

Capítulo 8 Revisión del estado del arte de celdas de combustible de membrana de intercambio de protones para aplicaciones móviles

Chapter 8 Review of the state of the art of proton exchange membrane fuel cells for mobile applications

CERVERA-CEBALLOS, María†*, RODRÍGUEZ-BLANCO, Marco A. y VAZQUEZ-ÁVILA, José L.

Universidad Autónoma del Carmen, Facultad de Ingeniería y Tecnología. Calle 56 No. 4 Esq. Avenida Concordia Col. Benito Juárez C.P. 24180 Cd. del Carmen, Campeche, México

ID 1^{er} Autor: *María, Cervera-Ceballos* / **ORC ID:** 0000-0002-5830-0407, **Researcher ID Thomson:** P-7234-2019, **CVU CONACYT ID:** 166309

ID 1^{er} Coautor: *Marco A., Rodríguez-Blanco* / **ORC ID:** 0000-0003-3641-6895, **Researcher ID Thomson:** U-6476-2017, **CVU CONACYT ID:** 51908.

ID 2^{do} Coautor: *José, Vazquez-Avila* / **ORC ID:** 0000-0002-9654-2431, **Researcher ID Thomson:** P-7994-2019; **CVU CONACYT ID:** 102415.

DOI: 10.35429/H.2019.1.71.83

M. Cervera, M. Rodríguez y J. Vázquez

*mcervera.mc@gmail.com

O. Benavides (Dir.). Ingeniería. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Campeche, 2019.

Resumen

En este trabajo se realiza una revisión de la literatura sobre las celdas de combustible de membrana de intercambio de protones PEMFC en el que se presentan los subsistemas de control: subsistemas de reacción, térmico, de gestión del agua y electrónica de potencia. Con relación a lo anterior se hace mayor énfasis, por un lado, a las oportunidades de investigación de cada subsistema, y por otro lado a las estrategias de control que se han propuesto para evitar la falta de oxígeno y asegurar la eficiencia de la PEMFC. En este sentido, las estrategias van desde control de avance y retroalimentación, lógica difusa, redes neuronales, control adaptable, control predictivo y modos deslizantes, así mismo se describe las ventajas y desventajas de cada control con respecto a una aplicación móvil como lo puede ser un vehículo autónomo de pequeñas dimensiones que utiliza un motor de cd como elemento impulsor, conectado a un “stack” de PEMFC.

Celdas de combustible, Membrana de Intercambio de Protones, Estrategias de control, Relación de exceso de oxígeno

Abstract

In this work, a review of the literature of proton exchange membrane fuel cells PEMFC relating to various control subsystems such as reaction, thermal, water management and power electronics subsystems are presented. The research opportunities of subsystems and the control strategies that have been considered to avoid the oxygen starvation and ensure high efficiency of the PEMFC. The control strategies are forward and feedback control, fuzzy logic, neural networks, adaptive control, predictive control and sliding modes, as well as the advantages and disadvantages of each control concerning to a mobile application such as an autonomous vehicle of small dimensions that use a DC motor, connected to a PEMFC stack.

Fuel cells, Proton Exchange Membrane, Control strategies, Excess oxygen ratio, sliding modes

Introducción

Las celdas de combustible de hidrógeno son una de las tecnologías que han tomado gran interés en los últimos años ya que utilizan el hidrógeno como combustible para generar energía. Son fuentes de energías prometedoras y renovables con alta eficiencia energética y bajas emisiones (Hames et al, 2018), lo que las convierte en una alternativa en diversas aplicaciones, por ejemplo, en los vehículos eléctricos.

Existen diferentes tipos de celdas de combustible según el tipo de electrolito (Thounthong et al., 2005; Mebarki et al., 2016), celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC), celda de combustible de carbonato fundido (MCFC), celda de combustible de óxido sólido (SOFC) y celda de combustible de combustible alcalina (AFC) y celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC), el tipo de celda va a depender de la aplicación de interés sin embargo, para lograr un correcto funcionamiento del sistema con celdas de combustible, satisfacer las demandas de carga, evitar daños a los componentes internos además de la reducción de costos y la mejora del rendimiento, se deben resolver distintos problemas de control. Los tres sistemas principales de control que se deben regular son: el suministro de aire/combustible, el suministro de agua y la gestión del calor (Zumoffen et al., 2010; Feroldi et al., 2006)).

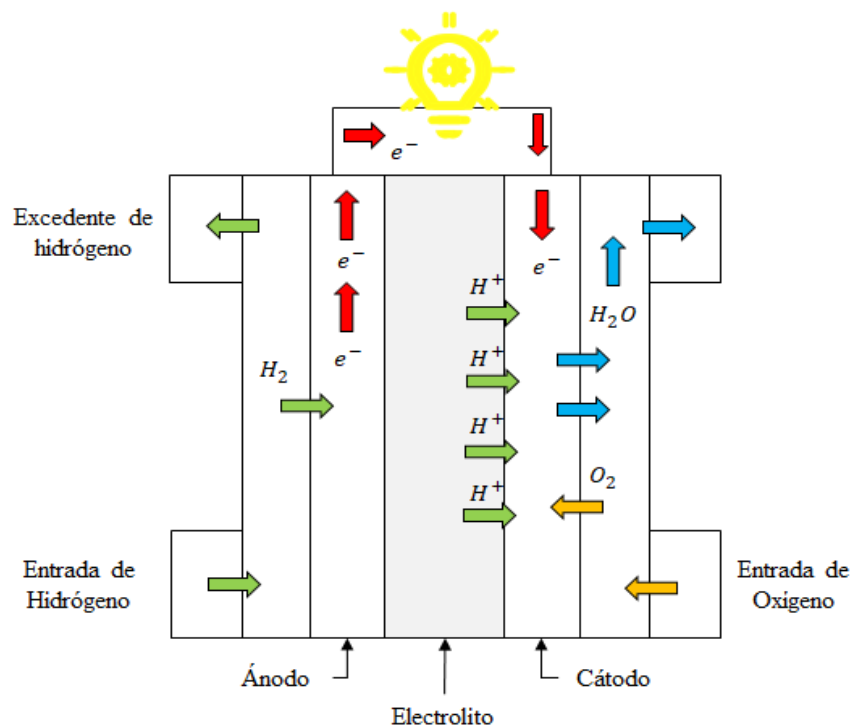
En este trabajo se presenta una revisión de la literatura de las celdas de combustibles y las estrategias de control que han sido propuestas para mejorar la eficiencia de la celda en aplicaciones móviles en donde se utiliza un vehículo autónomo de pequeñas dimensiones con un motor de CD como sistema impulsor.

Estructura básica y principio de funcionamiento de PEMFC.

En una celda de combustible, se produce electricidad mediante la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno formando agua. Tienen una gran similitud con las baterías clásicas porque ambas generan energía. Sin embargo, la energía eléctrica entregada por las baterías clásicas depende de los reactivos almacenados en ella, una vez que estos se terminen, dejará de producir electricidad teniendo que reemplazarla o recargarla. Por otro lado, las celdas de combustible entregan energía de forma constante mientras se les suministre combustible y oxígeno (Albarghot et al., 2017; Daud et al., 2017; Barbir, 2005).

La estructura básica de una celda de combustible (FC) está compuesta por dos electrodos, un ánodo por donde se suministra el hidrógeno y un cátodo en donde entra el oxígeno, los cuales se encuentran separados por un electrolito (ver figura 8.1).

Figura 8.1 Estructura de una celda de combustible



En el ánodo se oxida el hidrógeno separándose en electrones y protones. Los protones se trasladan al cátodo a través de la membrana, mientras que los electrones fluyen a través de un circuito externo, creando electricidad. En el cátodo se combinan los electrones procedentes del circuito externo y los protones que pasaron a través de la membrana con el oxígeno produciendo agua. La celda de combustible proporciona un voltaje muy pequeño, aproximadamente 0.7 V/celda dependiendo de las condiciones de operación y carga, para obtener mayor voltaje se apilan múltiples celdas en serie formando una pila o *stack* (en inglés) de celdas de combustible (Larminie et al., 2003). El voltaje total de la pila es el número de celdas multiplicado por el voltaje de celda promedio (Pukrushpan et al., 2004) Por otra parte, se puede utilizar un convertidor CD/CD como acondicionador de energía para elevar el voltaje de la celda de combustible (Somkun et al., 2015).

Tipos de celdas de combustible

Existen diferentes tipos de celdas de combustible que pueden ser elegidas dependiendo de su aplicación, por ejemplo, en los vehículos eléctricos o vehículos espaciales, usos portátiles y en las instalaciones fijas. Se clasifican según el tipo de electrolito que usan: *celda de combustible de membrana de intercambio de protones* (PEMFC), *celda de combustible de ácido fosfórico* (PAFC), *celda de combustible de carbonato fundido* (MCFC), *celda de combustible de óxido sólido* (SOFC) y *celda de combustible de combustible alcalina* (AFC). En la Tabla 1 se muestran los diferentes tipos de celdas de combustible con respecto al el tipo de electrolito, la temperatura de operación, su aplicación y su eficiencia. (Gao et al., 2013; Cano, 1999).

Tabla 8.2 Tipos de celda de combustible

Tipo de celda	Electrolito	Temperatura de operación (°C)	Eficiencia (cogeneración)	Aplicaciones
PEMFC	Membrana de polímero conductora de protones	80	40% (70%)	Son adecuadas para aplicaciones en automóviles y otros vehículos espaciales.
PAFC	Ácido fosfórico	≈200	40% (80%)	Usadas en clínicas, hospitales, hoteles, edificios, escuelas, plantas eléctricas y terminales aeroportuarias.
MCFC	Carbonato fundido	600-800	45% (70%)	Aplicaciones estacionarias en servicios públicos y empresas, proporcionando energía primaria y energía de respaldo.
SOFC	Óxido sólido	800-1000	50% (80%)	Aplicaciones de potencia, incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial
AFC	Solución de Hidróxido de potasio diluido.	60-250	60%	Aeroespacial. Militar

Algunas ventajas y desventajas de los diferentes tipos de celdas de combustible se mencionan en la Tabla 2 (

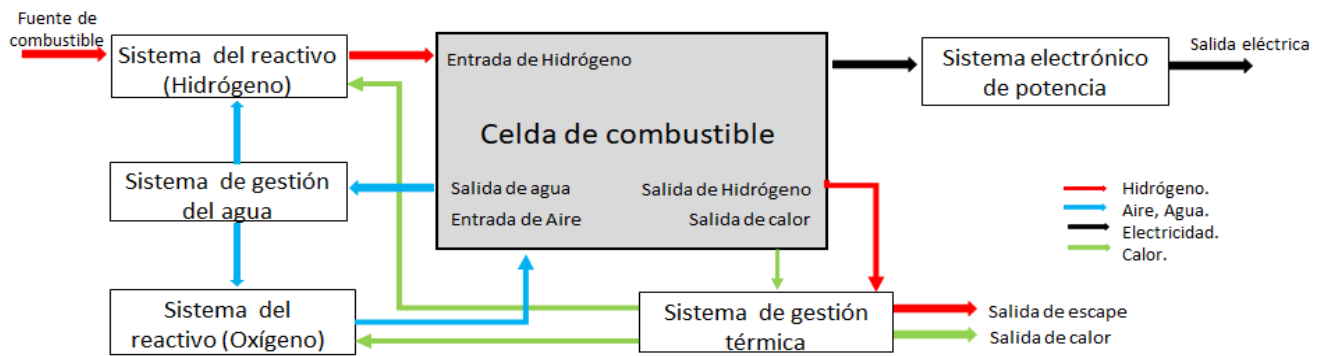
Tabla 8.2 Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de celdas

Tipo de celda	Ventajas	Desventajas
PEMFC	<ul style="list-style-type: none"> - Funciona a bajas temperaturas. - El manejo y el ensamblaje son menos complejos que en los otros tipos de celdas. - Utilizan un electrolito no corrosivo. - Puedan utilizar el aire atmosférico. - Emplean un electrolito sólido y seco, por lo que elimina la manipulación de líquidos y los problemas de reabastecimiento. - Alta tensión, intensidad de corriente y densidad. - Buena tolerancia a la diferencia de presión de los reactivos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja tolerancia a las partículas de azufre. - Necesitan unidades de humidificación de gases reactivos. - La temperatura baja dificulta la gestión térmica, especialmente a densidades de corriente muy altas. - La gestión del agua es otro desafío ya que se debe garantizar una hidratación suficiente del electrolito y evitar la inundación.
PAFC	<ul style="list-style-type: none"> - Pueden usar aire directamente de la atmósfera. - Mientras trabajan a temperatura media, pueden utilizar el calor residual para la cogeneración. - Utilizan un electrolito con características estables y baja volatilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Electrolito líquido, corrosivo. - Permiten la entrada de agua que puede diluir el electrolito ácido. - Son grandes y pesadas. - Deben alcanzar una cierta temperatura antes de comenzar a trabajar. - Materiales costosos en la celda.
MCFC	<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiencia - No se necesitan electrocatalizadores caros. - Residuos de calor de alta calidad para la cogeneración. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere materiales resistentes a la corrosión. - Intolerancia al azufre. - Electrolito muy corrosivo.
SOFC	<ul style="list-style-type: none"> - Las reacciones químicas son muy rápidas. - Tienen una alta eficiencia. - Trabajan en densidades de corriente superiores a las celdas de combustible de carbonato fundido. - El electrolito es sólido. - Los materiales utilizados son modestos en costo. - La alta temperatura de operación permite el uso de la mayor parte del calor residual para cogeneración. 	<ul style="list-style-type: none"> - Intolerancia moderada al azufre. - No es una tecnología madura. - La alta temperatura de operación impone severas restricciones en la selección de materiales y resulta en procesos de fabricación difíciles.
AFC	<ul style="list-style-type: none"> - Trabajan a baja temperatura - Tienen un comienzo rápido. - Alta eficiencia - No tienen problemas de corrosión. - Operación simple. - Bajo peso y volumen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Intolerantes al CO₂. - El oxidante debe ser oxígeno puro o aire libre de CO₂. - El combustible debe ser hidrógeno puro. - Electrolito líquido. - Tienen una vida relativamente corta.

Componentes auxiliares

Para que la celda de combustible tenga un funcionamiento adecuado se requiere de subsistemas auxiliares (Kunusch et al., 2012). En la figura 8.2 se muestra el diagrama esquemático de una PEMFC en donde se observan los subsistemas de reactivos (hidrógeno y oxígeno), el subsistema de gestión del agua, el subsistema de gestión térmica y el subsistema de gestión de la energía.

Figura 8.2 Diagrama esquemático del sistema PEMFC



Fuente de consulta (Daud et al., 2017)

a. Subsistema de gestión del agua

Este se encarga de regular el uso de agua en el sistema. Se encarga de la humidificación de los gases reactivos para mantener la membrana de la celda de combustible hidratada. Las membranas secas y las celdas de combustible inundadas causan altas pérdidas de polarización. Se puede producir una caída del voltaje del 20 al 40% si no hay un control de humidificación adecuado (Biichi et al., 1997).

b. Subsistema de gestión térmica

Este subsistema se requiere para mantener una temperatura óptima en la celda de combustible. Una temperatura muy alta puede dañar la membrana de la celda. Además, si la temperatura no es uniforme puede causar variaciones en las velocidades de reacción electroquímica, afectar la evaporación y condensación del agua en los gases reactivos (Daud et al., 2017).

c. Subsistema de gestión de energía

El subsistema de energía es necesario para cumplir con los requisitos de carga. Se pueden emplear convertidores elevadores o reductores CD/CD para proporcionar valores de voltaje específicos. Así como un convertidor CD/CA para convertir la corriente continua CD a una corriente alterna CA con frecuencia variable, entre otros dispositivos.

d. Subsistema de reactivos.

La celda de combustible se alimenta por hidrógeno y oxígeno. El objetivo de este subsistema es suministrar los reactivos a la celda de combustible. El hidrógeno puede ser entregado a partir de un tanque de hidrógeno presurizado mientras que el suministro de oxígeno utiliza un compresor, un soplador o un tanque de aire comprimido. Algunos problemas en el subsistema son: la falta de presión de combustible u oxígeno para suministrar las diferentes demandas de carga que pueden requerirse lo que provoca una caída de voltaje. Si existe una escasez de reactivos los materiales de la celda podrían dañarse (Garcia et al., 2010). En la literatura se propone regular la cantidad de exceso de oxígeno para evitar la falta de oxígeno.

Control de las celdas de combustible

Control en el suministro de oxígeno

El control en el suministro de aire de una celda de combustible PEM ante diferentes cambios en la demandada de carga es importante para garantizar un buen funcionamiento dinámico y prevenir la falta de oxígeno. La cantidad de oxígeno baja cuando la corriente demandada por la carga aumenta, esto causa caídas de voltaje, además puede dañar la membrana y reducir la eficiencia del sistema FC. A este fenómeno se le conoce mayormente como *oxygen starvation*.

Una manera eficiente de garantizar el nivel adecuado de oxígeno es regulando la *relación de exceso de oxígeno* λ_{O_2} , (Zumoffen, et al., 2010; Pukrushpan et al., 2009; Glazer et al., 2013) definida como:

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,in}}{W_{O_2,reacted}} \quad (1)$$

Donde $W_{O_2,in}$ es el flujo de oxígeno ingresado en el cátodo que depende del flujo de aire liberado por el compresor y $W_{O_2,reacted}$ es el flujo consumido debido a la reacción electroquímica que está relacionado con la corriente total de pila I_{st} . A partir de las ecuaciones (2) y (3) se realiza el cálculo de $W_{O_2,in}$ y $W_{O_2,reacted}$ considerando un valor óptimo para λ_{O_2} igual a 2 (Pukrushpan et al., 2009). El flujo de oxígeno que entra en el cátodo se calcula como:

$$W_{O_2,reacted} = M_{O_2} \frac{nI_{st}}{4F} \quad (2)$$

Donde $M_{O_2} = 32 \times 10^{-3} \text{ Kg/mol}$ es la masa molar de oxígeno, n es el número de celdas y $F = 96,485 \text{ C/moles}$ la constante de Faraday. El cálculo del flujo de oxígeno de entrada se obtiene a partir de:

$$W_{O_2,in} = W_{a,in} x_{O_2,in} \quad (3)$$

Siendo $x_{O_2,in}$ la fracción de masa del oxígeno y $W_{a,in}$ el flujo másico del aire seco en la entrada del cátodo, determinadas por las ecuaciones (4) y (5).

$$x_{O_2,in} = \frac{y_{O_2,in} M_{O_2}}{y_{O_2,in} M_{O_2} + (1 - y_{O_2,in}) M_{N_2}} \quad (4)$$

Donde $M_{N_2} = 28 \times 10^{-3} \text{ Kg/mol}$ es la masa molar de nitrógeno y $y_{O_2,in} = 0.21$ es la fracción molar de oxígeno.

$$W_{a,in} = \frac{1}{1 + \omega_{ca,in}} \quad (5)$$

Donde la relación de humedad $\omega_{ca,in}$ está definida por:

$$\omega_{ca,in} = \frac{M_v}{M_{a,in}} \frac{P_{v,in}}{P_{a,in}} \quad (6)$$

Donde $M_v = 18.02 \times 10^{-3} \text{ Kg/mol}$ es la masa molar de vapor, $P_{v,in}$ la presión del vapor, la presión del aire seco es $P_{a,in}$ y la masa molar del aire de entrada $M_{a,in}$ se obtiene de:

$$M_{a,in} = y_{O_2,in} M_{O_2} + (1 - y_{O_2,in}) M_{N_2} \quad (7)$$

$$P_{v,in} = \Phi_{in} P_{sat}(T_{in}) \quad (8)$$

$$P_{a,in} = P_{in} - P_{v,in} \quad (9)$$

$P_{sat}(T_{in})$ representa la presión de saturación del vapor con respecto a la temperatura de entrada $T_{in} = 298.15K$, dicha presión puede ser obtenida de las tablas de saturación del vapor presentadas en (Sonntag et al., 1998) y Φ_{in} denota la humedad relativa del aire en la entrada considerada igual a 1. La presión en la entrada del cátodo P_{in} se obtiene de (Garcia et al., 2010):

$$P_{in} = 1.0033 + 2.1 \times 10^{-4}W_{a,in} - 475.7 \times 10^{-6}I_{st} \quad (10)$$

Estrategias de control aplicadas para las celdas de combustible

Para mejorar la eficiencia de la celda de combustible se han aplicado diversas estrategias de control, entre ellas, control de avance y retroalimentación, control adaptable, control predictivo, lógica difusa, redes neuronales y modos deslizantes. A continuación, se mencionan algunos trabajos que se han realizado.

Control de avance y retroalimentación y PID

En (Pukrushpan et al, 2002) se diseñó un observador basado en control de adelanto (feedforward) y retroalimentación (feedback). El objetivo fue controlar el voltaje de entrada del motor de compresor para regular el oxígeno del cátodo y lograr la potencia deseada. Presentaron un modelo dinámico no lineal usando principios de mecánica de fluidos electroquímicos y termodinámicos en el que se enfocan en el comportamiento dinámico asociado con la presión y el flujo del reactivo, postergando la dinámica asociada con la regulación de la temperatura y la disipación del calor. Posteriormente, usaron el control de avance para controlar el voltaje del compresor según la corriente extraída de la pila de celdas de combustible y para aumentar la robustez del controlador contra la incertidumbre en las condiciones ambientales y el envejecimiento del dispositivo, se agrega el control de retroalimentación. Luego, en (Woo et al, 2007) propusieron un control de retroalimentación PID para regular la potencia de salida de una celda de combustible PEM limitando la alimentación de hidrógeno que se realizó variando la resistencia interna del conjunto de membrana y electrodo. Mencionan que este tipo de regulación podría utilizarse en los sistemas de celdas de combustible pequeñas donde el reciclaje de hidrógeno sin reaccionar puede ser poco práctico.

Control Predictivo

Se han utilizado estrategias de control predictivo basado en modelos (MPC) para mejorar el control de la falta de combustible y maximizar la eficiencia de la PEMFC. Por ejemplo, en (Bordons et al., 2006) analizaron los posibles objetivos de control: seguimiento de un voltaje de salida deseado, evitación la falta de reactivos y maximizar de la eficiencia, por lo que diseñaron una solución de control basada en control predictivo de modelo restringido (MPC). Las restricciones que consideraron fueron: el voltaje del compresor y la relación de exceso de oxígeno y consideraron como perturbación medible la corriente de carga. Señalan que este tipo de control puede operar el proceso de tal manera que se puedan cumplir múltiples y cambiantes criterios operativos en presencia de cambios en las características del proceso y que puede anticipar violaciones de restricciones y corregirlas de manera adecuada. Sugieren el uso de dispositivos de almacenamiento como baterías o ultracapacitores para mejorar la etapa transitoria. Más tarde, en (Arce et al., 2007)) desarrollaron un controlador predictivo explícito restringido para regular el flujo de aire que actúa sobre el voltaje de la bomba de aire. Concluyeron que esta formulación reduce el tiempo de ejecución y permite la implementación de controladores predictivos en tiempo real. Como trabajo futuro proponen incluir el punto de operación como parámetro porque esto permitiría el uso de este controlador en un esquema de control adaptativo con una carga computacional muy baja.

Lógica difusa

En comparación con el control predictivo, la estrategia de lógica difusa no necesita un modelo matemático preciso del sistema a controlar. Además, presenta tiempos de respuesta menores que con el control PID. En (Tekin et al., 2007) describieron los modelos validados experimentalmente de una celda de combustible de membrana de intercambio de protones de 5 kW. El objetivo principal fue estudiar uno de los problemas que se deben superar para los sistemas de celdas de combustible integradas: su optimización de energía. Propusieron dos controladores difusos para el circuito de suministro de aire y la estrategia de gestión de energía.

Mediante la identificación recursiva de mínimos cuadrados realizaron la caracterización del sistema para tener en cuenta los parámetros no lineales de la celda de combustible. Diseñaron un controlador difuso en tiempo real para el control del flujo en el cátodo. La coincidencia de identificación del sistema fue superior al 96% para el algoritmo de identificación de cuarto orden, lo que permitió que se construyera un modelo preciso de la respuesta dentro de Simulink, permitiendo que los parámetros iniciales del controlador difuso se diseñaran y probaran antes de la implementación real (Williams et al., 2008)).

Otro artículo propone el uso de tres estrategias de control: controlador PI, controlador FL y PI autoajutable basado en FL para la regulación de la velocidad del motor de CD y el control de combustible para la FC (Alnaib et al., 2018). Los resultados de la simulación mostraron que la respuesta de velocidad del motor de CD controlado por el controlador PI de autoajuste basado en FL mejoró el rendimiento (tiempo de subida, tiempo de establecimiento y error de estado estable) en comparación con el controlador PI típico, y FL. Mencionan que los controladores PI no pueden proporcionar una solución precisa y que para sistemas complejos no lineales el controlador FL puede ofrecer un alto rendimiento y superar las incertidumbres.

Redes neuronales

Para mejorar el rendimiento del sistema, optimizar y analizar los sistemas de celdas de combustible, proponen un enfoque inteligente mediante el uso del método Quasi-Newton del algoritmo de redes neuronales Levenberg-Marquardt y del algoritmo de avance Bayesiano, que constituye el controlador dinámico de redes neuronales (DNN). Los resultados de la simulación demuestran que el esquema de control dinámico de la red neuronal basado en el modelo es apropiado para el control. Comentan que el controlador difuso se puede reemplazar fácilmente por el controlador DNN, ya que ambos controles se basan en el principio de mapeo no lineal de entrada-salida (Hatti et al., 2009). En (Almeida et al., 2003) presentaron un enfoque de controlador de articulación por modelo de cerebelo paramétrico (P-CMAC), una estructura neural derivada del algoritmo CMAC de Albus y los sistemas de inferencia difusos paramétricos de Takagi-Sugeno-Kang. Propusieron un nuevo enfoque para diseñar sistemas de control óptimo neural (NOC) utilizando en P-CMAC para controlar el voltaje de salida de una celda de combustible de membrana de intercambio de portones. Se expusieron los resultados del comportamiento del voltaje PEM-FC en diferentes condiciones de carga, para demostrar la efectividad del algoritmo NOC.

Control adaptable

También se ha propuesto algunas estrategias con control adaptable. En (Zhang et al., 2008)) propusieron un algoritmo de control adaptativo para estabilizar dinámicamente la relación de exceso de oxígeno alrededor de un nivel óptimo. Los parámetros se estimaron utilizando un algoritmo de identificación de mínimos cuadrados El control adaptativo propuesto se evalúa en un banco de pruebas. Otro trabajo se muestra en (Williams et al., 2008)) en donde realizaron el modelado y la implementación en tiempo real del control de flujo de celdas de combustible PEM.

Utilizaron LabVIEW para la identificación de sistemas en línea y tener en cuenta las características no lineales y variables en el tiempo. Con base en este proceso de identificación, implementaron el controlador PID de autoajuste de LabVIEW en tiempo real. La efectividad aparente del control PID de autoajuste en la identificación de los parámetros de control para adaptarse de acuerdo con la dinámica cambiante del sistema, sigue siendo más lenta e inexacta o desfasada en el tiempo (Daud et al., 2017). Para el 2010, ver por ejemplo (Zumoffen et al., 2016), se analizó el comportamiento de un sistema de celdas de combustible bajo un control predictivo adaptativo con filtro robusto. Este control fue diseñado para controlar el voltaje del motor del compresor, especialmente pensado para lograr una mejor eficiencia y para mantener el nivel necesario de oxígeno en el cátodo para evitar cortocircuitos y daños en la membrana de la celda.

Un convertidor CD/CD se conectó al motor eléctrico. Se utilizó como un actuador en un circuito de control en cascada para regular la salida del par de un motor eléctrico de DC con un controlador PI.

Control por modos deslizantes

En (Garcia et al., 2010) diseñaron un controlador por modos deslizantes (SMC) para regular la relación de exceso de oxígeno mediante la manipulación del flujo de aire considerando como perturbación los cambios de carga. El modelo empleado se obtuvo a partir de los datos de entrada/salida del sistema. Este control fue propuesto porque puede operar de manera eficiente bajo todas las demandas de carga posibles que la celda de combustible debe satisfacer. Esto se hace sin aumentar el esfuerzo computacional del controlador, no requiere un hardware o software en particular para su implementación. Seguidamente, en (Kunusch et al., 2013) presentaron un control en cascada del *motocompresor* de una celda de combustible (PEMFC) para mantener la relación de exceso de oxígeno entre 2 y 2.4. La estrategia se basó en una configuración en cascada de dos controladores de modo deslizante de segundo orden con *Super Twisting*. El controlador tenía dos lazos de control: un lazo externo realizaba un control de la relación de exceso de oxígeno, generando el flujo de aire del compresor de referencia; y uno para el lazo interno el cual controlaba el voltaje del *motocompresor*, utilizando un segundo control por modos deslizantes de segundo orden SOSMC.

También diseñaron un controlador *Super Twisting* utilizando un modelo no lineal de séptimo orden de una estación de prueba de celdas de combustible de laboratorio, para el suministro de oxígeno. Además, presentaron un análisis de la estabilidad basada en Lyapunov. La estrategia de control propuesta se implementa con éxito en el banco de pruebas de laboratorio. Los resultados fueron satisfactorios, en relación con el comportamiento dinámico, la regulación del oxígeno y la robustez frente a las incertidumbres del modelo. Como principales ventajas de este control, se mencionó lo siguiente: robustez ante parámetros de incertidumbre del modelo y perturbaciones externas de carga; estructura del controlador simple de diseñar y ajustar, bajo esfuerzo computacional en tiempo real. En otro trabajo (Derbeli et al., 2017), se aplicó un algoritmo *Super Twisting* de segundo orden en el convertidor de CD / CD para mejorar y optimizar la eficiencia del sistema de la celda de combustible (PEMFC) y reducir la vibración. El algoritmo propuesto fue capaz de estabilizar el sistema de potencia PEMFC en todo el rango operativo en presencia de variaciones significativas en la potencia de carga y el voltaje de suministro.

Además, un controlador de modo deslizante de alto orden (HOSM) fue propuesto en (Pilloni et al., 2015) para el control de realimentación de salida basado en observador para regular la relación de exceso de oxígeno de una PEMFC empleando como variable de entrada el voltaje del *motocompresor*. Los resultados de las simulaciones analizados muestran un desempeño satisfactorio del enfoque propuesto. Para la regulación de la presión en los lados del ánodo y el cátodo de la PEMFC, en (Matraji et al., 2012) plantearon un controlador con entradas múltiples y de salidas múltiples (MIMO) de segundo orden basado en *Super Twisting*.

El controlador no lineal resultante es robusto y garantiza el rendimiento en cualquier punto de equilibrio y bajo incertidumbre paramétrica del modelo. Los resultados de la simulación muestran que el controlador propuesto tiene una buena respuesta transitoria bajo variaciones de carga. En la tabla 8.3 se muestra un breve resumen de cada trabajo realizado con diferentes estrategias de control.

Tabla 8.3 Resumen de las estrategias de control

Tipo de controlador	Objetivo de control	Variables manipuladas	Perturbación	Ref.
Control de adelanto y retroalimentación (feedforward y feedback)	Regular el oxígeno del cátodo y lograr la potencia deseada	Voltaje del compresor	Corriente	(Pukrushpan et al., 2002)
Control de retroalimentación PID	Regular la potencia de salida de una celda de combustible PEM limitando la alimentación de hidrógeno	Resistencia interna del conjunto de membrana y electrodo	Cambios en la carga	(Woo et al., 2007)
Control predictivo de modelo restringido (MPC)	Seguimiento de un voltaje de salida deseado, evitación la falta de reactivos y maximizar de la eficiencia	Voltaje del compresor y la relación de exceso de oxígeno	Corriente de carga	(Bordons et al., 2006)
Controlador predictivo explícito restringido	Seguimiento de un voltaje de salida deseado, evitación la falta de reactivos y maximizar de la eficiencia	Voltaje de la bomba de aire y la relación de exceso de oxígeno	Corriente de carga	(Arce et al., 2007)

Dos controladores de lógica difusa	Optimización de energía	Flujo de aire interno y determinación del punto de ajuste del flujo de aire.	Demanda de potencia	(Tekin et al., 2007)
Lógica difusa	Control del flujo en el cátodo	Flujo de aire	Demanda de potencia	(Williams et al., 2008)
PI autoajustable basado en lógica difusa	Regulación de la velocidad del motor de CC y el control de combustible para la FC	Velocidad del motor y porcentaje de hidrógeno	Cambios de carga	(Alnaib et al., 2018)
Red neuronal dinámica	Obtener un modelo de control eficiente para mejorar el rendimiento del sistema, optimizar y analizar los sistemas de FC	----	Variaciones de potencia	(Hatti et al., 2009)
Controlador de articulación por modelo de cerebelo paramétrico (P-CMAC)	Controlar el voltaje de salida de una PEMFC	----	Cambios de carga	(Almeida et al., 2003)
Control adaptable	Estabilizar dinámicamente la relación de exceso de oxígeno	Flujo de aire	----	(Zhang et al., 2008)
PID de autoajuste	Modelar e implementar en tiempo real del control de flujo de celdas de combustible PEM	Estequiometría del flujo	Demanda de potencia	(Williams et al., 2008)
Control predictivo adaptable con filtro robusto.	Controlar el voltaje del motor del compresor para lograr una mejor eficiencia y para mantener el nivel necesario de oxígeno en el cátodo.	Voltaje del compresor	Cambios de carga	(Zumoffen et al., 2010)
Controlador por modos deslizantes	Regular la relación de exceso de oxígeno	Manipulación del flujo de aire	Cambios de carga	(Garcia et al., 2010)
Controladores de modo deslizante de segundo orden por <i>Super Twisting</i>	Mantener la relación de exceso de oxígeno	Voltaje del compresor	Demanda de corriente	(Matrahi et al., 2011)
Controlador <i>Super Twisting</i>	Optimizar la conversión de energía de la FC, maximizando la potencia neta generada manteniendo la estequiometría de oxígeno	Flujo de masa de aire que ingresa al cátodo	Cambios en la demanda de corriente	(Kunusch et al., 2013)
<i>Super Twisting</i> de segundo orden en el convertidor de CC / CC	Mejorar y optimizar la eficiencia del sistema de la celda de combustible (PEMFC) y reducir la vibración	PWM del convertidor de CD/CD	Cambios de carga	(Derbelli et al., 2017)
Controlador de modo deslizante de alto orden	Control de realimentación de salida basado en observador para regular la relación de exceso de oxígeno	Voltaje del compresor	Corriente de carga	(Pilloni et al., 2015)
Controlador de entrada múltiple y salida múltiple (MIMO) de segundo orden basado en <i>Super Twisting</i>	Regulación de la presión en el ánodo y el cátodo de la PEMFC	Presión ánodo y el cátodo de la PEMFC	Cambios de carga	(Matraji et al., 2012)

Agradecimiento

Este trabajo fue financiado por la Universidad Autónoma del Carmen UNACAR y por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT de México.

Conclusiones

La eficiencia de la celda de combustible depende de la optimización de diversos factores, por lo que, una buena estrategia de control puede mejorar el rendimiento y evitar daños a los componentes internos además de la reducción de costos. Por lo tanto, el enfoque de la revisión propuesta está orientada a las estrategias de control del sistema PEMFC: control de avance y retroalimentación, lógica difusa, redes neuronales, control adaptable, control predictivo y modos deslizantes.

En la literatura se han utilizado diversas estrategias de control predictivo para evitar la falta de reactivos y maximizar de la eficiencia de la PEMFC, porque este tipo de control puede operar aun en presencia de cambios en las características del proceso y anticipar violaciones de restricciones y corregirlas, sin embargo, se necesita conocer el modelo dinámico preciso del sistema y un alto esfuerzo computacional, lo que dificulta su aplicación.

El control de lógica difusa (FLC), ha sido implementado para la regulación de la velocidad del motor de CD y el control de combustible para la FC, en donde los resultados fueron satisfactorios, pero FLC necesita una gran cantidad de cálculos para tener una mayor precisión en el control. También, se han utilizado redes neuronales para mejorar el rendimiento del sistema, optimizar y analizar los sistemas de PEMFC obteniendo un control apropiado, no obstante, este control puede ser complejo para tareas grandes. Una técnica como control predictivo adaptable con filtro robusto ha demostrado ser el control más adecuado porque puede operar eficientemente ante cambios en la demanda de potencia exigida por el motor, a pesar de ello, su aplicación puede resultar compleja por los cálculos requeridos aumentando el esfuerzo computacional. Por otra parte, el control por *modos deslizantes* ha sido estudiado para regular la relación de exceso de oxígeno considerando como perturbación los cambios de carga, este tipo de control tiene como gran ventaja que es un esquema muy simple de implementar con propiedades de robustez, además de que no requiere de grandes cálculos computacionales, lo que lo hace factible para futuras aplicaciones móviles comerciales por su simplicidad práctica de implementación.

Referencias

- Albarghot, M., Alkarrami, F., O'Young, S., & Rolland, L. (2017, October). Comparison between experimental results and simulation of a fuel cell powered DC motor using PID controller. In Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2017 IEEE (pp. 1-5). IEEE.
- Almeida, P. E., & Simoes, M. G. (2003, October). Neural optimal control of PEM-fuel cells with parametric CMAC networks. In 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003. (Vol. 2, pp. 723-730). IEEE.
- Alnaib, A. M. I., Sultan, N. S., & Mahmood, O. T. (2018). Design a fuel cell-based drive dc motor for an electric vehicle applications. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4), 2081-2087.
- Andújar, J. M., & Segura, F. (2009). Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), 2309-2322.
- Arce, A., Ramírez, D. R., Del Real, A. J., & Bordons, C. (2007, December). Constrained explicit predictive control strategies for PEM fuel cell systems. In 2007 46th IEEE conference on decision and control (pp. 6088-6093). IEEE.
- Barbir, F. (2005). *Pem fuel cells: Theory and practice*. ELSEVIER.
- Biichi, F. and Srinivasan, S. (1997). Operating proton exchange membrane fuel cells without external humidification of the reactant gases. *Journal of Electrochemical Society*.
- Bordons, C., Arce, A., & Del Real, A. J. (2006, June). Constrained predictive control strategies for PEM fuel cells. In 2006 American Control Conference (pp. 6-pp). IEEE.
- Cano, U. (1999). Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. *Boletín iee*.
- Daud, W. R. W., Rosli, R. E., Majlan, E. H., Hamid, S. A. A., Mohamed, R., & Husaini, T. (2017). PEM fuel cell system control: A review. *Renewable Energy*, 113, 620-638.
- Derbeli, M., Farhat, M., Barambones, O., & Sbita, L. (2017). Control of PEM fuel cell power system using sliding mode and super-twisting algorithms. *International journal of hydrogen energy*, 42(13), 8833-8844.
- Feroldi, D., Serra, M., & Riera, J. (2006). Control de sistemas basados en pilas de combustible tipo PEM. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Gao, F., Blunier, B., & Miraoui, A. (2013). *Proton exchange membrane fuel cells modeling*. John Wiley & Sons.

- Garcia-Gabin, W., Dorado, F., & Bordons, C. (2010). Real-time implementation of a sliding mode controller for air supply on a PEM fuel cell. *Journal of process control*, 20(3), 325-336.
- Glazer, M. N., Oprean, I. M., & Bățăuș, M. V. (2013). Modeling and Analysis of a Fuel Cell Hybrid Vehicle. In *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress* (pp. 847-858). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hames, Y., Kaya, K., Baltacioglu, E., & Turksoy, A. (2018). Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Handbook, F. C. (2004). EG&G technical services. Inc., Albuquerque, NM, DOE/NETL-2004/1206, 1-10.
- Hatti, M., & Tioursi, M. (2009). Dynamic neural network controller model of PEM fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(11), 5015-5021.
- Kunusch, C., Puleston, P. F., Mayosky, M. A., & Fridman, L. (2013). Experimental results applying second order sliding mode control to a PEM fuel cell based system. *Control Engineering Practice*, 21(5), 719-726.
- Kunusch, C., Puleston, P., & Mayosky, M. (2012). *Sliding-Mode control of PEM fuel cells*. Springer Science & Business Media.
- Larminie, J., Dicks, A., & McDonald, M. S. (2003). *Fuel cell systems explained*. Chichester, UK: J. Wiley.
- Matraji, I., Laghrouche, S., & Wack, M. (2011, December). Cascade control of the moto-compressor of a PEM fuel cell via second order sliding mode. In *2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference* (pp. 633-638). IEEE.
- Matraji, I., Laghrouche, S., & Wack, M. (2012). Pressure control in a PEM fuel cell via second order sliding mode. *international journal of hydrogen energy*, 37(21), 16104-16116
- Mebarki, N., Rekioua, T., Mokrani, Z., Rekioua, D., & Bacha, S. (2016). PEM fuel cell/battery storage system supplying electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(45), 20993-21005.
- Pilloni, A., Pisano, A., & Usai, E. (2015). Observer-based air excess ratio control of a PEM fuel cell system via high-order sliding mode. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(8), 5236-5246.
- Pukrushpan, J. T., Stefanopoulou, A. G., & Peng, H. (2002, May). Modeling and control for PEM fuel cell stack system. In *Proceedings of the American Control Conference* (Vol. 4, pp. 3117-3122).
- Pukrushpan, J. T., Stefanopoulou, A. G., & Peng, H. (2004). *Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design*. Springer Science & Business Media.
- Somkun, S., Sirisamphanwong, C., & Sukchai, S. (2015). A DSP-based interleaved boost DC–DC converter for fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(19), 6391-6404.
- Sonntag, R. E., Borgnakke, C., Van Wylen, G. J., & Van Wyk, S. (1998). *Fundamentals of thermodynamics* (Vol. 6). New York: Wiley.
- Tekin, M., Hissel, D., Pera, M. C., & Kauffmann, J. M. (2007). Energy-management strategy for embedded fuel-cell systems using fuzzy logic. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(1), 595-603.
- Thounthong, P., Raël, S., Davat, B., & Sadli, I. (2006, June). A control strategy of fuel cell/battery hybrid power source for electric vehicle applications. In *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC'06. 37th IEEE* (pp. 1-7). IEEE.

- Williams, J. G., Liu, G. P., Thanapalan, K., & Rees, D. (2008). Design and implementation of on-line self-tuning control for PEM fuel cells. *World Electric Vehicle Journal*, 2(4), 242-252.
- Williams, J. G., Liu, G., Chai, S., & Rees, D. (2008). Intelligent control for improvements in PEM fuel cell flow performance. *International Journal of Automation and Computing*, 5(2), 145-151.
- Woo, C. H., & Benziger, J. B. (2007). PEM fuel cell current regulation by fuel feed control. *Chemical engineering science*, 62(4), 957-968.
- Zhang, J., Liu, G., Yu, W., & Ouyang, M. (2008). Adaptive control of the air flow of a PEM fuel cell system. *Journal of Power Sources*, 179(2), 649-659.
- Zumoffen, D., & Basualdo, M. (2010). Advanced control for fuel cells connected to a DC/DC converter and an electric motor. *Computers & Chemical Engineering*, 34(5), 643-655.