



**Universidad de Cádiz**

## **Optimización Económica de la Gestión de Energía de Sistemas de Almacenamiento para Microrredes Multi-energía**

Ehsan Hosseini · Pablo Horrillo-Quintero · Pablo García-Triviño 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:

Hosseini, E. Horrillo-Quintero, P. García-Triviño, P. García-Vázquez, C.A. Sánchez-Sainz, H. Fernández-Ramírez, L.M. "Optimización Económica de la Gestión de Energía de Sistemas de Almacenamiento para Microrredes Multi-energía" Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI), Granada, España, 2024.

# Optimización Económica de la Gestión de Energía de Sistemas de Almacenamiento para Microrredes Multi-energía

Ehsan Hosseini<sup>1</sup>, Pablo García-Triviño<sup>1</sup>, Pablo Horrillo-Quintero<sup>1</sup>, Carlos Andrés García-Vázquez<sup>1</sup>, Higinio Sánchez-Sainz<sup>2</sup>,  
y Luis M. Fernández-Ramírez<sup>1</sup>

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

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

**Resumen**—Este artículo describe el diseño y la evaluación del sistema de control de una microrred multi-energía (MRME), la cual incorpora fuentes de energía renovables (FER), almacenamiento en baterías (BAT), pila de combustible (PC), electrolizador (EZ) y diversos elementos de calefacción y refrigeración para satisfacer una demanda energética residencial. Se desarrolla un sistema óptimo de gestión de la energía (SGE), utilizando el algoritmo de optimización *fmincon*, para distribuir económicamente la energía entre la BAT y el hidrógeno, manteniendo el equilibrio entre la energía térmica y eléctrica en todos los componentes de la MRME. El SGE se implementa y prueba en Simulink ante distintos escenarios meteorológicos y con distintas demandas térmicas y eléctricas. Los resultados indican que el SGE propuesto controla eficazmente el flujo de energía de la BAT, la PC y el EZ, asegurando una operación de la MRME con costes mínimos, mientras se satisfacen las demandas en todas las condiciones. Además, la eficacia en el reparto de energía entre los sistemas de almacenamiento de energía (SAE) evidencian una intervención mínima de la red para cubrir la demanda térmica y eléctrica.

**Palabras clave**—Microrredes multi-energía, balances térmicos y eléctricos, optimización, sistema de gestión de energía.

## I. INTRODUCCIÓN

La adopción de microrredes (MR) con fuentes de energías renovables (FER), en particular la incorporación de energía solar a través de fuentes de plantas fotovoltaicas, junto con la integración de sistemas de almacenamiento de energía (SAE), representa un enfoque sostenible y de interés para satisfacer las necesidades energéticas [1,2]. Esta combinación no sólo reduce la dependencia de recursos tradicionales y finitos, sino que también contribuye a la transición hacia una infraestructura energética más respetuosa con el medio ambiente y fiable [3].

Las MR muestran versatilidad en sus modos de funcionamiento, y a menudo se identifican dos estados distintos: funcionamiento aislado y funcionamiento conectado a la red [4]. En funcionamiento aislado, las MR funcionan de forma independiente, generando y utilizando energía dentro de un sistema cerrado. La energía generada puede consumirse localmente o almacenarse para su uso futuro en la MR. Por otro lado, en las MR conectadas a la red, la MR está interconectada con una red principal mayor. Esta conectividad permite el intercambio de energía entre la MR y la red

principal a través de un punto de conexión común, permitiendo un sistema de gestión de la energía (SGE) más dinámico y flexible.

La introducción de microrredes multi-energía (MRME) a pequeña escala se ha dirigido especialmente a industrias locales y zonas residenciales, atendiendo a las diversas necesidades energéticas derivadas del uso común tanto de electricidad como de gas.

En las aplicaciones actuales, las FER desempeñan un papel importante en el suministro de energía térmica y eléctrica a los MRME, con el apoyo de una combinación de SAE y gas. Las MRME mejoran aún más esta flexibilidad integrando varios tipos de producción y consumo de energía, como el gas, la electricidad y el hidrógeno [5]. Esta composición permite a las MRME incorporar diversas unidades, proporcionando adaptabilidad a diferentes fuentes y demandas de energía. La configuración de una MRME es muy adaptable y varía en función de la aplicación específica para la que esté diseñado. Normalmente, una MRME se compone de varias unidades interconectadas, cada una de las cuales cumple una función específica. Estas unidades pueden clasificarse en FER, SAE, sistemas de conversión, de transmisión y unidades de demanda [6]. La interconexión de estas unidades dentro de la MRME permite crear un sistema energético dinámico y con capacidad de respuesta, que puede equilibrar de forma eficiente las fluctuaciones de la oferta y la demanda de energía. Esta adaptabilidad es especialmente valiosa para acomodar la intermitencia de las FER y garantizar un suministro energético fiable y sostenible para las industrias locales y las aplicaciones residenciales.

Una aplicación novedosa de la MRME es en el sector residencial, donde pueden incluir tanto componentes térmicos como eléctricos. En la parte térmica, diversos elementos como las calderas de gas (CG), las calderas eléctricas (CE), la calefacción por suelo radiante (SR), los sistemas de refrigeración y otros equipos térmicos contribuyen a un sistema energético global [7]. La parte eléctrica engloba generación renovable (generalmente paneles solares fotovoltaicos (FV)) y cargas residenciales, pudiendo integrarse los vehículos eléctricos (VE) como cargas eléctricas.

El éxito de la operación coordinada, el control y la evaluación de la estabilidad de las MRME depende en gran medida de una modelización precisa y exhaustiva de los componentes de la MR. Para facilitar esta tarea, se han desarrollado varios entornos, herramientas de modelización de código abierto y aplicaciones. Dos ejemplos notables son

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).

MESMO [8] y FLEDGE [9], y CARNOT [10], diseñada esta última específicamente para Simulink, incluyendo modelos termodinámicos y de ingeniería energética.

Lograr la eficiencia en una MRME requiere una colaboración bidireccional sin fisuras entre los componentes térmicos y eléctricos. Muchos estudios destacan la importancia de utilizar las FER para generar energía térmica. Este enfoque pretende reducir la dependencia de los sistemas térmicos tradicionales basados en gas, alineándose con los objetivos de sistemas energéticos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente [11].

Las referencias [12, 13], en conjunto, destacan la necesidad de métodos avanzados de optimización y técnicas de modelado dinámico para mejorar el rendimiento de las MRME. Pocos estudios [14,15,16] profundizan en el modelado dinámico y el control de las MRME en sistemas basados en FER. Al adaptarse dinámicamente a las fluctuaciones de las FER e integrar la energía sobrante para las demandas de calefacción, estos enfoques contribuyen a mejorar la fiabilidad, la eficiencia y el rendimiento general de los sistemas de FER. Los métodos de control coordinado mejoran aún más la adaptabilidad del sistema, permitiéndole responder eficazmente a condiciones y demandas cambiantes.

Los estudios anteriores se han centrado predominantemente en modelos estáticos con horizontes de evaluación diarios, o en modelos dinámicos que abordan principalmente el equilibrio de energía sin tener en cuenta el coste de utilización de los equipos. Este artículo sugiere una oportunidad para que futuras investigaciones cubran este vacío mediante el desarrollo de modelos integrales que no sólo aborden el comportamiento dinámico y las evaluaciones prácticas, sino que también proporcionen estrategias de control económico de los SAE dentro de las MRME.

En este trabajo se ha realizado una evaluación económica de los SAE en una MEMG mediante una simulación superior a cuatro horas con producción y consumo variables de energía. En este sentido, se diseña un SGE basado en costes a través del optimizador *fmincon* de MATLAB para la MRME propuesta que contiene componentes eléctricos y térmicos. Gracias al EZ y pila de combustible (PC), la energía eléctrica se transforma en hidrógeno y se almacena en un depósito de hidrógeno para devolver la energía eléctrica al sistema cuando se necesite. Por lo tanto, la producción de energía fotovoltaica se apoya en baterías (BAT) e hidrógeno para alimentar las cargas domésticas. Para diseñar las partes térmicas, los equipos y los buses térmicos, se utiliza CARNOT Toolbox.

El resto de este documento se organiza como sigue. La sección II detalla la MRME bajo estudio con la coordinación entre los vectores térmicos y eléctricos. La Sección III presenta el SGE basado en *fmincon* para la MRME propuesta. La Sección IV evalúa el SGE mediante resultados de simulación. Por último, la Sección V concluye el artículo resaltando las conclusiones principales obtenidas del estudio.

## II. CONFIGURACION DE LA MICRORRED MULTI-ENERGIA

La MRME está diseñada para conectarse a una red trifásica de 400 V e incluye componentes eléctricos, térmicos e hidrógeno, como se muestra en la Fig. 1. El vector de energía eléctrica incluye una planta solar FV de 18 kW para generar electricidad, una BAT de 26,6 kWh con una tensión nominal de 345 V para almacenar el exceso de energía, y una carga

eléctrica doméstica. En cuanto al sistema de hidrógeno, se utiliza un EZ de 20 kW para convertir el exceso de energía eléctrica en hidrógeno. Un depósito de 1.000 g está diseñado específicamente para almacenar el hidrógeno generado, mientras que se usa una PC de 10 kW cuando la MRME necesita energía adicional, convirtiendo el hidrógeno almacenado de nuevo en energía eléctrica. Los elementos térmicos incluyen: una CG utilizada para calentar agua, una CE con una potencia de 23 kW y una capacidad de almacenamiento de agua de 300 litros, junto con un sistema de calefacción por medio de SR.

Dada la naturaleza intermitente de las FER, la utilización continua de la energía durante un periodo de 24 horas se convierte en un reto. Para resolver este problema, los SAE son esenciales. Además, teniendo en cuenta la importante demanda de energía de las cargas eléctricas y térmicas en este escenario, se integran en la MRME propuesta un sistema de BAT y un depósito de hidrógeno con capacidades suficientes. Durante los periodos en los que la MRME no recibe suficiente energía de la planta FV, la BAT y la PC se activan para complementar la producción de energía y satisfacer las demandas de carga. Por el contrario, cuando la energía generada supera las necesidades de carga, la energía sobrante puede almacenarse en la BAT o convertirse en hidrógeno y almacenarse en el depósito. Esta energía almacenada puede utilizarse durante los periodos de baja producción FV para garantizar un suministro eléctrico continuo.

Para modelar el vector térmico, se emplea la aplicación CARNOT dentro del entorno de Simulink [10], la cual permite realizar un modelado dinámico de los componentes térmico. El sistema trata el agua como un portador de calor que circula a través de varios elementos térmicos. Se utilizó un modelo multinodo dentro de la cámara de combustión de la caldera. Este enfoque permite generar agua caliente haciendo circular agua fría a través de un intercambiador de calor. El modelo incorpora una caldera de condensación equipada con dos intercambiadores de calor que facilitan la transferencia de calor entre el agua y el combustible quemado. El desarrollo de modelos dinámicos para las temperaturas de salida de CG y CE requiere considerar varios factores basados en el equilibrio energético y la primera ley de la termodinámica. Estos incluyen el aporte de calor, las pérdidas de calor, la eficiencia de la caldera y las propiedades térmicas del sistema. En este artículo estos componentes se modelan basándose en [17,18].

Además de la CG, otro componente utilizado para calentar el agua es la CE, que consume energía eléctrica. El flujo másico de agua introducido en la CE se calienta mediante la energía eléctrica suministrada desde el lado eléctrico de la

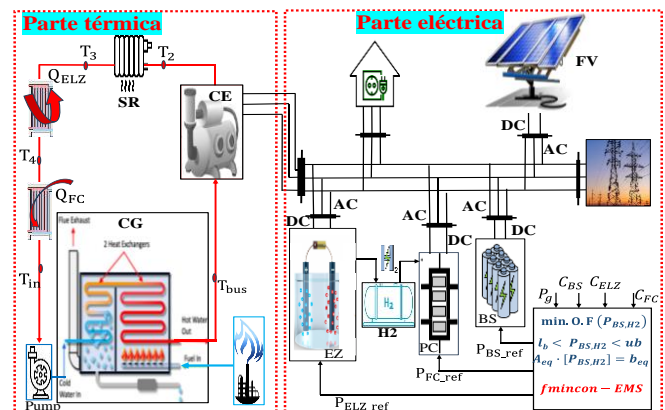


Fig. 1. MEMG en estudio.

MRME. En el diseño de la CE se han incorporado capas aislantes para reducir el consumo de energía y minimizar la disipación de calor.

Se definió un nodo térmico en el modelo para tener en cuenta las pérdidas térmicas ambientales. Este enfoque integral garantiza un calentamiento eficiente al mismo tiempo que tiene en cuenta el aislamiento y las condiciones ambientales para optimizar el uso de la energía dentro del sistema.

En el sistema térmico propuesto, la circulación del agua entre los componentes se esquematiza del siguiente modo: Inicialmente, se emplea una bomba para presurizar el agua dentro de las tuberías de suministro. En la CG, el agua se calienta utilizando intercambiadores de calor. Para elevar aún más la temperatura del agua, se incorpora una CE conectada a la CG a través de un bus térmico. La CE se alimenta a través de la energía eléctrica generada en la MRME. La temperatura del bus térmico ( $T_{bus}$ ) debe ajustarse a los requisitos específicos de la carga térmica, es decir, la demanda de agua caliente y la calefacción por SR. Para lograrlo, se utiliza un controlador proporcional-integral (PI) para ajustar la temperatura del bus térmico. Este enfoque garantiza un control eficaz de la temperatura dentro del sistema térmico para satisfacer eficientemente las diversas demandas de calefacción.

### III. SISTEMA DE GESTION DE LA ENERGIA

En este artículo se implementa un SGE para la MRME propuesta, centrándose en optimizar el coste de operación de los SAE. El SGE establece potencias y temperaturas específicas basadas en el funcionamiento del sistema. En función de la diferencia entre la producción, el consumo y el nivel de almacenamiento, se determinan la potencia de la CE, la temperatura del bus térmico y la temperatura de desconexión de la CE ( $T_{EB}^{max}$ ).

El objetivo de control se centra en reducir los costes de utilización del SAE optimizando la utilización de estos componentes y considerando también factores como la vida útil de la BAT, EZ y PC.

Se formula una función objetivo basada en la reducción de los costes de utilización, considerando factores como los precios de la electricidad y los costes de degradación de los componentes. El problema de optimización se resuelve utilizando un 'solver' de funciones multivariantes no lineales con restricciones, denominado "fmincon". Este 'solver' se utiliza para encontrar la asignación óptima de potencia entre la BAT y el sistema de hidrógeno, satisfaciendo al mismo tiempo las restricciones impuestas. La función objetivo propuesta se basa en la siguiente minimización de costes:

$$O.F. = C_{BAT} \cdot P_{BAT} + C_{EZ} \cdot P_{EZ} + C_{PC} \cdot P_{PC} \quad (1)$$

donde  $C_{BAT}$ ,  $C_{EZ}$ ,  $C_{PC}$  representa costos de utilización de la BAT, EZ y PC. Se imponen restricciones al problema de optimización para garantizar la viabilidad y la seguridad. Estas restricciones incluyen el límite del estado de carga (SOC) de la BAT, el nivel del depósito de hidrógeno, las capacidades máximas de potencia de los componentes (BAT, EZ, PC) y la potencia disponible, la diferencia entre la potencia generada y la demandada, que debe distribuirse entre la BAT y el hidrógeno. Estas restricciones se analizan a continuación. La

optimización se realiza en línea en cada paso del tiempo de simulación.

#### A. Balance Energético

El objetivo prioritario del algoritmo optimizador es satisfacer la demanda cuando faltan FER mediante la intervención de los SAE en el momento adecuado, o ahorrar energía cuando la producción de FER es superior a la demanda. Para incluir estas condiciones en el proceso de optimización, se define la restricción de igualdad lineal (restricción de igualdad de potencia) para repartir la potencia entre los SAE.

Esta restricción de igualdad se aplica en el algoritmo *fmincon* considerando dos factores de igualdad conocidos, la diferencia entre la potencia de las fuentes renovables ( $P_{FER}$ ) y la suma de la demanda eléctrica ( $P_d$ ), que es  $P_{dif}$ , y la potencia solicitada por la CE ( $P_{CE}$ ), que es  $P_s$ , siendo  $b_{eq}$  un término en el algoritmo *fmincon* que sirve como restricción de igualdad. Se ha usado al algoritmo "interior-point" como algoritmo de optimización ejecutado sobre CPU de máquina.

$$P_{dif} = P_{FER} - P_d \quad (2)$$

$$P_s = P_{dif} - P_{CE} \quad (3)$$

$$b_{eq} = P_s \quad (4)$$

#### B. Restricciones de Potencia

Para las restricciones de optimización se consideran limitaciones de potencia de BAT e hidrógeno. Las potencias máximas que cada uno de ellos puede producir o recibir se calculan mediante las siguientes expresiones [9]

$$P_{EZ}^{max} = \min(P_{EZ}^{nom}, B \cdot Q_{H2}^{nom} + A \cdot \frac{M_{H2}^{nom}}{\Delta t} \cdot \frac{100 - L_{H2}}{100}) \quad (5)$$

$$P_{PC}^{max} = \min(P_{PC}^{nom}, \eta_{therm} \cdot U_f \cdot \eta_{stack} \cdot \frac{E_{H2}^{nom}}{\Delta t} \cdot \frac{L_{H2}}{100}) \quad (6)$$

$$P_{BAT,ch}^{max} = \min\left(P_{BAT}^{nom}, \frac{E_{BAT}^{nom}}{\Delta t} \cdot \left(\frac{100 - SOC_{BAT}}{100}\right)\right) \quad (7)$$

$$P_{BAT,dis}^{max} = \min\left(P_{BAT}^{nom}, \frac{E_{BAT}^{nom}}{\Delta t} \cdot \left(\frac{EdC_{BAT}^{min} - SOC_{BAT}}{100}\right)\right) \quad (8)$$

donde  $A$  y  $B$  son las constantes del EZ,  $Q_{H2}^{nom}$  es el caudal nominal de hidrógeno del EZ,  $M_{H2}^{nom}$  denota la capacidad del depósito de hidrógeno,  $SOC_{BAT}$  es el estado de carga (SOC) de BAT, el cual se calcula a partir de su corriente,  $L_{H2}$  es el nivel del depósito de hidrógeno,  $\eta_{therm}$  es la eficiencia termodinámica de la PC,  $U_f$  es el factor de utilización de la PC,  $\eta_{stack}$  es la eficiencia de la PC,  $E_{BAT}^{nom}$  es la energía nominal de la BAT y  $SOC_{BAT}^{min}$  es el valor mínimo del SOC que podría tener la BAT.

Los términos de limitación de potencia de la CE en las ecuaciones (7) y (8) [1] introducen una seguridad para el valor del SOC y el mantenimiento de la potencia de carga/descarga en un rango que tiene en cuenta la vida útil de la CE. Durante el modo de carga, la potencia de salida de la CE debe establecerse en el intervalo  $[-P_{BAT,ch}^{max}, 0]$ , mientras que, durante el modo de descarga, estos límites deben estar en el intervalo de  $[0, P_{BAT,dis}^{max}]$ . El mismo escenario se considera para el EZ como  $[-P_{EZ}^{max}, 0]$ , y para la PC como  $[0, P_{PC}^{max}]$ . El SGE envía la referencia de potencia que deben gestionar la BAT y el

sistema de hidrógeno de acuerdo con las restricciones máximas anteriores.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado, el SGE propuesto para la MRME se evalúa mediante simulaciones en MATLAB/Simulink. Se lleva a cabo una simulación de 16000 segundos con un tiempo de paso discreto de 0.02 segundos, que abarca variaciones en el perfil de demanda térmica y eléctrica. Se ha usado una simulación de casi 4 horas para verificar la efectividad del método. La simulación tiene en cuenta la fluctuación de la radiación solar, mientras que en las carga se varían el caudal másico de agua caliente, la demanda de calefacción por SR y la demanda eléctrica doméstica. El objetivo de estas pruebas es evaluar la eficacia y robustez del SGE para gestionar la MRME en diversas condiciones de funcionamiento. Los porcentajes iniciales de los valores del nivel del depósito de hidrógeno y del SOC de la BAT se fijaron en el 50 % y el 80 %, respectivamente. La planta FV comienza con una generación de energía de 17,95 kW, y su producción se reduce a lo largo de la simulación. La carga eléctrica doméstica solicita energía suavemente hasta 9000s y después solicita entre 5 kW y 20 kW de potencia. La Fig. 2 muestra el equilibrio eléctrico entre la energía eléctrica generada y consumida. El sistema de gestión se valida para distintos niveles de generación de la planta FV. Destaca los casos en los que se mantiene el equilibrio eléctrico, así como los escenarios en los que se realizan ajustes para satisfacer las demandas. En concreto, el gráfico ilustra que cuando la CE se activa y la FER no puede satisfacer plenamente la demanda eléctrica, el sistema de reserva, la BAT y la PC entran en acción para complementar el suministro eléctrico, como se muestra en la Fig. 3. Antes de 9000s, durante los periodos de alta producción de energía y demanda doméstica relativamente baja, cualquier excedente de energía generado se utiliza para cargar la BAT de energía y elevar el nivel de hidrógeno ( $L_{H_2}$ ) en el depósito a través del EZ. Sin embargo, después de 9000 s, cuando la BAT empieza a descargarse y la CE está en funcionamiento, el sistema de hidrógeno empieza a descargarse también. Durante esta fase, la potencia de salida de la PC varía entre 0 y 10 kW, en función de las decisiones tomadas por el SGE. Estas variaciones en la potencia de salida de la PC responden a las demandas fluctuantes de la MRME. Se ve claramente que la potencia de la red es nula junto con la simulación.

La Fig. 4 muestra los valores del SOC de la BAT (Fig. 4(a)) de reserva y del depósito de hidrógeno (Fig. 4(b)) de la

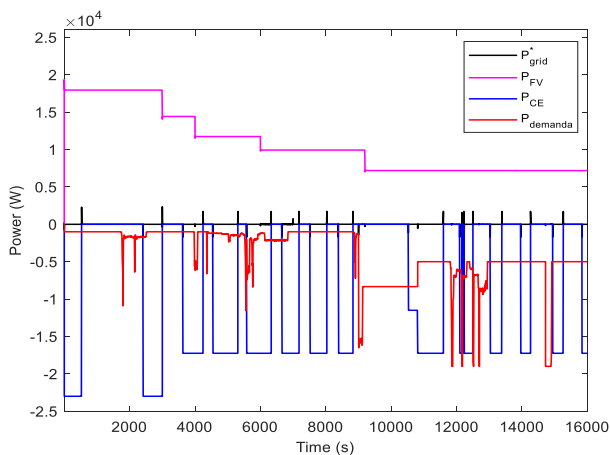


Fig. 2. Producción y consumo de energía eléctrica.

MRME. En cuanto a la BAT, su nivel de carga fluctúa a medida que se carga y descarga dinámicamente en respuesta a

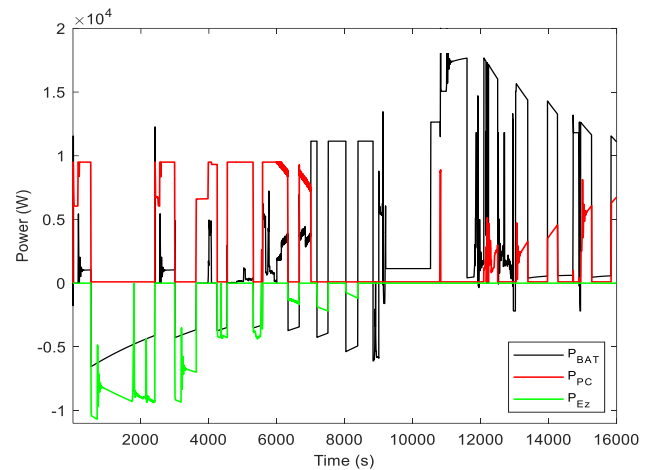


Fig. 3. Distribución de energía entre BAT y el sistema de hidrógeno.

las necesidades variables de la MRME.

Cuando hay un excedente de energía disponible o cuando el sistema demanda energía adicional, la BAT se carga en consecuencia. A la inversa, cuando el sistema requiere más energía de la que se está generando, la BAT se descarga para satisfacer la demanda y mantener la estabilidad del sistema.

En cuanto al depósito de hidrógeno,  $L_{H_2}$  depende del funcionamiento del EZ y de la PC dentro de la MRME. Cuando el EZ está activo, genera hidrógeno mediante la electrólisis del agua, lo que se traduce en un aumento del nivel de hidrógeno del depósito. A la inversa, cuando la PC está en funcionamiento, consume hidrógeno del depósito para producir electricidad, lo que provoca una disminución del nivel de hidrógeno del depósito a lo largo del tiempo. Este

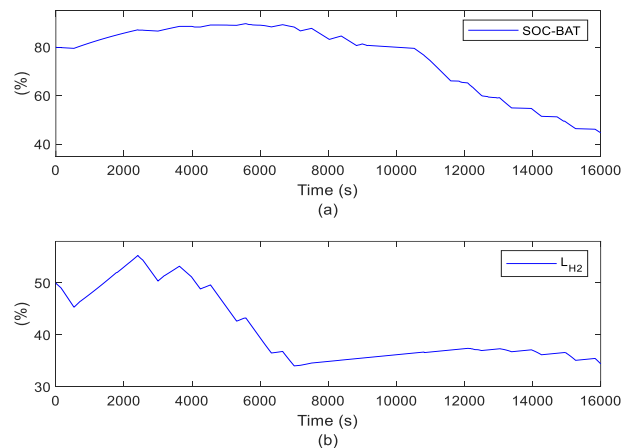


Fig. 4. a) Nivel del SOC, b) Nivel del tanque de hidrógeno  $L_{H_2}$ .

comportamiento cíclico refleja el proceso continuo de generación y consumo de hidrógeno en el sistema MEMG.

En la Fig. 5 se muestran los resultados del balance de energía térmica, que ilustran la necesidad de que la producción de calor se corresponda con el consumo de calor en la MRME.

La Fig. 5(a) sirve para justificar el equilibrio térmico dentro del sistema, en el que los componentes que generan calor ( $Q_{CG}$ ,  $Q_{PC}$  y  $Q_{EZ}$ ) son iguales a los consumidores de calor

como demanda de agua caliente en bus ( $Q_{CE}$ ) y  $Q_{SR}$ . Esta igualdad confirma que el sistema está equilibrando eficazmente la producción y el consumo de calor, garantizando una utilización eficiente de los recursos de energía térmica dentro de la MRME. La Fig. 5(b) muestra  $Q_{CE}$  que es el calor generado por la CE, y  $Q_{ce\_bus}$  que es el calor extraído del bus térmico debido al consumo de agua caliente. En función de las necesidades del consumidor, la CE funciona con un calor variable entre cero y su máximo potencial. Sin

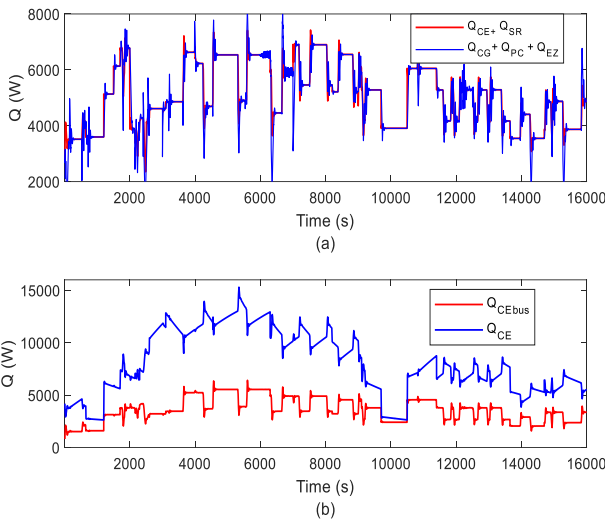


Fig. 5. Intercambios térmicos: (a) balance térmico (b) calor de la CE y calor del bus CE.

embargo, el calor del bus varía en un intervalo que depende de la circulación del calor por toda la parte térmica.

La Fig. 6 representa el calor en CG, bus y SR. El  $Q_{CG}$  supera al de los demás nodos, como era de esperar, dada su función principal de suministrar energía térmica al sistema. Por el contrario, el calor tras el nodo SR presenta los valores más bajos, lo que refleja su función de utilizar el calor para elevar la temperatura del agua dentro de las tuberías con fines de calefacción por SR.

La Fig. 7 presenta las temperaturas de varios nodos de la MRME, como  $T_{bus}$  (bus térmico),  $T_2$  (CE),  $T_3$  (sistema de calefacción por SR),  $T_4$  (EZ) y  $T_5$  (PC). Como se ha mencionado anteriormente, estas temperaturas siguen una jerarquía basada en la producción o el consumo de calor, con  $T_{bus} > T_2 > T_3$ ,  $T_{bus} > T_{in} > T_4$ . En concreto,  $T_{bus}$  representa la temperatura del bus térmico, que tiende a ser más alta que las

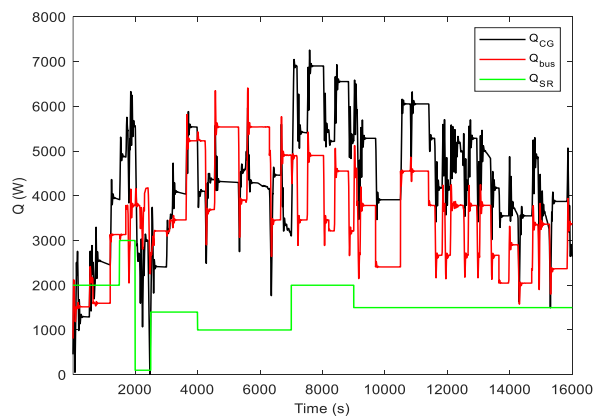


Fig. 6. Calor en CG, bus y SR.

temperaturas de otros nodos debido a su papel en la distribución de calor por todo el sistema.  $T_2$  representa la temperatura de la CE, que suele seguir a  $T_{bus}$  pero puede presentar fluctuaciones en función de las actividades y pérdidas térmicas.  $T_3$  corresponde a la temperatura del sistema SR, que suele ir por detrás de  $T_2$ , ya que consume calor para elevar la temperatura del agua en las tuberías con fines de calefacción.  $T_4$  representa la temperatura del EZ, que puede variar en función de su estado operativo y del proceso de electrólisis.  $T_5$  corresponde a la temperatura de la PC, que típicamente presenta la temperatura más baja entre los nodos debido a la generación de calor asociada a su funcionamiento. La variación de  $T_{bus}$  entre  $23^\circ$  y  $26^\circ$  indica condiciones térmicas dinámicas dentro del sistema, con fluctuaciones que se producen durante los intercambios de calor con el entorno y entre los elementos térmicos. Estas variaciones de temperatura reflejan la naturaleza dinámica de la MRME y los continuos ajustes realizados para mantener el equilibrio

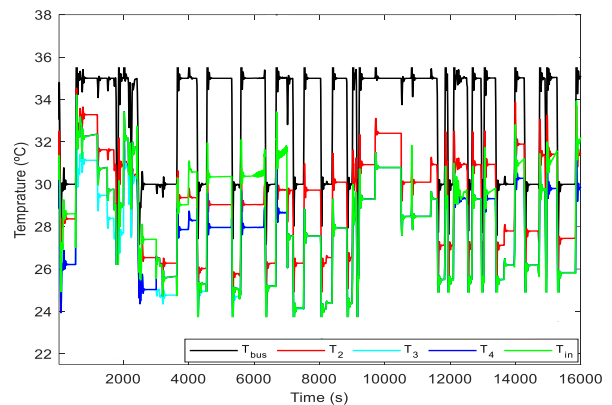


Fig. 7. Temperaturas de salida de los nodos del circuito térmico.

térmico y la estabilidad del sistema.

En la Fig. 8 se muestran las temperaturas de la CG y CE durante toda la simulación de 16.000 segundos. La temperatura de la CE es especialmente importante, ya que influye directamente en el suministro de agua caliente, que suele utilizarse para las duchas y otros usos domésticos. Por lo tanto, es esencial que la temperatura de salida de CE se mantenga dentro de un rango específico para garantizar la disponibilidad de agua caliente. En esta simulación, la temperatura de salida de la CE fluctúa entre  $50^\circ\text{C}$  y  $60^\circ\text{C}$ , lo que indica que mantiene sistemáticamente el intervalo de temperatura deseado durante todo el periodo de simulación.

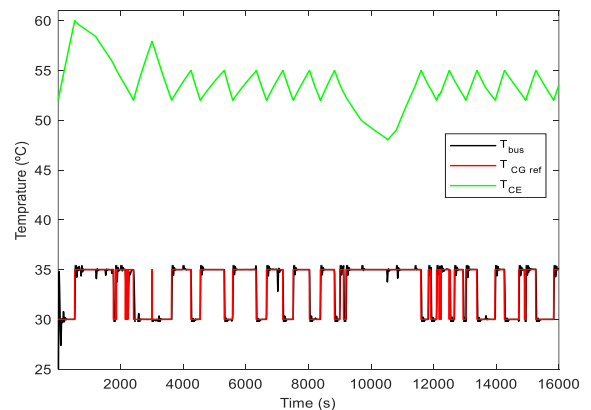


Fig. 8. Temperaturas de CG, CE y del bus.

Además, se destaca el rendimiento del controlador PI encargado de ajustar la temperatura de la CG. El controlador PI mantiene eficazmente la temperatura del bus térmico en el valor de referencia, garantizando el mantenimiento del equilibrio térmico global dentro del sistema. Esto demuestra la eficacia del mecanismo de control a la hora de regular la temperatura de la CG para satisfacer los requisitos del sistema y mantener la estabilidad operativa.

Los resultados obtenidos demuestran que el SGE distribuye la potencia entre el sistema de hidrógeno y BAT minimizando el coste de utilización de SAE, mientras que las potencias generadas se encuentran en un rango seguro respecto a la potencia nominal de los componentes y el nivel de energía almacenada. Además, los objetivos térmicos se han cumplido manteniendo la temperatura del bus, recuperando el calor residual generado durante el proceso de electrólisis para el EZ y la PC.

## V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha estudiado una MRME que incorpora una BAT y un sistema de hidrógeno (EZ y PC) para satisfacer las necesidades energéticas residenciales. El sistema térmico está compuesto de una CG, CE, sistema de calefacción por suelo radiante, y sistema de recuperación de calor de EZ y PC. Se hace especial hincapié en lograr una distribución económica de la potencia entre las distintas fuentes de energía, a saber, la BAT, el EZ y la PC. El SGE implementado en la MRME se evalúa mediante simulaciones bajo diferentes condiciones meteorológicas y demandas térmicas y eléctricas. Los resultados demuestran la eficacia del SGE propuesto para gestionar económicamente la utilización del SAE y satisfacer las demandas de energía solicitadas en diversas condiciones de funcionamiento. Es importante destacar que el SGE logra estos objetivos al tiempo que minimiza las intervenciones de la red eléctrica, lo que indica su capacidad para mantener la estabilidad de la MRME y minimizar la dependencia de fuentes de energía externas. En general, los resultados ponen de manifiesto la viabilidad y eficiencia de la MRME y del SGE propuesto para la gestión de la energía residencial.

## REFERENCIAS

- [1] E. Hosseini, et al., "A Nonlinear Programming Solver based on Battery Efficiency Maximization for Quasi-Z-source Cascaded H-bridge Multilevel Inverter with PV and Battery," 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (ONCON), India, 2022.
- [2] P. Horrillo-Quintero, et al., "Control System for Quasi-Z-source Cascaded H-bridge Multilevel Inverter with PV Power Generation and Battery Energy Storage System", Proc. of the Interdisciplinary Conference on Mechanics, Computers and Electrics (ICMECE 2022) 6-7 October 2022, Barcelona, Spain.
- [3] E. Hosseini, et al., "Reinforcement Learning based Energy Management System for Grid-Connected PV plants and Energy-Stored Quasi-Z-source Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter," (EEEIC/I&CPS Europe), Madrid, 2023.
- [4] F. Khavari, A. Badri, A. Zangeneh, "Energy management in multi-microgrids considering point of common coupling constraint," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 115, Feb. 2020.
- [5] X. Fang, W. Dong, Y. Wang, Q. Yang, "Multiple time-scale energy management strategy for a hydrogen-based multi-energy microgrid," Applied Energy, Vol. 328, Dec. 2022.
- [6] M. A. Babaei, S. Hasanzadeh, H. Karimi, "Cooperative energy scheduling of interconnected microgrid system considering renewable energy resources and electric vehicles," Electric Power Systems Research, Vol. 229, Apr. 2024.
- [7] J. Liu, K. Zeng, H. Wang, B. Lin, B. Du, C. Hu, "Coordinated Operation of An Islanded Multi-energy Microgrid with Demand Response," 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Wuhan, China, 2020, pp. 433-438.
- [8] V. Kleinschmidt, T. Hamacher, V. Perić, "Flexibility in active distribution networks - modelling a fully coupled multi-energy system in MESMO," 2022 IEEE ISGT Asia, Singapore, pp. 475-479, 2022.
- [9] V. Kleinschmidt, S. Troitzsch, T. Hamacher, V. Perić, "Flexibility in distribution systems: Modelling a thermal-electric multi-energy system in FLEDGE," 2021 IEEE ISGT Europe, Espoo, Finland, pp. 1-5, 2021.
- [10] S. Lohmann, "FH D E 2 Einführung in die Software MATLAB - Simulink und die Toolboxes CARNOT und Stateflow", 2013.
- [11] Y. Lei, X. Chen, K. Jiang, H. Li, Z. Zou, "A Novel Methodology for Electric-Thermal Mixed Power Flow Simulation and Transmission Loss Analysis in Multi-Energy Micro-Grids," Front Energy Res, vol. 8, no. February, pp. 1-13, 2021.
- [12] M. Heleno, Z. Ren, "Multi-Energy Microgrid Planning Considering Heat Flow Dynamics," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 36, no. 3, pp. 1962-1971, 2021.
- [13] T. Capuder, M. Kostelac, M. Krpan, I. Pavic, "Multi-energy microgrid ability to provide flexibility services to the system operator and security of supply to end-users," SEST 2020 - 3rd International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, 2020.
- [14] X. Lei, Y. Lin, Q. Yang, J. Zhou, X. Chen, and J. Wen, "Research on coordinated control of renewable-energy-based Heat-Power station system," Appl Energy, vol. 324, no. July, p. 119736, 2022.
- [15] Z. Li, J. Zhou, X. Chen, and J. Wen, "Modelling of Renewable-energy-base Heat and Power System and Regulation Method Study," IEEE SPEC 2020, pp. 1476-1483, 2020.
- [16] Z. Li, J. Zhou, J. Wen, and X. Chen, "Dynamic Modeling and Operations of a Heat-power Station System Based on Renewable Energy," CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 8, no. 4, pp. 1110-1121, 2022.
- [17] 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," (EEEIC / I&CPS Europe), Madrid, pp. 1-6, Spain, 2020.
- [18] P. Heizen and K. mit Dimplex Wärmepumpen, "PHB\_WP\_Heizen\_Kuehlen\_ES." [Online]. Available: [www.dimplex.de](http://www.dimplex.de).