

PROPUESTA MULTI OBJETIVO BASADA EN LÓGICA BORROSA PARA MICRORREDES RENOVABLES RESIDENCIALES HIBRIDADAS CON HIDRÓGENO

Jesús Rey

Universidad de Huelva. Centro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad (CITES).

jesus.rey@diesia.uhu.es

Francisca Segura, José Manuel Andújar, Francisco José Vivas, Miguel Noguera, Borja Millán

Universidad de Huelva. CITES. francisca.segura@diesia.uhu.es, andujar@diesia.uhu.es,

francisco.vivas@diesia.uhu.es, miguel.noguera@diesia.uhu.es, borja.millan@diesia.uhu.es

Resumen

La necesidad de adecuar en todo momento la producción a la demanda energética de los hogares hace necesario, para microrredes basadas en fuentes de energías renovables (FER), el uso de sistemas de almacenamiento energético, para así acumular los excesos energéticos producidos por las energías renovables y usarlos en momentos de déficit de producción, debido a la naturaleza intermitente de las FER. Por otra parte, como las microrredes renovables híbridadas con hidrógeno están compuestas por distintos elementos de producción y almacenamiento de diferentes características y dinámicas, es decir, tienen una naturaleza multicomponente, es imprescindible la implementación de sistemas de gestión energética (SGE), con el propósito de hallar los mejores servicios para cada elemento de la microrred, lo que permitirá conseguir conjuntamente un correcto funcionamiento de la misma. En ese sentido, la propuesta de este artículo es implementar un SGE basado en un controlador lógico borroso (CLB) multivariable y multietapa que haga frente a un problema multiobjetivo para mejorar el comportamiento de los elementos de la microrred en términos de tiempo de vida, eficiencia y costes de operación. Para lograr dicho objetivo, se considerará tanto el balance de potencia, el rendimiento y la degradación de los elementos de la microrred como los costes y beneficios de conexión de la microrred con la red eléctrica principal. En comparación con SGE tradicionales, como los basados en modelos o técnicas heurísticas, el SGE propuesto supone, de acuerdo a los resultados obtenidos, un mayor rendimiento y un mayor beneficio económico.

Palabras clave: microrredes renovables, sistemas de gestión energética, control lógico borroso, sistemas basados en hidrógeno, control multiobjetivo.

1 INTRODUCCIÓN

La actual dependencia de combustibles fósiles, que crean grandes problemas a nivel geopolítico y son altamente perjudiciales a nivel medioambiental, hace necesaria una apuesta por energías renovables y modelos de generación distribuidos, de hecho, las políticas climáticas europeas centran su objetivo siguiendo esta estrategia [1]. Por otra parte, debido a la creciente importancia (desde 1960) del mercado residencial, cuyo patrón de demanda es muy desigual, son necesarios, para garantizar la demanda a partir de fuentes de energía renovables (FER), sistemas de almacenamiento energéticos [2]. Para las microrredes renovables, entre los sistemas de almacenamiento más prometedores, se encuentran los basados en baterías híbridados con los basados en hidrógeno, que se componen generalmente (si la producción, almacenamiento y consumo se da en la misma red) por un electrolizador, un tanque de almacenamiento y un sistema de pila de combustible, ya sea de estructura simple o modular [3]. Si bien respecto a la estructura simple, la estructura modular ofrece mejor comportamiento del sistema de pila de combustible en términos de tiempo de vida y eficiencia [4], requieren un mayor control complejo debido a que añaden un mayor número de variables al sistema de gestión energética (SGE) [5]. No obstante, como el SGE puede abordar el problema de control con mayor grado de libertad, se hace más fácil la gestión de la microrred tanto desde el punto de vista técnico (satisfaciendo la demanda) como desde el punto de vista económico (haciéndola más eficiente y rentable) [6].

En este tipo de microrredes, se puede mejorar el comportamiento de la microrred, evitando, entre otros, problemas relacionados con la potencia reactiva mediante el uso de buses de corriente continua (CC) [1]. Por otra parte, para el

almacenamiento en estos tipos de sistemas híbridos de almacenamiento, a corto-medio plazo funcionan mejor las baterías, mientras que a largo plazo funcionan mejor los sistemas de hidrógeno [7].

En cuanto a la gestión de los sistemas de almacenamiento, se pueden encontrar referencias en las que se proponen diferentes SGE como los que se fundan en técnicas heurísticas, basados en histéresis y reglas deterministas, en los que la producción renovable se emplea, en primer lugar, para recargar baterías [8]. Por otra parte, también se pueden encontrar SGE que, basándose en una doble banda de histéresis, pretenden reducir la degradación que se produce en los sistemas de hidrógeno a partir de los arranques y paradas [9]. A ellos se les suman SGE basados en modelos, en los que se pueden encontrar aplicaciones de control predictivo para resolver problemas complejos de optimización multivariable [10] o de técnicas multiobjetivo lineales invariantes en el tiempo con el propósito de optimizar la distribución energética en el corto plazo, así como reducir la complejidad que conllevan los problemas no lineales [11]. No obstante, entre los SGE que se pueden encontrar en las referencias, no se garantiza ni un control real del bus de CC ni el uso y control de un sistema de pila de combustible modular.

Para afrontar problemas complejos de control y fuertemente no lineales, la técnica de control borroso tipo Mamdani lleva décadas de éxito desde el punto de vista práctico [12]. Para dicha técnica, no se requiere un modelo explícito de la planta bajo control, sino que este se puede reemplazar por reglas lingüísticas fácilmente interpretables [13], que, a su vez, permite incorporar a las reglas el conocimiento de los expertos del problema de control abordado [14]. Para el problema de control que se afronta en este trabajo, se pueden encontrar distintas soluciones basadas en control lógico borroso (CLB) como un CLB optimizado mediante algoritmos genéticos y evolutivos para reducir los costes de operación de la red eléctrica principal y de las horas de operación del sistema de almacenamiento, considerando la variabilidad en los precios de la red eléctrica principal y la intermitencia de las FER [15], o como un CLB basado en el control de los convertidores de potencia de los generadores renovables y de los sistemas de almacenamiento, para poder regular la tensión en el bus de CC de la microrred [16].

Debido a que los elementos de los sistemas de hidrógeno son los que tienen un menor tiempo de vida y un coste más elevado, las acciones de control que se implementan se centran en mejorar la eficiencia del ciclo de hidrógeno (producción, almacenamiento y consumo). De este modo, se pueden encontrar SGE basados en CLB cuyo objetivo es obtener la operación de la pila de

combustible en su punto de mayor eficiencia [17] o para optimizar la eficiencia del sistema de almacenamiento junto a los costes de la red eléctrica principal [18].

La principal novedad de este trabajo es que, para una microrred renovable de uso residencial hibridada con hidrógeno que está conectada a la red principal (que integra el ciclo completo de hidrógeno, cargas residenciales y recarga de vehículo eléctrico, así como un sistema de baterías de plomo ácido tanto para satisfacer la demanda en el corto-medio plazo como para estabilizar la tensión del bus de CC, lo que permite a su vez que los controladores locales de las FER que vierten energía al bus de CC sólo deban preocuparse de la máxima transferencia de potencia y no de estabilizar la tensión a su salida). Además, esta microrred integra un sistema de pila de combustible multi-stack compuesto por dos pilas de combustible y utiliza un SGE basado en un CLB que permite una operación segura de la microrred en función de variables como la energía almacenada, la tensión del bus de CC, el balance de potencia, la degradación y eficiencia del sistema de almacenamiento y el coste de intercambio con la red eléctrica principal, lo que permite resolver un complejo problema multiobjetivo. Además, los resultados obtenidos muestran una mejora en el comportamiento técnico y económico de la microrred.

2 DESCRIPCIÓN DE LA MICRORRED BAJO ESTUDIO

La microrred bajo estudio, ubicada en la Universidad de Huelva, cuenta con un sistema de paneles fotovoltaicos (PV) de 10 kWp de potencia, conectado a un bus de 360 VCC mediante un convertidor de CC/CC. Por otra parte, se disponen de sistemas de almacenamiento de energía: para el almacenamiento a corto-medio plazo se dispone de un banco de baterías de plomo ácido de 36 kWh y, para la respuesta en largo plazo, se dispone de un sistema de hidrógeno formado por un electrolizador alcalino de producción nominal de 1 Nm³/h, un tanque de almacenamiento de 1 Nm³ de capacidad volumétrica y 30 bar de presión y, por último de un sistema multi-stack de pila de combustible tipo PEM (de electrolito de membrana polimérica) de 6 kW, compuesto por dos pilas de diferente degradación conectadas en paralelo. Por último, la microrred cuenta con una comunicación bidireccional con la red principal, Figura 1.

El balance de potencia de la microrred, que se define como la diferencia entre la potencia de generación de origen renovable y la potencia demandada (donde CVAC es el conjunto calefacción, ventilación y aire acondicionado), debe ser satisfecho o bien por los sistemas híbridos de almacenamiento energético

las variables borrosas que aparecen en la Figura 2, en la Tabla 1 se definen sus correspondientes límites inferiores y superiores.

De acuerdo al diseño de la Figura 2, se definen 3 bases de reglas borrosas, una para cada controlador: CLB_E (cuando existe exceso de potencia en la microrred), CLB_D (cuando existe déficit de potencia en la microrred) y CLB_{PCME} (para establecer un control de los stacks de la PCME). Las reglas de cada base se definen a partir de funciones de pertenencia trapezoidales y triangulares con un grado de pertenencia en el intervalo [0,1].

Tabla 1. Rango operativo de las variables borrosas

Variable	Límite inferior	Límite superior	Variable	Límite inferior	Límite superior
$C_{VE}(k)$	0,03 €/kWh	0,08 €/kWh	$P_{REAL}(k+1)$	-10 kW	10 kW
$C_{CE}(k)$	0,03 €/kWh	0,12 €/kWh	$P_{PCME}(k)$	0 kW	6 kW
$D_{EST_{1,2}}(k)$	0 mV/celda	100 mV/celda	$EO_{EST_{1,2}}(k)$	0 kW	3 kW
$NH(k)$	3 Nm ³	27 Nm ³	$SOC(k)$	50%	90%
$P_{REAL}(k)$	-10 kW	10 kW	$V_{BAT}(k)$	330 V	420 V

Donde:

- $C_{VE}(k)$: precio de venta de energía a red (€/kWh).
- $C_{CE}(k)$: precio de compra de energía a red (€/kWh).
- $D_{EST_{1,2}}(k)$: degradación de cada stack (mV/celda).
- $NH(k)$: nivel de hidrógeno almacenado en el tanque (Nm³).
- $EO_{EST_{1,2}}(k)$: estado de operación de cada stack (ON/OFF).
- $SOC(k)$: estado de carga de batería (%).
- $V_{BAT}(k)$: voltaje de batería (V).

Por otra parte, el modo de funcionamiento requerido para el SGE es el que determinará el diseño de las bases de las reglas borrosas: por ejemplo, el exceso de potencia renovable será empleado en primer lugar para recargar la batería (puesto que ello permite estabilizar la tensión del bus de CC) y, una vez hecho esto, la decisión se tomará tras realizar un balance entre el nivel de hidrógeno almacenado y el precio de venta de energía a la red principal, mientras que cuando ocurre una situación de déficit de potencia renovable en la microrred se prioriza en primer lugar el uso de la energía almacenada en baterías para satisfacer la demanda y, en segundo lugar, se prioriza el uso del hidrógeno almacenado en el tanque, no sin antes hacer un balance entre el coste de compra de energía de la red principal, la degradación del sistema

de pila de combustible multi-stack y el nivel de hidrógeno almacenado.

4 RESULTADOS

Para un perfil de generación FV en la zona climática de Huelva (suroeste de España) basado en el valor medio de la generación anual y un perfil de consumo típico de una familia, de acuerdo a los datos del Instituto para la Diversificación y el Ahorro Energético (IDAE), se recoge el perfil de potencia de diferentes variables de la microrred bajo estudio como la potencia renovable (PFV), la potencia para calefacción, ventilación y aire acondicionado (PCVAC), la potencia destinada a la recarga del vehículo eléctrico (PVE) y la potencia para aplicaciones del hogar (PAH), Figura 3.

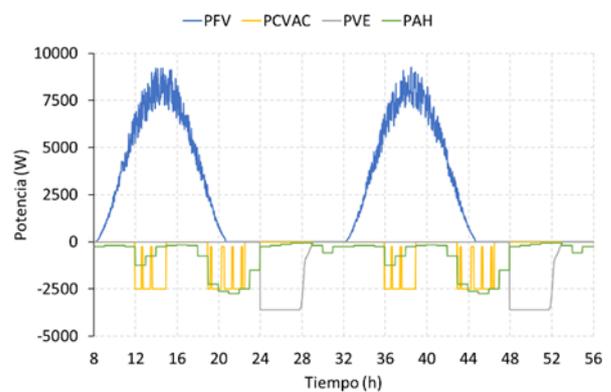


Figura 3. Perfil de potencia de las variables de generación y consumo de la microrred: PFV, PCVAC, PVE y PAH.

Tras realizar una simulación durante 791 días, pues este es el tiempo en el que el sistema de pila de combustible sufre la mayor degradación posible, se realiza una comparación de las variables de potencia de la microrred durante el primer tramo de operación (horas 8-56) y durante el último tramo de operación (horas 18920-18968), tal y como se refleja en Figura 4. Para validar el comportamiento del SGE propuesto, se realiza una comparación de la degradación que sufren cada uno de los stacks que conforman el sistema de pila de combustible bajo dicho SGE con la que tendría si se aplicasen otros SGE como, en este caso, un SGE basado en histéresis (SGE-HIST) [19] y dos basados en modelos de control predictivo (MPC), que serán SGE-MPC1 [20] y SGE-MPC-2 [21], Figura 5.

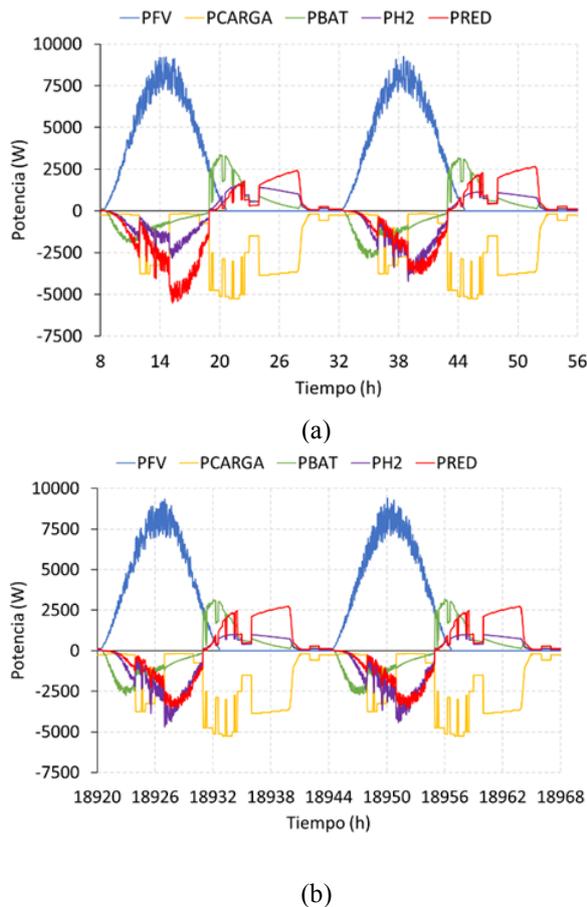


Figura 4. Variables de potencia de la microrred estudiada para el SGE propuesto durante: a) primer tramo (horas 8-56); b) último tramo (horas 18.920-18.968).

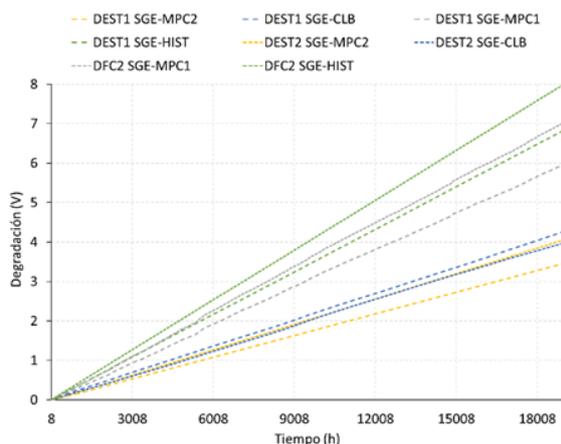


Figura 5. Degradación de cada stack para diferentes SGE: basados en MPC (1 y 2), basado en histéresis (HIST) y el propuesto en este trabajo basado en control lógico borroso (CLB).

En última instancia, también se realiza una validación del SGE propuesto desde un punto de

vista económico. Para ello, se realiza una comparación del coste de operación de la microrred para el SGE desarrollado en este trabajo respecto al coste que habría sido obtenido si el SGE aplicado hubiera sido uno de los mencionados anteriormente [19–21] o si hubiese una conexión permanente a la red eléctrica principal (es decir, si no hubiese microrred), Figura 6. En la conexión con la red eléctrica principal, un coste positivo (>0 €) significa compra de energía y coste negativo (<0 €) significa venta de energía.

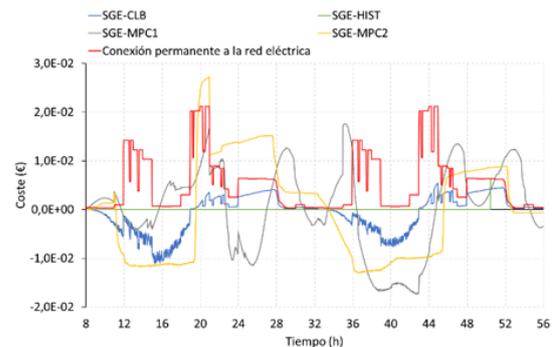


Figura 6. Coste de operación de la microrred para el SGE propuesto (CLB), en comparación con los SGE confrontados y, por otra parte, con una conexión permanente a la red principal.

5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este trabajo presenta, para una microrred renovable de uso residencial, un SGE basado en un CLB, con el propósito de resolver un complejo problema multiobjetivo cuya solución permita una mejora en el comportamiento a nivel técnico y económico de la microrred. Para alcanzar dicho propósito, el controlador desarrollado usa dos CLB que operan en paralelo (para los momentos de exceso y déficit de potencia, respectivamente) y un CLB local para la gestión de cada stack del sistema modular de pila de combustible (en este trabajo compuesto por dos pilas). Además, el controlador desarrollado incorpora, mediante reglas borrosas (intuitivas y de interpretación sencilla), el conocimiento de los expertos en el manejo de microrredes del tipo que se ha presentado en este trabajo.

A nivel técnico, los resultados muestran un menor uso de los sistemas de hidrógeno a medida que aumenta la degradación del sistema de pilas de combustible (es decir, durante las últimas horas de simulación) a pesar de un mayor uso de la red principal (lo que implica un mayor coste), Figura 4. Esto se hace con el propósito de evitar una mayor degradación del sistema de pila de combustible

multi-stack. Por otra parte, en cuanto a la degradación de los stacks del PCME, debido al uso del CLB local diseñado en este trabajo, se consigue una degradación acumulada similar para ambos stacks. Además, en comparación con otros SGE que priorizan el uso de recursos propios con el fin de evitar depender (en la medida de lo posible) de la red eléctrica principal, como el SGE-HIST y el SGE-MPC1, la degradación del SGE desarrollado es considerablemente menor. Por otra parte, en comparación con el SGE-MPC2, que hace un uso más restrictivo de los sistemas de almacenamiento energético, la degradación acumulada de los stacks del SGE propuesto es superior a la del SGE-MPC2. No obstante, la degradación de cada uno de los stacks del SGE propuesto es más pareja, mientras que la del SGE-MPC2 es desigual. Además, como la degradación del stack más degradado del SGE-MPC2 es similar a la degradación de los stacks del SGE desarrollado, Figura 5, en la práctica, como la vida útil del PCME viene determinada por el stack que más se degrada, el tiempo de vida útil del PCME del SGE propuesto será similar al SGE-MPC2.

Por otro lado, desde el punto de vista energético y económico, el SGE propuesto supone, respecto a una conexión permanente con la red principal (en la que sólo hay compra de energía), un ahorro energético (energía que se deja de comprar de la red principal) de más de 3000 kWh y un ahorro económico (debido a la energía que se deja de comprar de la red principal y la que se vende a la misma) de más de 3000 €. Respecto a los otros SGE con los que se compara el SGE desarrollado, encontramos que, respecto al SGE-HIST (que sólo hace uso de la red principal en momentos de gran déficit/exceso de potencia, sin considerar el coste de conexión con la red principal), el SGE propuesto supone un ahorro energético de más de 500 kWh y un ahorro económico de alrededor de 400 €. Por otra parte, respecto al SGE-MPC2 (que hace un mayor uso de la red principal para evitar la degradación de los sistemas de almacenamiento) el ahorro energético para el SGE desarrollado es de unos 600 kWh, mientras que el ahorro económico es de más de 600 € y, por último, respecto al SGE-MPC1 (que establece un control que minimiza el coste de operación de la red principal), el SGE implementado supone menores beneficios económicos (de unos 400 €), sin embargo, sí supone un mayor ahorro energético (de unos 180 kWh).

En resumen, el SGE propuesto, más sencillo de resolver y con un lenguaje más intuitivo que otros modelos más complejos, supone mejores resultados a nivel técnico, económico y ambiental (pues se deja de comprar energía de la red principal, cuyo mix energético lleva asociada una huella de carbono, mientras que la energía producida en la microrred

renovable no conlleva emisiones asociadas), respecto a otros SGE que se pueden encontrar en la literatura.

Como trabajos futuros se propone la aplicación de un SGE basado en la técnica de control borroso tipo Sugeno [22], en aras de comparar su comportamiento con el del SGE propuesto para este trabajo tanto desde un punto de vista económico como técnico. Por otra parte, otro posible futuro trabajo puede ser la aplicación del SGE implementado en este trabajo, pero sustituyendo la energía fotovoltaica como FER por otra FER con menor capacidad de gestión (es decir, menos predecible) como la energía eólica.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido un resultado del proyecto “H₂ Integración & Control: Integración y Control de una planta piloto basada en hidrógeno en aplicaciones residenciales para el suministro de energía” Ref: PID2020-116616RB-C31, financiado por el Gobierno de España. También del proyecto “SALTES: Smartgrid con Arquitectura reconfigurable para ensayo de Técnicas de control y Prioridad de Almacenamiento de Energía” Ref: P20-00730, financiado por el Gobierno de Andalucía.

Financiación:

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el proyecto El vector hidrógeno verde. Aplicación residencial y de movilidad, aprobado en la convocatoria de proyectos precompetitivos de investigación de la Cátedra Fundación Cepsa de la Universidad de Huelva.

English summary

MULTI-OBJECTIVE PROPOSAL BASED ON FUZZY LOGIC FOR HYDROGEN-HYBRIDIZED RESIDENTIAL RENEWABLE MICROGRIDS

Abstract

To adapt production to household energy demand at all times it is necessary, for microgrids based on renewable energy sources (RES), to use energy storage systems in order to accumulate excess energy produced by renewable energies and use them in times of production deficit, due to the intermittent nature of RES. On the other hand, as hydrogen hybridized renewable microgrids are composed of different production and storage elements with

different characteristics and dynamics, i.e., they have a multicomponent nature, so it is essential to implement energy management systems (EMS), in order to find the best services for each element of the microgrid, which will jointly achieve a correct operation of the microgrid. In that sense, the proposal of this article is to implement an EMS based on a multivariable and multistage fuzzy logic controller (FLC) that faces a multi-objective problem to improve the behavior of the microgrid elements in terms of lifetime, efficiency and operation costs. To achieve that objective, both the power balance, performance and degradation of the microgrid elements and the costs and benefits of connecting the microgrid to the main power grid will be considered. Compared to traditional EMS, such as those based on models or heuristic techniques, the proposed EMS implies, according to the results obtained, a higher performance and a higher economic benefit.

Keywords: renewable microgrids, energy management systems, fuzzy logic controller, hydrogen-based systems, multi-objective control

Acrónimos

CLB	Control lógico borroso
CC	Corriente continua
EMS	Energy management system
FER	Fuentes de energía renovables
FLC	Fuzzy logic controller
MPC	Model predictive control
RES	Renewable energy sources
SGE	Sistemas de gestión energética
SHAE	Sistema híbrido de almacenamiento de energía

Lista de símbolos

$C_{ES}(k)$	Precio de venta de energía a red (€/kWh)
$C_{EP}(k)$	Precio de compra de energía a red (€/kWh)
$DFC_{1,2}(k)$	Degradación de pila de combustible (mV/cell)
$HL(k)$	Nivel de hidrógeno almacenado en el tanque (Nm ³)
$P_{BAT}(k)$	Potencia de batería (W)
$P_{ELS}(k)$	Potencia consumida por electrolizador (W)
$P_{Grid}(k)$	Potencia de la red eléctrica principal (W)
$P_{GRID_{in}}(k)$	Potencia suministrada por la red eléctrica principal (W)
$P_{GRID_{out}}(k)$	Potencia vertida a la red eléctrica principal (W)
$P_{H_2}(k)$	Potencia del sistema de hidrógeno (W)
$P_{LOAD}(k)$	Potencia demandada por la carga (W)
$P_{MSFC}(k)$	Potencia generada por el sistema modular de pila de combustible (W)
$P_{PV}(k)$	Potencia generada por los paneles PV

$EO_{EST_{12}}(k)$	(W) Estado de operación de cada stack (ON/OFF).
$SOC(k)$	Estado de carga de batería (%)
$V_{BAT}(k)$	Voltaje de batería (V)

Referencias

- [1] Vivas FJ, De las Heras A, Segura F, Andújar JM. A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;82:126–55. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.014>.
- [2] Jafari M, Malekjamshidi Z, Lu DDC, Zhu J. Development of a Fuzzy-Logic-Based Energy Management System for a Multiport Multioperation Mode Residential Smart Microgrid. *IEEE Trans Power Electron* 2019;34:3283–301. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2850852>.
- [3] Abo-Elyousr FK, Guerrero JM, Ramadan HS. Prospective hydrogen-based microgrid systems for optimal leverage via metaheuristic approaches. *Appl Energy* 2021;300:117384. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2021.117384>.
- [4] Marx N, Boulon L, Gustin F, Hissel D, Agbossou K. A review of multi-stack and modular fuel cell systems: Interests, application areas and on-going research activities. *Int J Hydrogen Energy* 2014;39:12101–11. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2014.05.187>.
- [5] Calderón AJ, Vivas FJ, Segura F, Andújar JM. Integration of a Multi-Stack Fuel Cell System in Microgrids: A Solution Based on Model Predictive Control. *Energies* 2020, Vol 13, Page 4924 2020;13:4924. <https://doi.org/10.3390/EN13184924>.
- [6] Ullah K, Hafeez G, Khan I, Jan S, Javaid N. A multi-objective energy optimization in smart grid with high penetration of renewable energy sources. *Appl Energy* 2021;299:117104. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2021.117104>.
- [7] Herr N, Nicod JM, Varnier C, Jardin L, Sorrentino A, Hissel D, et al. Decision process to manage useful life of multi-stacks fuel cell systems under service constraint. *Renew Energy* 2017;105:590–600. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.01.001>.
- [8] Bizon N, Oproescu M, Raceanu M. Efficient

- energy control strategies for a Standalone Renewable/Fuel Cell Hybrid Power Source. *Energy Convers Manag* 2015;90:93–110. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.11.002>.
- [9] Ziogou C, Ipsakis D, Elmasides C, Stergiopoulos F, Papadopoulou S, Seferlis P, et al. Automation infrastructure and operation control strategy in a stand-alone power system based on renewable energy sources. *J Power Sources* 2011;196:9488–99. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2011.07.029>.
- [10] Hu J, Shan Y, Guerrero JM, Ioinovici A, Chan KW, Rodriguez J. Model predictive control of microgrids – An overview. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;136:110422. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110422>.
- [11] Freire VA, de Arruda LVR, Bordons C, Marquez JJ. Optimal Demand Response Management of a Residential Microgrid using Model Predictive Control. *IEEE Access* 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3045459>.
- [12] Mamdani EH, Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int J Man Mach Stud* 1975;7:1–13. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2).
- [13] Barragan AJ, Enrique JM, Segura F, Andujar JM. Iterative Fuzzy Modeling of Hydrogen Fuel Cells by the Extended Kalman Filter. *IEEE Access* 2020;8:180280–94. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013690>.
- [14] Andújar JM, Barragán AJ, Gegúndez ME, Maestre M. Control borroso multivariable basado en heurística. un caso práctico: grúa porta contenedores. *Rev Iberoam Automática e Informática Ind RIAI* 2007;4:81–9. [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(07\)70212-1](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(07)70212-1).
- [15] Athari MH, Ardehali MM. Operational performance of energy storage as function of electricity prices for on-grid hybrid renewable energy system by optimized fuzzy logic controller. *Renew Energy* 2016;85:890–902. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.07.055>.
- [16] Nabipour N, Qasem SN, Jermisittiparsert K. Type-3 fuzzy voltage management in PV/Hydrogen fuel cell/battery hybrid systems. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45:32478–92. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.08.261>.
- [17] Keskin Arabul F, Arabul AY, Kumru CF, Boynuegri AR. Providing energy management of a fuel cell–battery–wind turbine–solar panel hybrid off grid smart home system. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:26906–13. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.02.204>.
- [18] Al-Sakkaf S, Kassas M, Khalid M, Abido MA. An Energy Management System for Residential Autonomous DC Microgrid Using Optimized Fuzzy Logic Controller Considering Economic Dispatch. *Energies* 2019, Vol 12, Page 1457 2019;12:1457. <https://doi.org/10.3390/EN12081457>.
- [19] Vivas FJ, De las Heras A, Segura F, Andújar JM. H2RES2 simulator. A new solution for hydrogen hybridization with renewable energy sources-based systems. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:13510–31. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.02.139>.
- [20] Garcia-Torres F, Bordons C. Optimal Economical Schedule of Hydrogen-Based Microgrids With Hybrid Storage Using Model Predictive Control. *IEEE Trans Ind Electron* 2015;62:5195–207. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2412524>.
- [21] Valverde L, Bordons C, Rosa F. Integration of fuel cell technologies in renewable-energy-based microgrids optimizing operational costs and durability. *IEEE Trans Ind Electron* 2016;63:167–77. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2465355>.
- [22] Dhimish M, Holmes V, Mehrdadi B, Dales M. Comparing Mamdani Sugeno fuzzy logic and RBF ANN network for PV fault detection. *Renew Energy* 2018;117:257–74. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.10.066>.



© 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).