

Diseño del control robusto de temperatura de una pila PEMFC mediante optimización multiobjetivo

Pajares, Alberto^{a,*}, Blasco, Xavier^a, Herrero, Juan Manuel^a, Sanchis, Javier^a, Garcia-Nieto, Sergio^a

^aInstituto Universitario de Automática e Informática Industrial, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia 46022, España.

To cite this article: Pajares, A., Blasco, X., Herrero, J.M., Sanchis, J., Garcia-Nieto, S. 2025. Design of Robust Temperature Control for a PEMFC Stack Using Multi-Objective Optimization. XX Simposio CEA de Control Inteligente, Huelva (Spain), 2025.

Resumen

Este trabajo presenta el diseño de un sistema de control de temperatura para una pila de combustible tipo PEMFC integrada en una planta micro-CHP (micro Combined Heat and Power). El control se implementa mediante dos controladores PI con anti-windup, encargados de regular las temperaturas de entrada y salida de la pila, garantizando así su funcionamiento en condiciones óptimas. Se utiliza un modelo no lineal validado experimentalmente del sistema de refrigeración, considerando dos configuraciones: una con la pila degradada y otra con una pila nueva. La sintonización de los controladores se plantea como un problema de optimización multiobjetivo (MOP), con el objetivo de minimizar los errores de temperatura y los esfuerzos de control. La metodología adoptada permite obtener un conjunto robusto de controladores óptimos (conjunto X^{Rob}), considerando ambos escenarios (modelos). Los resultados muestran que el control propuesto es capaz de mantener las temperaturas deseadas, incluso ante variaciones significativas en las condiciones de operación del sistema.

Palabras clave: PEMFC, control de temperatura, optimización multiobjetivo, PID.

Design of Robust Temperature Control for a PEMFC Stack Using Multi-Objective Optimization

Abstract

This work presents the design of a temperature control system for a PEMFC fuel cell integrated into a micro-CHP (micro Combined Heat and Power) plant. The control is implemented through two PI controllers with anti-windup, responsible for regulating the inlet and outlet temperatures of the coolant circulating through the stack, thus ensuring its operation under optimal conditions. An experimentally validated nonlinear model of the cooling system is used, considering two configurations: one with a degraded stack (defined in the literature) and another with a new stack (obtained in this work). The tuning of the controllers is posed as a multi-objective optimization problem (MOP), with the objective of minimizing temperature errors and control efforts. The adopted methodology allows obtaining a robust set of optimal controllers (set X^{Rob}), considering both scenarios (models). The results show that the proposed control is capable of maintaining the desired temperatures, even under significant variations in the system operating conditions.

Keywords: PEMFC, temperature control, multi-objective optimization, PID.

1. Introducción

En aplicaciones prácticas, pequeñas variaciones en los parámetros del sistema, como propiedades no uniformes de los materiales, dimensiones físicas imprecisas o condiciones de operación inciertas, pueden afectar significativamente el rendi-

miento de soluciones teóricas obtenidas a partir de modelos nominales Anthony and Keane (2003); Greiner (1996). Por ello, la robustez —entendida como la insensibilidad a estas variaciones— se ha convertido en un criterio esencial en problemas de optimización multiobjetivo Rascoñ et al. (2014); Castillo et al. (2022); Huerta et al. (2017).

*Autor para correspondencia: alpafer1@upv.es

Las plantas micro-CHP basadas en pilas de combustible tipo PEMFC representan una solución eficiente y sostenible para la generación simultánea de electricidad y calor en aplicaciones residenciales Maghanki et al. (2013). No obstante, el correcto funcionamiento y la durabilidad de estas pilas dependen en gran medida del control térmico, ya que deben operar dentro de un rango estrecho de temperaturas para maximizar la eficiencia eléctrica y minimizar su deterioro Ang et al. (2011); Ellamla et al. (2015).

En este contexto, el presente trabajo aborda el diseño de un sistema de control de temperatura para una planta micro-CHP real, centrado en la regulación de las temperaturas de entrada y salida del refrigerante de la pila. Para ello, se parte de un modelo dinámico no lineal validado experimentalmente en la bibliografía obtenido en condiciones de degradación alta de la pila de combustible. Además, recientemente se ha reparado la pila de combustible. Por ello, se obtiene, en este trabajo, un nuevo modelo (modelo nominal) que caracteriza de forma más adecuada el sistema real actual.

Una vez planteados los dos escenarios (modelo degradado y nominal), se desea obtener un controlador robusto que funcione adecuadamente sobre el modelo nominal, pero que también lo haga cuando la pila de combustible se encuentre con una degradación alta. El diseño del control se formula como un problema de optimización multiobjetivo, con dos objetivos principales: mantener las temperaturas deseadas y minimizar los esfuerzos de control. Estos objetivos son evaluados bajo los dos escenarios planteados, obteniendo el conjunto X^{Rob} Veyna et al. (2025). Este conjunto robusto permite obtener las soluciones óptimas para cada escenario, así como las soluciones no dominadas por todos los escenarios al mismo tiempo. Por lo tanto, este conjunto de soluciones robustas encuentra controlador con un buen rendimiento ante ambos escenarios. La metodología adoptada ofrece así una herramienta eficaz y flexible para el diseño de sistemas de control térmico en aplicaciones reales de micro-CHP.

Este trabajo se estructura de la siguiente forma. En la Sección 2 se presenta una descripción general del sistema micro-CHP. En la Sección 3 se detalla el modelo del sistema de refrigeración. En la Sección 4 se introduce el diseño del sistema de control. En la Sección 5 se muestran los resultados obtenidos. Finalmente, en la Sección 6 se describen las conclusiones del trabajo.

2. MICRO-CHP SYSTEM

En esta sección se presenta una descripción general del sistema micro-CHP, con especial énfasis en el sistema de refrigeración. En Giménez et al. (2019), se describe en detalle el equipo real.

Los componentes principales del sistema micro-CHP son: la pila de combustible PEMFC, el sistema de suministro de aire, el sistema de suministro de hidrógeno, la carga electrónica, el radiador, el tanque de agua caliente, el sistema de refrigeración del stack y la unidad de control.

La pila genera electricidad y calor al ser alimentada con hidrógeno y aire. La electricidad se consume mediante una carga electrónica que simula el consumo doméstico, y el calor se

almacena en un tanque de agua caliente a unos 55°C . El radiador simula la demanda térmica, extrayendo calor del tanque.

Para proteger la pila y asegurar su eficiencia, se debe mantener la temperatura de salida del agua de la pila ($T_{w_{out}}$) en 65°C y la diferencia de temperatura entre entrada y salida ($T_{w_{out}} - T_{w_{in}}$) en 5°C . Por lo tanto, se fija el punto de consigna de entrada ($T_{w_{in}}$) en 60°C . Para mantener estables las temperaturas $T_{w_{out}}$ y $T_{w_{in}}$ en sus respectivos puntos de consigna, se emplea un sistema de refrigeración (ver Figura 1).

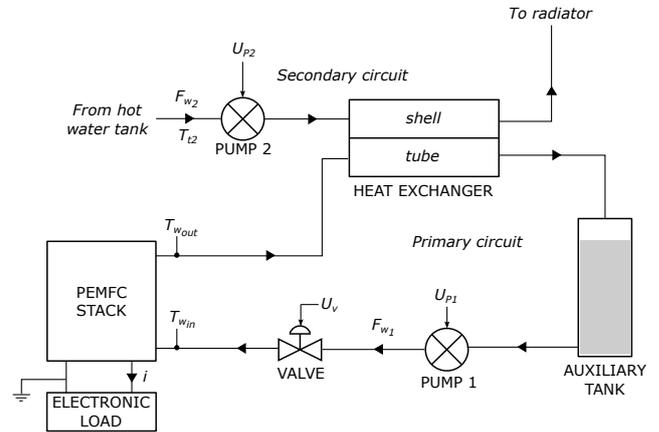


Figura 1: Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración controla estas temperaturas mediante dos caudales de agua:

- F_{w_1} (circuito primario): regula $T_{w_{out}}$, eliminando más o menos calor de la pila.
- F_{w_2} (circuito secundario): regula $T_{w_{in}}$, transfiriendo calor entre circuitos.

F_{w_1} se controla con una válvula motorizada y F_{w_2} con una bomba de velocidad variable. El control de temperatura, actúa sobre las dos referencias de dos lazos internos PI en configuración en cascada. Las acciones del control de temperatura (que funcionan como referencias para los bucles internos) son $u_{T_{w_{out}}}$ (L/min) y $u_{T_{w_{in}}}$ (L/min). El objetivo del sistema de control es responder eficazmente ante perturbaciones, minimizando las desviaciones de $T_{w_{out}}$ y $T_{w_{in}}$ respecto a sus puntos de consigna (65°C y 60°C , respectivamente). De este modo, se garantiza el funcionamiento óptimo de la pila, maximizando su eficiencia eléctrica y reduciendo su deterioro.

El diseño de este sistema de control de temperatura constituye el tema principal del artículo.

3. MODELO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Para el diseño del control de la temperatura de la pila de combustible, se utiliza un modelo no lineal del circuito de refrigeración del sistema micro-CHP descrito en Giménez et al. (2019). Este modelo fue desarrollado y validado experimentalmente. Dado que es el punto de partida para el diseño del control que se aborda en este trabajo, se describe brevemente sus características más relevantes a continuación.

El modelo está implementado en Matlab y cuenta con 30 parámetros, todos ellos representando magnitudes físicas reales

de la planta. El modelo dinámico está basado en principios fundamentales, es no lineal y fue validado experimentalmente en un amplio rango operativo (de 140 a 200 A). Está disponible en <https://riunet.upv.es/handle/10251/118336>.

Con ello, las variables de interés del modelo son dos entradas, dos salidas y una perturbación. La Figura 2 muestra un diagrama de caja negra con las entradas y salidas del modelo. $u_{T_{wout}}$ y $u_{T_{win}}$ son los puntos de ajuste de los caudales de agua de los circuitos primario y secundario respectivamente, y serán las acciones de control en el sistema. Las salidas son las temperaturas del agua a la salida (T_{wout}) y entrada de la pila (T_{win}). Por último, la corriente i es la perturbación.

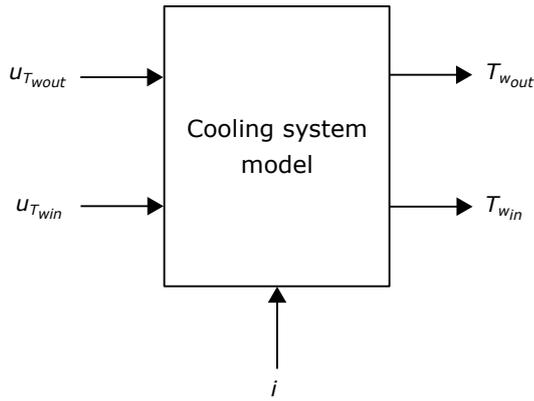


Figura 2: Diagrama de caja negra del modelo no lineal del circuito de refrigeración, con dos entradas, dos salidas y una perturbación.

Este modelo no lineal es, el punto de partida para el diseño del control de temperatura.

Inicialmente se dispone del modelo obtenido en Giménez et al. (2019) (ver Tabla 1). El modelo cuenta con 30 parámetros, y se realizó con la pila de combustible en condiciones de degradación alta. Por ello, de aquí en adelante, a este modelo se le llamará "modelo degradado" (p^D). Al modelo, se le ha añadido el parámetro $pemfc_{eff}$, que caracteriza la eficiencia de la pila con un valor de 0.816.

Debido a la degradación del sistema, recientemente, se ha reparado la pila de combustible. Por lo tanto, el sistema actual ha cambiado, y se desea obtener un nuevo modelo que caracterice la nueva pila de combustible en las condiciones actuales. En Veyna et al. (2023), se definieron los parámetros de este modelo que son sensibles y no sensibles. Los parámetros sensibles son aquellos cuya variación produce cambios significativos en el sistema (Veyna et al. (2023)). Con esta información, se obtiene un nuevo modelo, siguiendo la misma metodología definida en Giménez et al. (2019), para los parámetros sensibles que se definen en Veyna et al. (2023). Los parámetros no sensibles se mantienen al valor obtenido en Giménez et al. (2019), ya que su valor apenas afectan al comportamiento del sistema. De aquí en adelante, a este modelo se le llamará "modelo nominal" (p^N).

Con todo ello, en la Tabla 1 se observan los dos modelos definidos (modelo degradado p^D obtenido en Giménez et al. (2019), y modelo nominal p^N obtenido en este trabajo) que se utilizarán para el diseño del control definido en la siguiente sección.

Tabla 1: Parámetros del modelo degradado p^D y nominal p^N

| Parámetro | p_i | p^D | p^N | Sensibilidad |
|--------------------|----------|----------|----------|--------------|
| $calT_{a_{out}}$ | p_1 | 0.81 | 0.81 | No sensible |
| $calT_{p^4_{out}}$ | p_2 | 0.25 | 0.25 | No sensible |
| $calT_{w_{out}}$ | p_3 | 1.01 | 1.01 | No sensible |
| $h_{a_{max}}$ | p_4 | 52.01 | 45.66 | Sensible |
| $h_{a_{min}}$ | p_5 | 26.13 | 26.13 | No sensible |
| h_{aw} | p_6 | 40.89 | 79.73 | Sensible |
| $h_{fc_{loss}}$ | p_7 | 3.39 | 4.41 | Sensible |
| $h_{fc_{2max}}$ | p_8 | 44.78 | 44.78 | No sensible |
| $h_{fc_{2min}}$ | p_9 | 15.71 | 15.71 | No sensible |
| $h_{p1_{loss}}$ | p_{10} | 8.11 | 6.46 | Sensible |
| $h_{p^4_{loss}}$ | p_{11} | 8.28 | 6.11 | Sensible |
| $h_{rOFF_{max}}$ | p_{12} | 9.74 | 9.74 | No sensible |
| $h_{rOFF_{min}}$ | p_{13} | 8.17 | 8.17 | No sensible |
| $h_{rON_{max}}$ | p_{14} | 102.4 | 102.4 | Sensible |
| $h_{rON_{min}}$ | p_{15} | 59.33 | 52.24 | Sensible |
| $h_{s_{max}}$ | p_{16} | 221.41 | 190.26 | Sensible |
| $h_{s_{min}}$ | p_{17} | 54.07 | 28.12 | Sensible |
| ht_{max} | p_{18} | 83.91 | 80.75 | Sensible |
| $h_{t_{min}}$ | p_{19} | 22.02 | 22.02 | No sensible |
| $h_{w_{max}}$ | p_{20} | 66.37 | 72.52 | sensible |
| $h_{w_{min}}$ | p_{21} | 57.48 | 57.48 | No sensible |
| k_a | p_{22} | 52.65e2 | 56.84e2 | Sensible |
| T_{amb_r} | p_{23} | 27.17 | 28.09 | Sensible |
| V_a | p_{24} | 28.21e-4 | 55.00e-4 | Sensible |
| V_{p1} | p_{25} | 4.8e-4 | 4.8e-4 | No sensible |
| V_{p^4} | p_{26} | 15.7e-4 | 15.7e-4 | No sensible |
| V_r | p_{27} | 10.4e-4 | 10.4e-4 | No sensible |
| V_{r1} | p_{28} | 19.4e-4 | 19.4e-4 | No sensible |
| V_{r2} | p_{29} | 28.67e-3 | 20.08e-3 | Sensible |
| V_w | p_{30} | 12.5e-4 | 12.50e-5 | No sensible |
| $pemfc_{eff}$ | p_{31} | 0.816 | 1 | Sensible |

4. Diseño del control de temperatura

La estructura de control consiste en dos controladores tipo PI con anti-windup, uno para controlar T_{wout} y otro para controlar T_{win} (Giménez et al. (2020) ver Figura 3). La ecuación de los controladores PI se formula en su forma estándar (ver ecuación 8). Las acciones derivativas se desactivaron para evitar amplificar el ruido de medición y así proteger los actuadores. Por lo tanto, cada control tiene cuatro parámetros a ajustar (dos por cada controlador PI): Kc_1 ((l/min)/°C), Kc_2 ((l/min)/°C), Ti_1 (s) y Ti_2 (s). Estos parámetros se ajustan resolviendo un problema de optimización multiobjetivo (MOP).

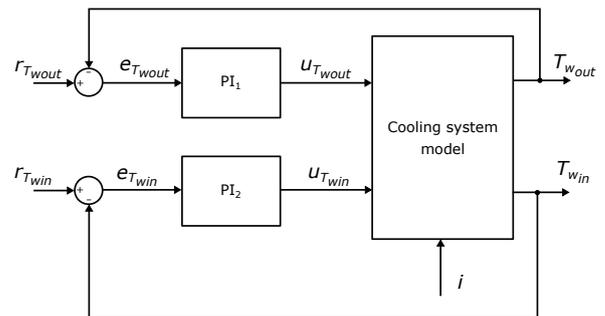


Figura 3: Estructura de control

Es importante señalar que, para cada control, la optimización multiobjetivo no arrojará una única solución óptima, sino un conjunto de soluciones óptimas llamado conjunto Pareto. Todas las soluciones dentro de un conjunto Pareto son óptimas, es decir, ninguna es mejor que otra en todos los objetivos simultáneamente. Cada una de estas soluciones corresponde a un controlador, es decir, a un ajuste específico de los parámetros de los dos controladores PI que forman la estructura de control.

La metodología de optimización multiobjetivo a posteriori ofrece la ventaja de que, en la etapa final de decisión, el diseñador conoce todas las soluciones óptimas y puede compararlas directamente. Esto permite analizar el compromiso entre las diferentes soluciones del conjunto Pareto y elegir una con pleno conocimiento de la información relevante, aumentando la confianza en que la solución final seleccionada es la adecuada.

La formulación del problema de optimización multiobjetivo, es decir, los objetivos y restricciones, así como el algoritmo de optimización empleado, se describirán a continuación.

El ajuste de los parámetros de ambos controladores PI se realiza de manera simultánea, lo cual es crucial debido a la fuerte interacción entre las acciones de control y las salidas del proceso: $u_{T_{wout}}$ y $u_{T_{win}}$ afectan a ambas salidas T_{wout} y T_{win} . Ajustando simultáneamente ambos controladores PI, estos efectos de acoplamiento quedan implícitamente considerados en el diseño del control.

Como se indicó, el control de temperatura debe responder a cambios en la demanda de corriente eléctrica i . La señal de demanda de corriente utilizada para diseñar los controles se muestra en la Figura 4. La elección de esta señal es importante, pues debe representar el peor caso (escalones abruptos) y cubrir todo el rango válido del modelo no lineal (de 140 a 200 A).

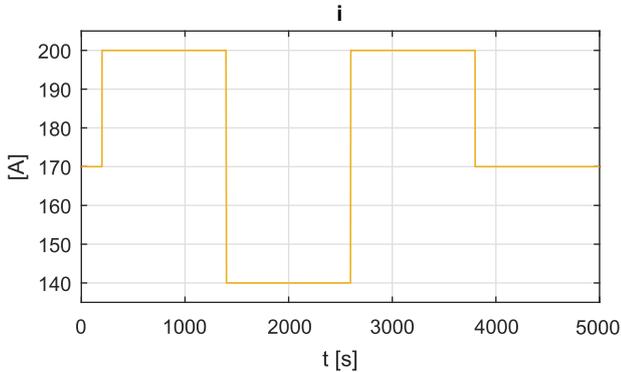


Figura 4: Señal de demanda de corriente eléctrica utilizada en el diseño de los controles. El primer paso se aplica en $t = 100s$ y la duración de cada paso es de 1200 s, por lo que los cambios ocurren en 100, 1300, 2500 y 3700 segundos.

4.1. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

Se desea mantener T_{wout} y T_{win} en sus puntos de ajuste (65 °C y 60 °C, respectivamente). El propósito de estos objetivos es lograr una eficiencia eléctrica óptima y minimizar el deterioro de la pila. Por lo tanto, el primer objetivo será minimizar los errores de las salidas respecto a sus puntos de ajuste con los dos modelos definidos en la sección 3. Además, hay otro aspecto fundamental que debe considerarse en el diseño del control: los esfuerzos de control. Esto es importante por dos razones. Primero, porque el consumo energético de los actuadores (que depende de los esfuerzos de control) reduce la eficiencia eléctrica

global del sistema. Segundo, porque la vida útil de los actuadores (válvulas, bombas) puede reducirse significativamente si se someten a acciones de control muy agresivas. Por lo tanto, los esfuerzos de control se incorporarán al problema de optimización multiobjetivo (MOP) mediante un objetivo adicional.

Cabe destacar que estos dos objetivos entran en conflicto entre sí. Por esta razón, la metodología de optimización multiobjetivo es especialmente adecuada para esta tarea. Además, los objetivos serán evaluados sobre dos escenarios diferentes (modelo degradado y modelo nominal).

En Veyna et al. (2025), se define el conjunto X^{Rob} . Este conjunto obtiene todas las soluciones no dominadas bajo un conjunto de escenarios. X^{Rob} tiene una amplia variedad de propiedades óptimas y robustas ante diferentes escenarios. Por un lado, obtiene las soluciones óptimas para cada uno de los escenarios contemplados de forma independiente. Además, obtiene soluciones, que sin ser óptimas bajo ningún escenario, si son no dominadas, y pueden proporcionar una buena solución para el diseñador Veyna et al. (2025).

Con todo ello, el objetivo de este trabajo es obtener el conjunto X^{Rob} para los dos modelos definidos. De este modo, se podrá observar la robustez de los controladores ante dos modelos diferentes (degradado y nominal). Una vez definidos el problema, es posible formular el diseño del control como un problema de optimización multiobjetivo, del siguiente modo:

$$\min_x f(x, P) \quad (1)$$

donde

$$f(x, P) = [f_1(x, p^D) \quad f_2(x, p^D) \quad f_1(x, p^N) \quad f_2(x, p^N)] \quad (2)$$

donde

$$f_1(x, p^i) = \frac{1}{T_{sim}} \left(\int_0^{T_{sim}} t |e_{T_{win}}(t)| dt + \int_0^{T_{sim}} t |e_{T_{wout}}(t)| dt \right) \quad (3)$$

$$f_2(x, p^i) = \frac{1}{T_{sim}} \left(\int_0^{T_{sim}} \left| \frac{du_{T_{win}}}{dt} \right| dt + \int_0^{T_{sim}} \left| \frac{du_{T_{wout}}}{dt} \right| dt \right)$$

y

$$x = [Kc_1 \quad Kc_2 \quad Ti_1 \quad Ti_2] \quad (4)$$

sujeto a:

$$\underline{x} < x < \bar{x}$$

$$\underline{x} = [-5 \quad -5 \quad 1 \quad 1]$$

$$\bar{x} = [-0.1 \quad -0.1 \quad 100 \quad 100]$$

En la formulación del MOP, f_1 agrega el ITAE para ambas salidas (T_{win} y T_{wout}), y f_2 agrega la derivada de las dos acciones de control ($u_{T_{win}}$ y $u_{T_{wout}}$). De este modo, se reducen el número de objetivos, haciendo más fácil su interpretación.

El algoritmo de optimización utilizado para la búsqueda de las soluciones óptimas fue evMOGA Martínez-Iranzo et al. (2009) (disponible en <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/31080-ev-moga-multiobjective-evolutionary-algorithm>). El algoritmo se ejecutó en Matlab.

Los parámetros usados para la configuración del algoritmo fueron:

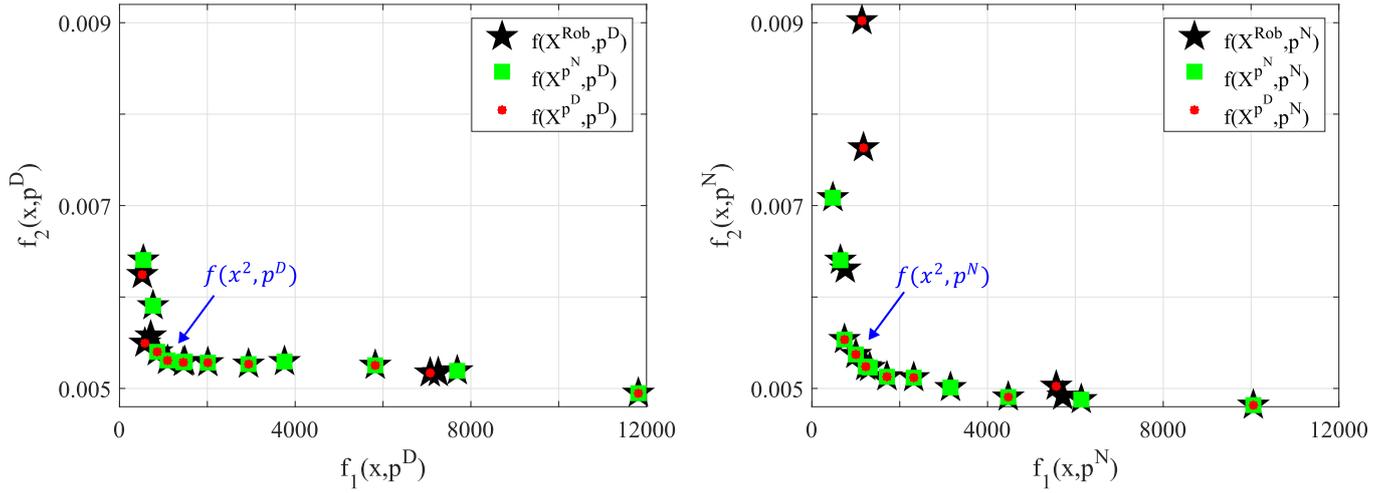


Figura 5: Representación de los controladores obtenidos X^{Rob} , X^{p^D} y X^{p^N} sobre $f_1(x, p^D)$ y $f_2(x, p^D)$ (izquierda) y $f_1(x, p^N)$ y $f_2(x, p^N)$ (derecha).

- $N_{ind_p}=400$ (número de individuos en la población principal)
- $N_G=2500$ (número de generaciones)
- $N_{GA}=8$ (número de individuos por generación)
- $n_{div}=50$ (número de divisiones por dimensión).

Con esta configuración, el algoritmo evaluó las funciones objetivo 20400 veces.

Tabla 2: Controladores que forman X^{Rob} , X^{p^D} y X^{p^N}

| x^i | K_{c1} | K_{c2} | T_{i1} | T_{i2} | X^{Rob} | X^{p^D} | X^{p^N} |
|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| x^1 | -0.854 | -3.368 | 60.96 | 49.63 | ✓ | | |
| x^2 | -0.710 | -3.855 | 63.55 | 78.85 | ✓ | ✓ | ✓ |
| x^3 | -0.588 | -4.182 | 40.48 | 34.71 | ✓ | | ✓ |
| x^4 | -0.158 | -2.172 | 54.57 | 60.92 | ✓ | | |
| x^5 | -0.779 | -3.732 | 47.81 | 61.39 | ✓ | ✓ | |
| x^6 | -0.158 | -3.457 | 53.34 | 64.67 | ✓ | ✓ | |
| x^7 | -0.472 | -1.648 | 88.20 | 84.93 | ✓ | | ✓ |
| x^8 | -0.737 | -3.732 | 77.82 | 79.20 | ✓ | ✓ | ✓ |
| x^9 | -0.928 | -3.513 | 55.61 | 38.59 | ✓ | ✓ | |
| x^{10} | -0.450 | -3.215 | 79.66 | 67.72 | ✓ | ✓ | ✓ |
| x^{11} | -0.123 | -2.086 | 35.89 | 86.28 | ✓ | ✓ | ✓ |
| x^{12} | -0.704 | -3.088 | 88.20 | 87.92 | ✓ | ✓ | ✓ |
| x^{13} | -0.176 | -3.546 | 90.71 | 93.00 | ✓ | ✓ | ✓ |
| x^{14} | -0.498 | -3.452 | 56.20 | 86.27 | ✓ | | ✓ |
| x^{15} | -0.241 | -2.164 | 81.28 | 94.01 | ✓ | | ✓ |
| x^{16} | -0.509 | -3.755 | 43.20 | 39.27 | ✓ | | ✓ |
| x^{17} | -0.727 | -3.858 | 58.96 | 61.40 | ✓ | ✓ | ✓ |

5. Resultados y Discusión

En esta sección se analizan los resultados obtenidos en este trabajo. La Tabla 2 muestra el conjunto de controladores obtenidos. Todos los controladores forman X^{Rob} . Además, se definen los conjuntos X^{p^D} y X^{p^N} como el conjunto de controladores óptimos para el modelo p^D y p^N respectivamente.

La Figura 5 muestra los controladores obtenidos (X^{Rob} , $X^{p^D} \in X^{Rob}$ y $X^{p^N} \in X^{Rob}$). Por un lado, a la izquierda, se observan dichos controladores para los objetivos evaluados sobre el modelo p^D . Los mejores controladores forman el conjunto X^{p^D} . Además, se observa como bastantes controladores óptimos para el modelo p^N (X^{p^N}) forman parte del conjunto X^{p^D} (ver Tabla 2 y Figura 5). Por otro lado, a la derecha, se observan el conjunto de controladores evaluados sobre el modelo p^N . En este caso, los mejores controladores forman el conjunto X^{p^N} . También, se observa como bastantes controladores óptimos para el modelo p^D (X^{p^D}) forman parte del conjunto X^{p^N} .

Por lo tanto, los controladores óptimos obtenidos para el modelo nominal obtienen un buen rendimiento para el modelo degradado (y viceversa). Con ello, podemos concluir que los controladores obtenidos son robustos, entendiendo como robustos los controladores que obtienen un buen rendimiento ante los dos modelos definidos.

En la Figura 6 se observa la repuesta de las salidas (T_{win} y T_{wout}) y acciones de control ($u_{T_{win}}$ y $u_{T_{wout}}$) ante los cambios en la corriente (ver Figura 3). En rojo se observa la respuesta sobre el modelo degradado (x^2 con p^D), y el verde la respuesta sobre el modelo nominal obtenido en este trabajo (x^2 con p^N). Como se observa ambas respuestas son muy similares. La salida es capaz de rechazar la perturbación y alcanzar la referencia sobre ambos modelos. Además, las acciones de control son suaves. Por lo tanto, el controlador x^2 es robusto, ya que obtiene una buena respuesta ante los dos escenarios planteados (pila nueva y pila degradada).

6. Conclusiones

Este trabajo ha desarrollado un sistema de control robusto de temperatura eficaz para una pila de combustible PEMFC integrada en una planta micro-CHP. Para ello, se parte de un modelo no lineal validado experimentalmente con la pila de combustible degradada, y de un modelo nominal con la pila de combustible nueva (obtenido en este trabajo). Se plantea una estrategia de control basada en dos controladores PI, ajustados mediante una metodología de optimización multiobjetivo que considera tanto el error en la salida como el esfuerzo de control.

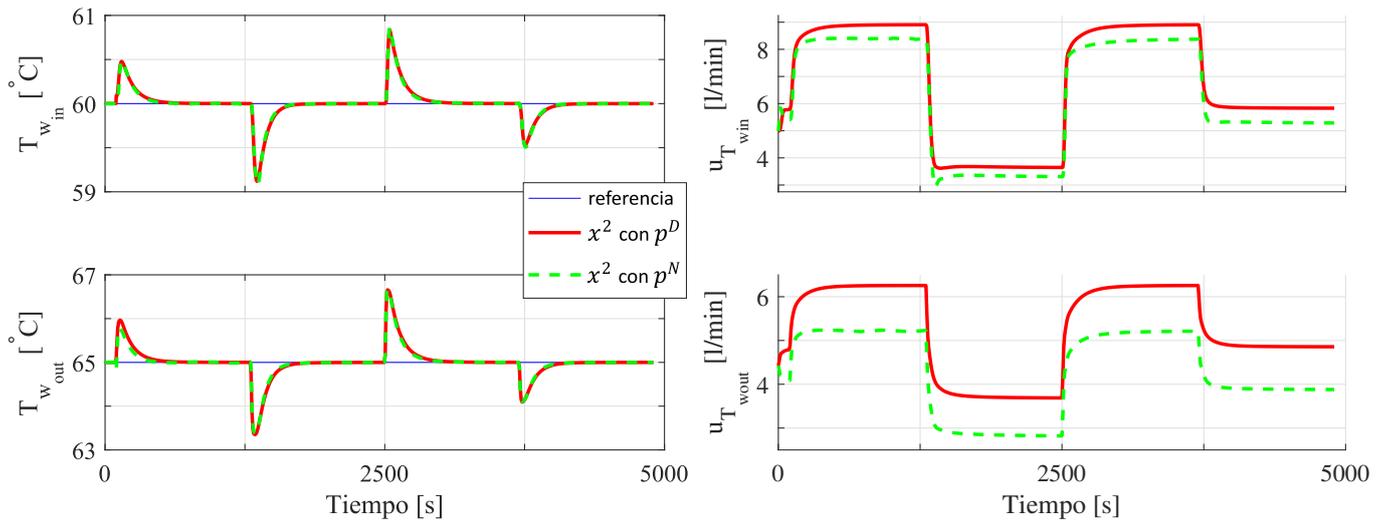


Figura 6: Salidas ($T_{w_{in}}$ y $T_{w_{out}}$) y acciones de control ($u_{T_{w_{in}}}$ y $u_{T_{w_{out}}}$) para el controlador x^2 sobre los dos modelos definidos (degradado p^D y nominal p^N)

La consideración de dos modelos distintos —uno degradado y otro nominal— ha permitido evaluar la robustez del sistema de control frente a variaciones importantes en la planta real. Los resultados muestran que la estrategia propuesta mantiene las temperaturas de operación dentro de los valores requeridos, garantizando así condiciones óptimas de funcionamiento de la pila ante cambios en la demanda eléctrica.

En conjunto, este enfoque proporciona una solución sólida, adaptable y eficiente para el control térmico de sistemas micro-CHP, contribuyendo a mejorar la fiabilidad y vida útil de las pilas de combustible en aplicaciones residenciales.

Agradecimientos

This work was supported in part by the grant PID2021-124908NB-I00 and RED2022-134588-T founded by MCI-N/AEI/10.13039/501100011033/ and by “ERDF A way of making Europe”.

Referencias

- Ang, S. M. C., Fraga, E. S., Brandon, N. P., Samsatli, N. J., Brett, D. J., 2011. Fuel cell systems optimisation—methods and strategies. *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (22), 14678–14703.
- Anthony, D., Keane, A., 08 2003. Robust-optimal design of a lightweight space structure using a genetic algorithm. *Aiaa Journal - AIAA J* 41, 1601–1604. DOI: 10.2514/2.2114
- Castillo, A., Garcia, P., Albertos, P., abr. 2022. Reguladores basados en observadores de perturbaciones: principios de funcionamiento y métodos de diseño. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 19 (4), 343–355. URL: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/16856> DOI: 10.4995/riai.2022.16856

- Ellamla, H. R., Staffell, I., Bujlo, P., Pollet, B. G., Pasupathi, S., 2015. Current status of fuel cell based combined heat and power systems for residential sector. *Journal of Power Sources* 293, 312–328.
- Giménez, S. N., Durá, J. M. H., Ferragud, F. X. B., Fernández, R. S., 2019. Control-oriented modeling of the cooling process of a pemfc-based μ -CHP system. *IEEE Access* 7, 95620–95642.
- Giménez, S. N., Durá, J. M. H., Ferragud, F. X. B., Fernández, R. S., 2020. Design and experimental validation of the temperature control of a pemfc stack by applying multiobjective optimization. *IEEE access* 8, 183324–183343.
- Greiner, H., 10 1996. Robust optical coating design with evolutionary strategies. *Applied optics* 35, 5477–83. DOI: 10.1364/AO.35.005477
- Huerta, H., Osorio, R., Vázquez, N., jul. 2017. Control no lineal robusto de una máquina para fabricación de películas delgadas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 14 (3), 246–255. URL: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/9205> DOI: 10.1016/j.riai.2017.04.002
- Maghanki, M. M., Ghobadian, B., Najafi, G., Galogah, R. J., 2013. Micro combined heat and power (mchp) technologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28, 510–524.
- Martínez-Iranzo, M., Herrero, J. M., Sanchis, J., Blasco, X., García-Nieto, S., 2009. Applied pareto multi-objective optimization by stochastic solvers. *Engineering applications of artificial intelligence* 22 (3), 455–465.
- Rascoñ, R., Álvarez, J., Aguilar, L. T., 2014. Control robusto de posición para un sistema mecánico subactuado con fricción y holgura elástica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 11 (3), 275–284. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S169779121400034X> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.riai.2014.05.005>
- Veyna, U., Blasco, X., Herrero, J., Pajares, A., 2023. Parameter uncertainty modeling for multiobjective robust control design. application to a temperature control system in a proton exchange membrane fuel cell. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 119, 105758.
- Veyna, U., Blasco, X., Herrero, J., Pajares, A., 2025. Strategy for obtaining robust solutions in multi-objective design with uncertainties. *Applied Mathematical Modelling* 138, 115767.