades, Investigación y Sociedad de la Información y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

**Bibliografía**

- [1] J. J. Gertler, "Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems". Marcel Dekker, 1998.
- [2] V. Puig, J. Quevedo, T. Escobet, J. Meseguer, "Towards a Better Integration of Passive Robust Interval-Based FDI Algorithms" en *6th IFAC SAFEPROCESS, 2006*.
- [3] J. Pukrushpan, H. Peng, A. Stefanopoulou, en *Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control* 126, 2004, 14–25.
- [4] D. Feroldi, M. Serra, J. Riera, en *Journal of Power Sources* 169, 2007, 205–212.
- [5] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, H. Peng, en *Control of Fuel Cell Power Systems*, Springer Verlag, London, UK.