



Universidad de Cádiz

Control Hardware-In-the-Loop de Microrredes Multi-energía

Pablo Horrillo-Quintero · Pablo García-Triviño · Ehsan Hosseini · Carlos Andrés García-Vázquez · Higinio Sánchez Sainz · Luis M. Fernández-Ramírez

Published in:

Actas XXI edición del Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI'24)

DOI (link to publication from Publisher):

Not available

Publication date:

Not available

Document Version:

Accepted version

Citation for published version:

Horrillo-Quintero, P. García-Triviño, P. Hosseini, E. García-Vázquez, C.A. Sánchez-Sainz, H. Fernández-Ramírez, L.M. "Control Hardware-In-the-Loop de Microrredes Multi-energía" Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI), Granada, España, 2024.

Control Hardware-In-the-Loop de Microrredes Multi-energía

Pablo Horrillo-Quintero¹, Pablo García-Triviño¹, Ehsan Hosseini¹, Carlos Andrés García-Vázquez¹, Higinio Sánchez-Sainz²,
y Luis M. Fernández-Ramírez¹

¹ Grupo de Investigación TESYR, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Cádiz (UCA), ETSI Algeciras, España

² Grupo de Investigación TESYR, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Cádiz (UCA), ESI Puerto Real, España
pablo.horrillo@uca.es, pablo.garcia@uca.es, ehsan.hosseini@uca.es, carlosandres.garcia@uca.es, higinio.sanchez@uca.es,
luis.fernandez@uca.es

Resumen—Este artículo presenta la validación en tiempo real del control de una microrred multi-energía (MRME) empleando un montaje hardware-in-the-loop (HIL). El montaje HIL está compuesto por una unidad OPAL-RT4512, una unidad de control dSPACE MicroLabBox y un osciloscopio digital Yokogawa DLM4038. La MRME está modelada de manera dinámica incluyendo vectores energéticos de electricidad, calor, frío e hidrógeno. Se diseña un sistema de gestión de energía basado en lógica difusa (SGE-LD) para establecer un funcionamiento coordinado entre los vectores energéticos. Se considera una planta de energía solar fotovoltaica como la principal fuente renovable, mientras que calderas de gas y eléctrica, y una enfriadora de absorción, conforman las fuentes térmicas. Un sistema de almacenamiento de energía (SAE) híbrido compuesto por una batería (BAT), una pila de combustible, un electrolizador y un tanque de hidrógeno respaldan la producción renovable. El SGE-LD evalúa la potencia fotovoltaica y la demanda eléctrica, regulando la temperatura en las fuentes térmicas para disminuir la dependencia de la red local. Al analizar diversos escenarios que abarcan condiciones climáticas, térmicas, flujos de agua y demanda eléctrica, los resultados obtenidos con equipos reales demuestran la viabilidad práctica de la estrategia de control propuesta.

Palabras clave—Microrredes multi-energía, hardware-in-the-loop, lógica difusa, sistema de gestión de energía, control.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, es cada vez más común que la demanda eléctrica esté acompañada por necesidades de calefacción y refrigeración en ciudades e industrias. En enfoques clásicos, las fuentes combinadas de electricidad, calor y refrigeración funcionan de dos modos: uno se alinea con la demanda eléctrica, mientras que el otro corresponde a los requerimientos de energía térmica [1]. La complementariedad de diferentes vectores energéticos aumenta la eficiencia del sistema y reduce el consumo energético total. A nivel de redes de distribución, una MRME integra unidades distribuidas de generación de energía, incluidas plantas de energía solar fotovoltaica y aerogeneradores, así como sistemas combinados de calefacción y refrigeración. Estos sistemas operan colectivamente para suministrar tanto energía eléctrica como térmica simultáneamente.

El estudio de las MRME es un tema de investigación actual que atrae el interés de investigadores en todo el mundo. El enfoque predominante en los estudios de MRME ha sido centrarse en una perspectiva de estado estacionario. Por lo

tanto, los estudios se centran en optimizar el flujo de energía entre varios vectores para minimizar costos o reducir las emisiones equivalentes de CO₂.

En [2], se presenta una optimización en un horizonte diario de MRME para minimizar el costo total, mientras se complementan el vector eléctrico y térmico. Sin embargo, no se consideró el comportamiento dinámico, y la solución proporcionada está limitada a las restricciones establecidas en el estudio.

En [3], se diseñó un SGE óptimo de múltiples niveles para participar en un mercado eléctrico desregulado teniendo en cuenta los gastos asociados con la participación en el mercado y los costos adicionales.

El uso de SAE, tanto eléctricos como térmicos, ha demostrado ser una solución efectiva para minimizar costes y facilitar la integración de tecnologías eléctricas renovables (TER) dentro de las MRME [4].

La reducción de emisiones de gas es un tema abordado en el estudio de las MRME. En [5], se estudió una MRME que abarca electricidad y gas en una programación diaria. La estrategia de planificación presentada logró disminuir la generación de emisiones de carbono. Sin embargo, el modelo de MRME incluía restricciones fijas y no se tuvo en cuenta la diferente respuesta de velocidad entre los vectores térmicos y eléctricos. Enfoques similares se pueden encontrar en [6,7].

En [8], se sugirieron tres modelos de optimización del flujo de potencia para una estructura de energía eléctrica IEEE-39 y una red de distribución de gas de 48 nodos. Sin embargo, no se validaron las soluciones propuestas en un escenario real.

En las redes de distribución actuales, los operadores del sistema necesitan planificar y controlar TER, así como SAE, para satisfacer eficientemente la demanda multi-energética. El enfoque de control de MRME requiere modelos dinámicos y SGE capaces de integrar las diferentes velocidades de los sistemas eléctricos y térmicos.

Este artículo presenta la validación experimental en tiempo real de una MRME que incluye vectores de electricidad, calor, frío, así como hidrógeno verde. Los vectores se complementan mediante SGE-LD. El objetivo del SGE-LD es ajustar la temperatura y el consumo de energía de las fuentes térmicas, basándose en energía renovable y la energía disponible en los SAE. De esta manera, el vector térmico se coordina directamente con el vector eléctrico, adaptándose dinámicamente a las condiciones climáticas y a las cargas eléctricas y térmicas. La producción de hidrógeno verde a través de la planta de energía fotovoltaica apoya a la batería para minimizar la dependencia de la red local.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, Agencia Estatal de Investigación, y Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR" (Proyecto TED2021-129631B-C32 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y NextGenerationEU/PRTR).

La MRME y el SGE-LD se implementan en una simulación HIL en tiempo real. La MRME se ejecuta en una unidad OPAL-RT4512, mientras que el SGE-LD corre en una unidad dSPACE MicroLabBox. La simulación HIL permite probar y validar sistemas de control y modelos de manera flexible y rentable, sin necesidad de equipos reales.

El resto de este artículo está estructurado de la siguiente manera: la Sección II describe la configuración de la MRME en el entorno HIL, la Sección III proporciona detalles del SGE-LD, los resultados y su discusión se presentan en la Sección IV, y finalmente, la Sección V concluye el artículo.

II. CONFIGURACION EXPERIMENTAL HIL

La simulación HIL emerge como una herramienta potente para incorporar aplicaciones de simulación en tiempo real complejas en diversos sectores, como las microrredes y los sistemas de energía. Inicialmente, se desarrolla un modelo de simulación de sistemas de energía en el dominio del tiempo en MATLAB, el cual luego se transforma en un formato compatible para su ejecución en el simulador en tiempo real OPAL-RT4512.

Esta plataforma se selecciona por su adaptabilidad, escalabilidad y características, todo dentro de un marco económico. La validación temprana de las funcionalidades de control se hace posible a través de este enfoque. Las plantas virtuales de MRME presentan una alternativa rentable, ofreciendo flexibilidad para probar condiciones extremas, un logro que podría ser prohibitivamente costoso o impráctico con hardware real. A medida que las ecuaciones y estados del sistema simulado se resuelven con precisión, el simulador en tiempo real replica hábilmente el comportamiento del sistema físico del mundo real.

Este artículo utiliza el simulador HIL para ejecutar en tiempo real una MRME y emplea entradas/salidas analógicas entre el simulador OPAL RT y el controlador dSPACE MicroLabBox. La importancia del banco de pruebas de simulación en tiempo real para facilitar la validación temprana

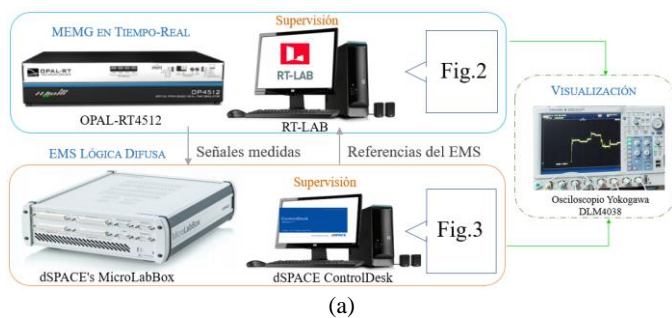


Fig. 1. Configuración experimental HIL implementada en el laboratorio: (a) Esquema, (b) Fotografía.

del control se destaca en este trabajo, antes de su implementación en escenarios del mundo real.

La estructura de la configuración experimental HIL implementada en el laboratorio se muestra en la Figura 1. Los modelos de la MRME se ejecutan en la unidad OPAL-RT4512. El sistema OPAL es un simulador que permite la ejecución en tiempo real de modelos de MATLAB/Simulink.

La configuración de OPAL-RT4512 se lleva a cabo en el software RT-LAB, que ofrece funciones como la creación, carga, edición y monitorización de modelos. Para implementar el SGE, se utiliza una unidad dSPACE MicroLabBox. Este hardware compacto y adaptable se programa utilizando Simulink y está diseñado para el prototipado rápido y prueba de algoritmos de control. Cuenta con una FPGA robusta, amplias capacidades de entradas y salidas dentro de un rango de ± 10 V y un procesador de doble núcleo.

Además, se usa un osciloscopio digital Yokogawa DLM4038 con fines de visualización. Este osciloscopio es conocido por sus precisas funcionalidades de análisis de formas de onda.

III. MODELADO DE LA MRME

La Figura 2 muestra un esquema de la configuración adoptada para la MRME propuesta en este artículo. El vector térmico se divide en dos circuitos separados, uno para agua caliente y otro para agua fría. Una caldera eléctrica de 23 kW alimentada por fuentes sostenibles satisface los requisitos de agua caliente, mientras que una caldera de gas mantiene la temperatura del bus térmico caliente y proporciona soporte de respaldo a la caldera eléctrica. La demanda térmica está caracterizada por un sistema de calefacción por suelo radiante doméstico conectado al circuito de agua caliente.

Además, una enfriadora de absorción de 15 kW está vinculada al circuito de agua de refrigeración para satisfacer los requisitos de enfriamiento. El vector eléctrico de la MRME cuenta con una planta de energía solar fotovoltaica con una capacidad máxima de 18 kWp, que comprende seis conjuntos de diez módulos cada uno con una potencia nominal de 300 W. También incluye una carga eléctrica y una red local trifásica que opera a 400V. El SAE híbrido está compuesto por una BAT de iones de litio de 26.6 kWh y un sistema de hidrógeno verde. Este sistema incluye una célula de combustible de 9.5 kW, un electrolizador de 20 kW y un tanque de almacenamiento de hidrógeno de 1 kg.

Los modelos térmicos están diseñados utilizando la herramienta CARNOT integrada en MATLAB/Simulink, un software desarrollado por el Instituto de Investigación Solar

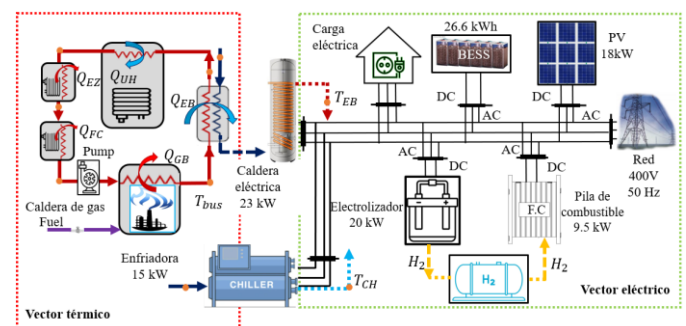


Fig. 2. Esquema de la MRME propuesta.

en Juelich, Alemania [10]. La salida de temperatura de la caldera de gas se modela dinámicamente basándose en los principios del balance de energía y la primera ley de la termodinámica [9,10].

$$\left(m \cdot c \cdot \frac{1}{N}\right) \cdot \frac{dT_{bus}}{dt} = \left(U \cdot A \cdot \frac{1}{N}\right) \cdot (T_{amb} - T_{bus}) + (\dot{m}_{bus} \cdot c_f) \cdot (T_{in} - T_{bus}) + Q_{GB} \quad (1)$$

En la ecuación (1), m representa la capacidad de la caldera, c representa la capacidad calorífica de la caldera, T_{bus} es la temperatura del circuito de agua caliente, N indica la cantidad de nodos, $U \cdot A$ representa el coeficiente de pérdida de calor hacia el entorno, T_{amb} representa la temperatura ambiente, \dot{m}_{bus} representa el caudal másico en el bus térmico, c_p representa la capacidad calorífica del fluido, T_{in} representa la temperatura de entrada a la caldera y Q_{GB} representa el calor aportado por la caldera de gas.

De manera similar, la caldera eléctrica se simula como un calentador eléctrico alimentado por fuentes de energía renovable, considerando el balance energético y las pérdidas de calor al entorno [9,10].

$$C_{EB} \cdot \frac{dT_{EB}}{dt} = U \cdot A \cdot (T_{amb} - T_{EB}) + (\dot{m}_{water} \cdot c_p) \cdot (T_{bus} - T_{EB}) + P_{EB} \quad (2)$$

En la ecuación (2), C_{EB} representa la capacidad térmica de la caldera eléctrica, T_{EB} denota la temperatura de salida de la caldera eléctrica, \dot{m}_{water} representa el caudal másico dentro de la caldera eléctrica, y P_{EB} indica la potencia proporcionada por la caldera eléctrica.

Para la enfriadora de absorción, se utilizan curvas características y el coeficiente de rendimiento, derivados de una unidad de enfriamiento real. Estas curvas se obtienen del modelo LI 16TER+, una bomba de calor aire-agua reversible con recuperación de calor residual proporcionada por Dimplex [11].

El sistema fotovoltaico seleccionado se detallada en [12], y se emplea en este artículo por su demostrada precisión y estructura sencilla, como lo confirman estudios previos [13]. El modelo de la BAT se basa en el disponible en SimPowerSystems integrado en Simulink [14]. Ha sido adaptado para ajustarse a las curvas de perfil de Tensión-Corriente (V-I) y Tensión-Estado de Carga (V-SOC), junto con el comportamiento dinámico de la BAT.

El modelo de electrolizador utilizado en este estudio se basa en el modelo de membrana de intercambio de protones disponible en la biblioteca Simscape [15]. Este electrolizador utiliza energía renovable para llevar a cabo la división electrolítica del agua en hidrógeno y oxígeno, considerando también la energía térmica liberada durante el proceso.

Para el modelo de la pila de combustible se adopta el modelo de pila de combustible de membrana de intercambio de protones documentado en [16] dentro de la biblioteca Simscape. Esta pila de combustible genera energía eléctrica consumiendo el hidrógeno verde producido durante la electrolisis.

El tanque de hidrógeno se modela de acuerdo con la variación temporal de los flujos másicos de entrada y salida en el tanque.

Mantener niveles óptimos de temperatura y humedad en el paquete de la pila de combustible es crucial para su

funcionamiento eficiente en diversas cargas. Por lo tanto, la energía térmica generada durante la electrolisis se recupera y se circula dentro del circuito de agua caliente.

IV. SGE BASADO EN LOGICA DIFUSA

Este artículo propone un SGE-LD para llevar a cabo el control de la MRME presentada en la Sección II. El objetivo de este SGE-LD es establecer una coordinación eficiente de los vectores de electricidad, calor, frío e hidrógeno mientras se garantizan las demandas eléctricas y térmicas.

A diferencia de los métodos de control tradicionales basados en modelos matemáticos precisos, la LD se basa en el conocimiento del sistema por parte del diseñador, permitiendo una toma de decisiones más adaptable y resiliente frente a variaciones dinámicas y eventos impredecibles.

La operación de LD se divide en tres etapas: *fuzzyfication*, reglas-base y *defuzzyfication*. La *fuzzyfication* consiste en traducir a valores de pertenencia en conjuntos difusos definidos por funciones de membresía adecuadas. Se aplican las reglas de operación predefinidas para inferir las acciones de control necesarias. El sistema de reglas-base procesa las entradas difusas, activando las reglas relevantes y agregando sus contribuciones de acuerdo con su peso relativo. Por último, los valores de salida difusos se convierten en variables que representan las acciones de control específicas a tomar.

Cabe destacar que los componentes controlados en el MRME son las fuentes térmicas y los SAE, como apoyo energético para la producción de energía renovable. Por lo tanto, la planta de energía fotovoltaica opera en el punto de máxima potencia de acuerdo con un algoritmo Perturbe y Observe (P&O) y no se considera en la inferencia de la lógica difusa.

La novedad del SGE-LD presentado radica en establecer dinámicamente el punto de operación de las fuentes térmicas con respecto a la energía renovable disponible (P'_{NET}) y el estado de energía (SOE) de los SAE. P'_{NET} es la diferencia entre la producción fotovoltaica (P_{PV}) y la carga eléctrica (P_{LOAD}). Por otro lado, el SOE de los SAE nos permite ilustrar el SOC de BAT y el nivel de hidrógeno (H_L) en un parámetro único, definido de la siguiente manera [17]:

$$SOE = (E_{H_2}^{dis} + E_{BAT}^{dis}) / (E_{H_2}^{rated} + E_{BAT}^{rated}) \quad (3)$$

donde $E_{H_2}^{dis}$ es la energía disponible en el tanque de hidrógeno, E_{BAT}^{dis} es la energía disponible en la batería, $E_{H_2}^{rated}$ es la energía nominal en el tanque de hidrógeno, y E_{BAT}^{rated} representa la capacidad nominal de la batería. Estos parámetros se definen en detalle en [17].

Cinco salidas se consideran en el SGE-LD: la temperatura de referencia para el bus térmico caliente (T_{bus}^{ref}), la temperatura máxima del calentador eléctrico (T_{EB}^{max}), el consumo de la caldera eléctrica (P_{EB}), la temperatura máxima de la enfriadora de absorción (T_{CH}^{max}), y la energía de enfriamiento suministrada por la enfriadora (Q_{CH}) como se muestra en la Fig. 3. En cuanto a las funciones de pertenencia, se utilizan cinco para caracterizar P'_{NET} (NL, N, Z, P, PH), y tres para SOE, P_{EB} , T_{bus}^{ref} , T_{EB}^{max} , T_{CH}^{max} y Q_{CH} (L, M, H)

El objetivo del SGE-LD es minimizar la dependencia de la red eléctrica local para suministrar las cargas térmicas y

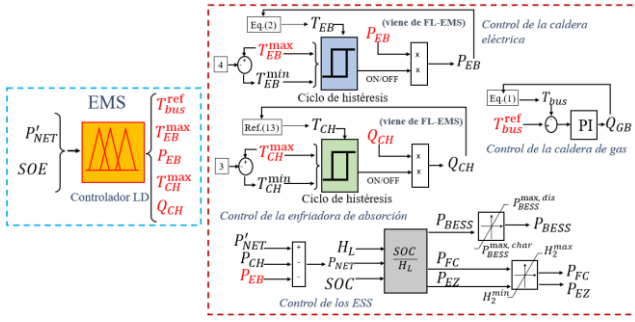


Fig. 3. Esquema general del control de la MRME.

eléctricas. Por lo tanto, si P'_{NET} toma un valor alto, eso significa que la energía renovable actúa como el vector energético principal. La caldera eléctrica puede operar a altas temperaturas, mientras que la enfriadora de absorción funciona a bajas temperaturas, y el consumo de gas se reduce para mantener la temperatura en el bus térmico caliente. Por otro lado, si P'_{NET} toma un valor bajo, eso significa que no hay suficiente energía renovable para suministrar a las fuentes térmicas. T_{EB}^{max} se reduce, mientras que T_{CH}^{max} se incrementa para reducir el consumo de energía. La caldera de gas aumenta T_{bus}^{ref} para compensar la reducción en T_{EB}^{max} y mantener el confort en la demanda de agua caliente.

Este modo de operación permite un uso de energía más inteligente y un menor consumo. Esto se debe a que la lógica difusa evita un consumo "todo o nada", regulando en cada momento el consumo de la caldera eléctrica y la enfriadora de absorción, y no se limita a su potencia nominal. Considerando el SOE de los SAE, la lógica difusa evalúa las fluctuaciones en la producción de energía fotovoltaica y evita el consumo de la red local, proporcionando un amplio rango de operación, ya que se consideran múltiples condiciones simultáneamente para proporcionar una respuesta de control adecuada.

Adicionalmente, se establece un reparto de energía entre los SAE de manera proporcional al cociente definido por SOC/ H_L . El control de la temperatura en la caldera de gas se realiza por medio de un controlador PI.

V. RESULTADOS Y DISCUSION

Esta sección evalúa el comportamiento de la MRME y el sistema de control en una simulación en tiempo real que dura 3.600 segundos utilizando el simulador HIL OPAL-RT4512. Se consideran cambios en la irradiación, la demanda de agua caliente y las cargas eléctricas domésticas. El nivel inicial de SOC se establece en 65%, y el nivel del tanque de hidrógeno en 50%.

Debido al límite de entrada y salida analógica del simulador OPAL de +16V/-16V, es necesario escalar las señales en RTLAB para lograr una representación adecuada en el osciloscopio Yokogawa.

La Fig. 4 ilustra el control de temperatura en la MRME. La temperatura de salida de la caldera eléctrica (T_{EB}) se muestra en verde, la temperatura en el circuito de agua caliente (T_{bus}) en rosa, la temperatura de referencia para el circuito de agua caliente (T_{bus}^{ref}) en celeste, y la temperatura de la enfriadora (T_{CH}) en amarillo.

Las señales se dividen primero por cinco en RT-LAB y se representan en una escala de 2V/div en el eje vertical y de

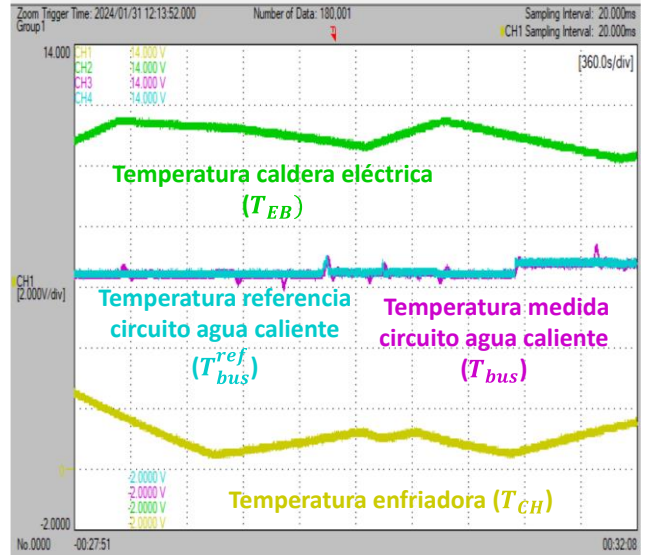


Fig. 4. Resultados experimentales del control de temperatura.

360s/div en el eje horizontal. Por ejemplo, en los momentos iniciales para T_{bus}^{ref} , el punto de consigna enviado por el SGE-LD es de 32°C (6.4V), el cual se controla eficazmente.

Para la caldera eléctrica, la señal T_{EB}^{max} es de 58°C (11.6V). Cuando la señal alcanza este valor, la caldera eléctrica se apaga y la temperatura descende hasta alcanzar la temperatura de apagado, (T_{EB}^{min}), que se asigna como cuatro grados menos que T_{EB}^{max} , esto es, 54°C (10.8V). La enfriadora de absorción funciona hasta alcanzar su temperatura de apagado (T_{CH}^{min}), que es tres grados inferior a T_{CH}^{max} , 2.5°C (0.5V), y vuelve a encenderse al alcanzar 5.5°C (1.5V). Como se observa, se logra un control eficaz mediante ciclos de histéresis tanto para la enfriadora como para el calentador eléctrico.

La Fig. 5 representa el control del balance térmico en el circuito de agua caliente de la MRME. El balance térmico es responsable de mantener la temperatura en el circuito de agua caliente ante cambios en la demanda de agua y del sistema de suelo radiante.

El calor generado (Q_{GEN}) comprende la suma del calor inyectado por la caldera de gas (Q_{GB}) así como el calor recuperado durante la electrólisis para la pila de combustible

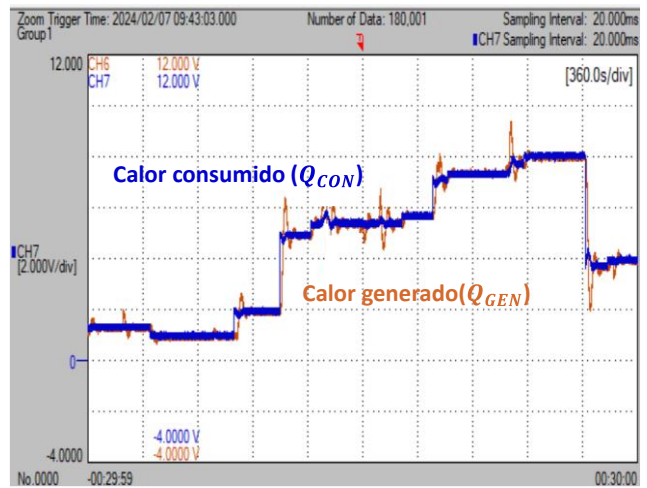


Fig. 5. Resultados experimentales del control del balance térmico.

(Q_{FC}) y el electrolizador (Q_{EZ}). Este diseño permite ahorrar combustible en la caldera de gas. Las señales para Q_{GEN} (marrón) y el calor consumido (Q_{CON}) (azul) se dividen por 1000 y se representan en una escala de 2V/div y 360s/div.

Se consigue un control eficaz del balance térmico, como se muestra en la Fig. 5, y es consistente con el control de la temperatura demostrada en la Fig. 4.

Dado que la pila de combustible y el electrolizador están conectados al mismo tanque, su funcionamiento es alterno. La Fig. 6 ilustra Q_{FC} (verde) y Q_{EZ} (naranja). Las señales se dividen por 1000 y se representan en la misma escala que la Fig. 5. Se aprecia que hasta 1.25 kW (1.25V) pueden recuperarse del electrolizador e inyectarse en el circuito de agua caliente.

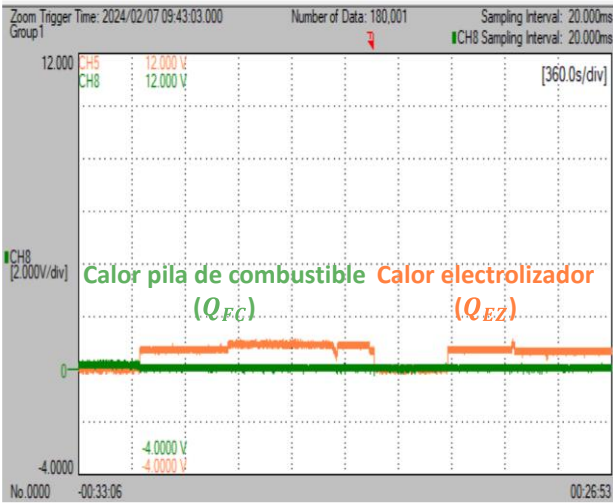


Fig. 6. Resultados experimentales del calor generado en la pila de combustible y el electrolizador.

El balance de energía eléctrica de la MRME se representa en la Fig. 7. Como se mencionó en la Sección IV, el objetivo principal del SGE-LD es establecer coordinación entre los vectores de electricidad, calor, frío e hidrógeno sin necesitar la red eléctrica local.

Las señales de RTLAB se dividen por 2000 y se muestran en una escala de 5V/div y 360 s/div. En la Fig. 7, se

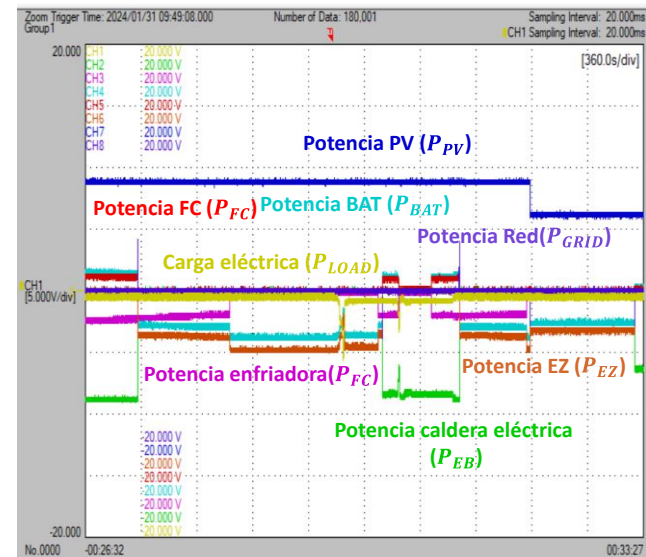


Fig. 7. Resultados experimentales del balance eléctrico.

representan P_{LOAD} (amarillo), P_{EB} (verde), P_{CH} (rosa), P_{BESS} (celeste), P_{FC} (rojo), P_{EZ} (marrón), P_{GRID} (morado) y P_{PV} (azul).

Al inicio de la simulación, P_{PV} es de 18 kW (9V), P_{EB} consume -17.5 kW (-8.75V), P_{CH} es -4 kW (-2V), y P_{LOAD} es -1 kW (-0.5V). Por lo tanto, los SAE deben descargarse para cumplir con el balance eléctrico y evitar el consumo de la red eléctrica. La BAT contribuye con 3.4 kW (1.7V), y la pila de combustible contribuye con 2.6 kW (1.3V).

Cuando la caldera eléctrica alcanza T_{EB}^{max} , se apaga, y es en este punto cuando los SAE cambian su modo de funcionamiento de descarga a carga. Este modo persiste hasta que la caldera eléctrica alcanza T_{EB}^{min} , momento en el cual la caldera eléctrica se enciende nuevamente, y los SAE vuelven a descargarse. Este funcionamiento de la enfriadora es inverso al descrito.

La Fig. 7 también demuestra cómo los SAE se adaptan eficazmente en tiempo real a los cambios en las cargas eléctricas y la producción de la planta fotovoltaica.

Finalmente, la Fig. 8 representa la evolución del SOC (amarillo), SOE (verde) y L_H (morado). Dado que la proporción SOC/ L_H es mayor que uno, la BAT proporciona más energía cuando se produce un déficit en la MRME. Por el contrario, cuando hay un excedente, el electrolizador recibe más energía que la batería. La evolución del SOE permanece proporcional a las variaciones en SOC y SOE. En la Fig. 8, las señales se han dividido por 10 en RT-LAB y se representan en una escala de 2V/div en el eje vertical y 360s/div en el eje horizontal.

Los resultados obtenidos demuestran la validez en tiempo real del sistema de control propuesto para la MRME diseñada en este artículo, evidenciando la aplicabilidad real de la solución propuesta para el control dinámico de MRME y la coordinación de vectores energéticos a través de SGE-LD.

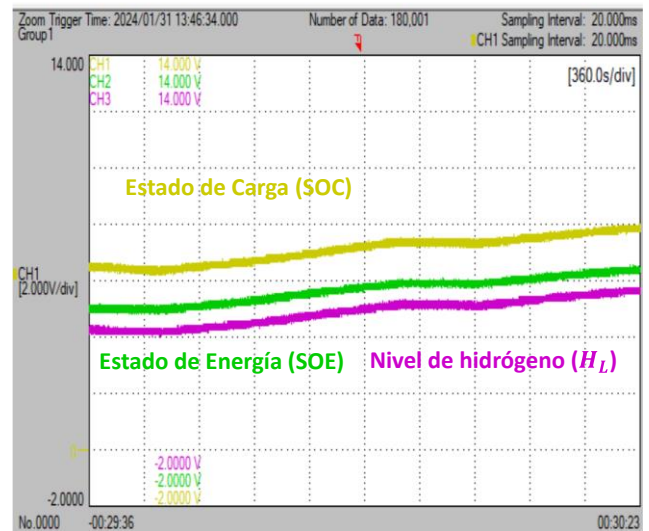


Fig. 8. Resultados experimentales del estado de carga (SOC), del estado de energía (SOE) y del nivel de hidrógeno (H_L).

VI. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado la validación en tiempo real mediante simulaciones HIL en una unidad OPAL-RT4512 de una MRME con vectores de electricidad, calor, frío e hidrógeno.

Un sistema de control inteligente basado en lógica difusa (SGE-LD) es capaz de establecer una coordinación adecuada entre los vectores energéticos a través de la energía renovable disponible y del estado de energía de los sistemas de almacenamiento.

El calor generado en el proceso de electrólisis puede ser recuperado en el circuito de agua caliente para reducir el consumo de la caldera de gas.

Los resultados demuestran que el sistema de control diseñado es capaz de reproducirse con equipos reales, y controlar la MRME ante cambios en las condiciones climáticas, flujos máxicos de agua y calor.

REFERENCIAS

- [1] C. Zhang, Y. Xu, Z. Li, and Z. Y. Dong, "Robustly Coordinated Operation of a Multi-Energy Microgrid with Flexible Electric and Thermal Loads," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2765–2775, May 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2810247.
- [2] Q. Y. Wang, X. L. Lv, and A. Zeman, "Optimization of a multi-energy microgrid in the presence of energy storage and conversion devices by using an improved gray wolf algorithm," *Appl Therm Eng*, vol. 234, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121141.
- [3] Y. Wang, W. Dong, and Q. Yang, "Multi-stage optimal energy management of multi-energy microgrid in deregulated electricity markets," *Appl Energy*, vol. 310, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118528.
- [4] M. Shi, H. Wang, C. Lyu, P. Xie, Z. Xu, and Y. Jia, "A hybrid model of energy scheduling for integrated multi-energy microgrid with hydrogen and heat storage system," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 357–368, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.08.037.
- [5] X. Wu, B. Zhang, M. P. Nielsen, and Z. Chen, "Multi-stage planning of integrated electricity-gas-heating system in the context of carbon emission reduction," *Appl Energy*, vol. 358, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122584.
- [6] T. Nasiri, M. Moeini-Aghtaie, M. Foroughi, and M. Azimi, "Energy optimization of multi-carrier energy systems to achieve a low carbon community," *J Clean Prod*, vol. 390, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136154.
- [7] Y. P. Xu, R. H. Liu, L. Y. Tang, H. Wu, and C. She, "Risk-averse multi-objective optimization of multi-energy microgrids integrated with power-to-hydrogen technology, electric vehicles and data center under a hybrid robust-stochastic technique," *Sustain Cities Soc*, vol. 79, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.scs.2022.103699.
- [8] S. Chen, Z. Wei, G. Sun, K. W. Cheung, and D. Wang, "Identifying Optimal Energy Flow Solvability in Electricity-Gas Integrated Energy Systems," *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 846–854, Apr. 2017, doi: 10.1109/TSTE.2016.2623631.
- [9] S. Lohmann, "Einführung in die Software MATLAB® - Simulink® und die Toolboxen CARNOT und Stateflow® zur Simulation von Gebäude- und Heizungstechnik,"
- [10] G. Salvadori, L. Ferrari, L. Romano and F. Fantozzi, "Use of CARNOT Toolbox to Evaluate the Impact of Building Automation and Control Systems on Energy and CO2 Emission Savings," 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Madrid, Spain, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160742.
- [11] P. Heizen and K. mit Dimplex Wärmepumpen, "PHB_WP_Heizen_Kuehlen_ES." [Online]. Available: www.dimplex.de
- [12] W. De Soto, S. A. Klein, and W. A. Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance," *Sol Energy* 2006;80(1):78–88.
- [13] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Trans Power Electron* 2009;24(5): 1198–208.
- [14] SimPowerSystems TM. Reference. Natick, MA: Hydro-Quebec and the MathWorks. Inc; 2015.
- [15] The MathWorks, Inc. "PEM Electrolysis System" mathworks.com. Accessed: January 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/stats/index.html>.
- [16] The MathWorks, Inc. "PEM Fuel System" mathworks.com. Accessed: January 03, 2024. [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/help/simscape/ug/pem-fuel-cell-system.html?lang=en>.
- [17] P. Garcia-Trivino, L. De Oliveira-Assis, E. P. P. Soares-Ramos, R. Sarrias-Mena, C. A. Garcia-Vazquez, and L. M. Fernandez-Ramirez, "Supervisory Control System for a Grid-Connected MVDC Microgrid Based on Z-Source Converters With PV, Battery Storage, Green Hydrogen System and Charging Station of Electric Vehicles," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 59, no. 2, pp. 2650–2660, Mar. 2023