

Jornadas de Automática

Net-Multigenera: Arquitectura y Modelado Dinámico de Sistemas Energéticos Hospitalarios

Francisco José Vivas^{a,*}, Gabriel Gómez-Ruiz^a, Francisca Segura^a, José Manuel Andújar^a, Carlos Vivas^b, Francisco Rodríguez^b

^a Centro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva, Campus de El Carmen, Avda. de las Fuerzas Armadas S/N, 21007 Huelva, España.

^b Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Camino Descubrimientos, S/N. Isla Cartuja, 41092, Sevilla, España.

To cite this article: Vivas, F.J., Gómez, G., Segura, F., Andújar, J.M., Vivas, C., Rodríguez, F. 2026. Net-Multigenera: Architecture and Dynamic Modeling of Hospital Energy Systems. Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13664>

Resumen

En esta contribución se presenta una arquitectura multienergía para aplicaciones hospitalarias, junto con su modelado dinámico y análisis. El sistema integra almacenamiento eléctrico, conversión basada en hidrógeno y recuperación térmica mediante electrolizador, pila de combustible, turbinas de gas y vapor, almacenamiento térmico y caldera auxiliar, permitiendo la interacción entre los dominios eléctrico, químico y térmico. A partir de esta configuración, se desarrolla un modelo dinámico discreto en espacio de estados, orientado a futuras estrategias de optimización y control. El modelo emplea formulaciones agregadas y simplificaciones basadas en rendimientos y linealización por tramos, manteniendo la coherencia física y la tratabilidad computacional. Finalmente, se presentan resultados de simulación que ilustran el comportamiento del sistema.

Palabras clave: microrredes, modelado dinámico, sistemas energéticos integrados, hidrógeno, cogeneración, control óptimo.

Net-Multigenera: Architecture and Dynamic Modeling of Hospital Energy Systems

Abstract

This contribution presents a multi-energy architecture for hospital applications, together with its dynamic modeling and analysis. The system integrates electrical storage, hydrogen-based conversion, and thermal recovery through an electrolyzer, fuel cell, gas and steam turbines, thermal storage, and an auxiliary boiler, enabling interaction between the electrical, chemical, and thermal domains. Based on this configuration, a discrete-time state-space dynamic model is developed, aimed at future optimization and control strategies. The model employs aggregated formulations of energy and mass flows, together with efficiency-based simplifications and piecewise linearization, while preserving physical consistency and computational tractability. Finally, simulation results illustrating the system behavior are presented.

Keywords: microgrids, dynamic modelling, integrated energy systems, hydrogen, cogeneration, optimal control

1. Introducción

Los hospitales y centros sanitarios constituyen infraestructuras críticas con elevados requerimientos energéticos debido a la necesidad de garantizar continuidad de suministro, condiciones ambientales controladas y operación ininterrumpida de equipos médicos. Como

consecuencia, el sector sanitario es responsable de aproximadamente el 4-5% de las emisiones globales de carbono (Karliner et al., 2019; Mazzeo et al., 2023). Asimismo, las instalaciones hospitalarias representan cerca del 10% del consumo energético del sector comercial y presentan una intensidad energética tres veces superior a la de los edificios comerciales (Bawaneh et al., 2019). Estos datos

ponen de manifiesto la necesidad de desarrollar soluciones energéticas más eficientes, resilientes y sostenibles adaptadas al entorno hospitalario. En respuesta a esta necesidad, la investigación sobre sistemas energéticos hospitalarios ha evolucionado significativamente durante la última década. Los primeros trabajos se centraron en la caracterización de la demanda energética y en la identificación de los sistemas de climatización como los principales responsables del consumo (Teke and Timur, 2014). Posteriormente, el interés se desplazó hacia la integración de fuentes renovables, especialmente sistemas fotovoltaicos, para reducir su impacto ambiental. Sin embargo, la elevada intermitencia de las energías renovables y los estrictos requisitos de continuidad de suministro propios de los hospitales, limitan la efectividad de soluciones basadas exclusivamente en generación renovable (Mazzeo et al., 2023). Esto pone de manifiesto la necesidad de enfoques integrados capaces de coordinar conjuntamente los dominios eléctrico, térmico y físico-químico, así como las interacciones entre los distintos vectores energéticos. En este contexto, diversos estudios han explorado arquitecturas híbridas que combinan tecnologías complementarias. Así, (Isa et al., 2016) proponen un sistema de cogeneración basado en generación fotovoltaica, pilas de combustible de hidrógeno y almacenamiento en baterías. De forma similar, (Buonomano et al., 2014) desarrollan y optimizan un sistema de trigeneración que integra producción de electricidad, calefacción y refrigeración. Paralelamente, la robustez y resiliencia del sistema energético hospitalario han adquirido un protagonismo creciente, especialmente tras la pandemia de COVID-19, que evidenció la vulnerabilidad de los sistemas energéticos centralizados frente a perturbaciones operativas y aumentos repentinos de la demanda (Hervás-Zaragoza et al., 2022). En este contexto, las microrredes y los recursos energéticos distribuidos han emergido como alternativas prometedoras para mejorar la autonomía y fiabilidad energética de las instalaciones sanitarias. No obstante, muchas de las configuraciones propuestas en la literatura se limitan a integraciones parciales y no abordan conjuntamente los distintos vectores energéticos ni sus interacciones dinámicas bajo criterios de continuidad y fiabilidad clínica (Liu et al., 2021). Por ello, existe un interés creciente en el desarrollo de arquitecturas multienergía orientadas a hospitales altamente descarbonizados e incluso 100% renovables. Aunque este concepto ha sido ampliamente estudiado en otros sectores, su aplicación al ámbito hospitalario continúa presentando importantes desafíos asociados a la operación continua, la resiliencia y la integración coordinada de múltiples tecnologías energéticas. En este sentido, resulta necesario disponer de modelos dinámicos capaces de representar el comportamiento acoplado de los distintos subsistemas energéticos y servir de base para futuros estudios de operación y gestión energética. Así, este trabajo propone una nueva arquitectura multienergía para aplicaciones hospitalarias junto con su correspondiente modelo dinámico, orientado al análisis integrado de los dominios eléctrico, térmico y físico-químico del sistema.

El resto del artículo se organiza como sigue: la Sección 2 describe la arquitectura propuesta para su aplicación en hospitales; la Sección 3 aborda el modelado matemático; la

Sección 4 presenta los resultados de simulación, discutidos en la Sección 5; y, finalmente, la Sección 6 recoge las principales conclusiones del trabajo.

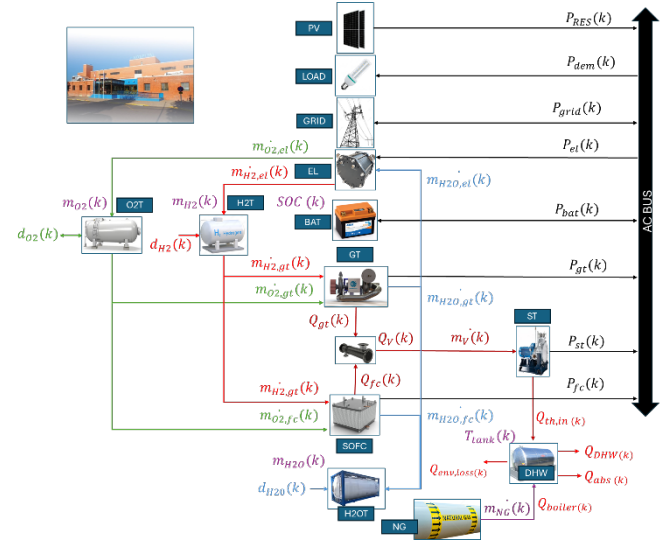


Figura 1: Esquema de la arquitectura de la Red Multigenera y flujos de energía, materia y calor (negro: potencia eléctrica; rojo: H_2 ; verde: O_2 ; azul: H_2O).

2. Arquitectura de la Red Multigenera

El sistema energético considerado presenta una arquitectura multivector que integra los dominios eléctrico, térmico y físico-químico (Figura 1), permitiendo el aprovechamiento conjunto de diferentes formas de energía para satisfacer demandas eléctricas y térmicas.

En el dominio eléctrico, el sistema está conectado a una fuente renovable no gestionable y a la red eléctrica, permitiendo intercambios de potencia, mientras que la batería actúa como elemento de almacenamiento para desacoplar generación y demanda.

El subsistema físico-químico se basa en el uso de hidrógeno como vector energético. El electrolizador produce hidrógeno a partir de energía eléctrica y agua, mientras que la pila de combustible y la turbina de gas lo utilizan para generar electricidad, dando lugar a flujos acoplados de hidrógeno, oxígeno y agua entre los depósitos. Durante estos procesos se genera calor residual, principalmente en la pila de combustible y la turbina de gas, que es parcialmente recuperado para la producción de vapor que alimenta una turbina de vapor, estableciendo un esquema de cogeneración.

El calor no convertido en energía eléctrica en la turbina de vapor, asociado a los gases de escape, se destina al subsistema térmico, compuesto por un depósito de agua caliente sanitaria que cubre la demanda térmica y alimenta una máquina de absorción, con el apoyo de una caldera auxiliar de gas natural.

Finalmente, se consideran pérdidas térmicas hacia el ambiente, que introducen un acoplamiento adicional con las condiciones externas.

3. Modelado matemático

El modelo describe, en tiempo discreto y con un nivel de agregación adecuado para optimización energética, la interacción entre los dominios eléctrico, químico y térmico.

La formulación está orientada a su uso en estrategias de control, empleando variables y parámetros accesibles a partir de especificaciones de fabricantes o ensayos experimentales sencillos. Se adopta un periodo de muestreo T y se asume que los rendimientos de los equipos son constantes en cada intervalo, pudiendo actualizarse entre periodos para reflejar su dependencia con el punto de operación.

3.1. Almacenamiento eléctrico

La batería se modela mediante un balance energético discreto sobre el estado de carga. Dado que el interés se centra en la gestión a nivel de sistema, se adopta un modelo integrador en el que la evolución del estado de carga depende de la potencia y de un rendimiento agregado. La dinámica se expresa de acuerdo con (1) (Vivas et al., 2020):

$$SOC(k+1) = SOC(k) + \frac{T}{E_{bat}(k)} \eta_{bat}(k) P_{bat}(k) \quad (1)$$

donde $SOC(k)$ es el estado de carga, $E_{bat}(k)$ es la capacidad energética, $\eta_{bat}(k)$ el rendimiento agregado de carga y descarga, y $P_{bat}(k)$ es la potencia intercambiada con el sistema.

3.2. Flujos de materia y almacenamiento químico

El subsistema físico-químico incluye las transformaciones asociadas al electrolizador, la pila de combustible y la turbina de gas, que implican producción y consumo de hidrógeno, oxígeno y agua según relaciones estequiométricas. El comportamiento de los depósitos se modela mediante balances de masa discretos para cada especie $i \in \{H_2, O_2, H_2O\}$, definida en (2) (Vivas et al., 2020):

$$m_i(k+1) = m_i(k) + T \left(\sum_j \alpha_{i,j} P_j(k) + d_i(k) \right) \quad (2)$$

donde $m_i(k)$ es la masa almacenada, $P_j(k)$ la potencia del equipo j , $\alpha_{i,j}$ el coeficiente de conversión entre potencia y flujo de masa, y $d_i(k)$ agrupa entradas o salidas externas de materia, tales como importación de hidrógeno, consumo médico de oxígeno o reposición de agua destilada.

Los coeficientes $\alpha_{i,j}$ condensan la información estequiométrica y energética del proceso y pueden escribirse en la forma (3):

$$\alpha_{i,j} = \frac{v_{i,j}}{LHV_i \eta_j(k)} \quad (3)$$

donde $v_{i,j}$ representa el coeficiente estequiométrico, LHV_i es el poder calorífico inferior de la especie y $\eta_j(k)$ es el rendimiento del equipo.

3.3. Generación de calor residual

La pila de combustible (fc) y la turbina de gas (gt) convierten solo una parte de la energía química en potencia eléctrica, generando calor residual recuperable que conecta el subsistema eléctrico con el ciclo de vapor. El flujo térmico total puede expresarse como (4):

$$Q_{gen}(k) = Q_{fc}(k) + Q_{gt}(k) \quad (4)$$

Donde el calor recuperable de cada equipo puede escribirse como (5):

$$Q_l(k) = \beta_l(k) \left(\frac{1}{\eta_l(k)} - 1 \right) P_l(k), l \in \{fc, gt\} \quad (5)$$

siendo $P_l(k)$ la potencia eléctrica generada, $\eta_l(k)$ el rendimiento eléctrico, y $\beta_l(k)$ la fracción de la energía no convertida en electricidad que resulta efectivamente recuperable. El coeficiente $\beta_l(k)$ puede relacionarse con el rendimiento térmico efectivo del calor recuperable, definido como $\eta_{th,l}^{eff}(k) = Q_l(k)/P_{chem,l}(k)$, donde $P_{chem,l}(k) = P_l(k)/\eta_l(k)$ es la potencia química de entrada. A partir de esta definición, se obtiene (6):

$$\beta_l(k) = \frac{\eta_{th,l}^{eff}(k)}{1 - \eta_l(k)} \quad (6)$$

3.4. Calor útil para la generación de vapor

No todo el calor residual generado se convierte en calor útil para la producción de vapor debido a pérdidas en los intercambiadores, el transporte térmico y la integración del sistema. El calor disponible en el generador de vapor se expresa como (7):

$$Q_v(k) = \eta_{hx}(k) (Q_{gen}(k) - Q_{loss}^v(k)) \quad (7)$$

Donde $Q_v(k)$ es el calor útil, $\eta_{hx}(k)$ la eficiencia global de intercambio y $Q_{loss}^v(k)$ las pérdidas térmicas asociadas. Para mantener la linealidad, estas pérdidas pueden suponerse proporcionales ($\lambda_v(k)$) al calor generado, de acuerdo con (8):

$$Q_{loss}^v(k) = \lambda_v(k) Q_{gen}(k), \quad (8)$$

de modo que el calor útil hacia el ciclo de vapor queda determinado por la operación de la pila de combustible y la turbina de gas.

3.5. Generación de potencia en la turbina de vapor

La potencia de la turbina de vapor resulta de la conversión del calor útil recuperado en trabajo mecánico durante la expansión del vapor. El calor disponible $Q_v(k)$ se emplea en la generación de vapor, estableciendo una relación con el caudal másico en función del incremento entálpico, de acuerdo con (9):

$$\dot{m}_v(k) = \frac{Q_v(k)}{h_{sup}(k) - h_{fw}(k)} \quad (9)$$

donde $h_{sup}(k)$ y $h_{fw}(k)$ son las entalpías específicas del vapor sobrecalentado y del agua de alimentación.

La potencia eléctrica generada puede expresarse como (10):

$$P_{st}(k) = \eta_m(k) \eta_g(k) \eta_{is}(k) \dot{m}_v(k) (h_{in}(k) - h_{out}^s(k)) \quad (10)$$

donde $h_{in}(k)$ es la entalpía de entrada, $h_{out}^s(k)$ la correspondiente a una expansión isentrópica, y $\eta_{is}(k)$, $\eta_m(k)$ y $\eta_g(k)$ los rendimientos isentrópico, mecánico y eléctrico. Sustituyendo (9) en (10), se obtiene la relación directa con el calor recuperado (11). Si el sistema opera en un rango acotado, las entalpías y rendimientos pueden considerarse

aproximadamente constantes en cada intervalo, permitiendo definir un coeficiente agregado que agrupa los efectos termodinámicos y de conversión.

$$P_{st}(k) = \eta_m(k) \eta_g(k) \eta_{is}(k) \frac{h_{in}(k) - h_{out}^s(k)}{h_{sup}(k) - h_{fw}(k)} Q_v(k) \quad (11)$$

3.6. Modelo térmico del depósito de DHW

En el subsistema térmico, la temperatura del depósito de (DHW) se modela mediante un balance energético bajo las hipótesis de mezcla perfecta y masa constante, considerando como entradas el calor recuperado y el aporte de gas natural, y como salidas la demanda térmica, el sistema de absorción y las pérdidas al ambiente.

El calor aportado por la caldera, $Q_{boiler}(k)$, se modela como (12):

$$Q_{boiler}(k) = \eta_{boiler}(k) LHV_{NG} \dot{m}_{NG}(k) \quad (12)$$

donde $\dot{m}_{NG}(k)$ es el caudal másico de gas natural consumido, LHV_{NG} su poder calorífico inferior y $\eta_{boiler}(k)$ el rendimiento de la caldera.

La demanda térmica de agua caliente sanitaria puede expresarse como (13):

$$Q_{DHW}(k) = \dot{m}_{DHW}(k) c_p [T_{tank}(k) - T_{in}(k)] \quad (13)$$

donde $\dot{m}_{DHW}(k)$ es el caudal másico demandado, c_p es el calor específico del agua, $T_{tank}(k)$ es la temperatura del depósito y $T_{in}(k)$ es la temperatura del agua de entrada.

La demanda térmica del sistema de absorción $Q_{abs}(k)$, se modela como (14):

$$Q_{abs}(k) = \frac{Q_{cool}(k)}{COP(k)} \quad (14)$$

donde $Q_{cool}(k)$ es la carga frigorífica y $COP(k)$ el coeficiente de rendimiento, considerado conocido en cada periodo.

Las pérdidas térmicas al ambiente, $Q_{loss}^{env}(k)$, se expresan como (15):

$$Q_{loss}^{env}(k) = U_{tank} [T_{tank}(k) - T_{amb}(k)] \quad (15)$$

donde U_{tank} es el coeficiente global de pérdidas y $T_{amb}(k)$ la temperatura ambiente.

El calor útil, $Q_{in}^{th}(k)$, que llega al depósito procede del calor no convertido en electricidad en la turbina de vapor, y es definido por (16):

$$Q_{in}^{th}(k) = Q_v(k) - \frac{P_{st}(k)}{\eta_m(k) \eta_g(k)} \quad (16)$$

Finalmente, la dinámica de la temperatura del depósito viene dada por (17):

$$T_{tank}(k+1) = T_{tank}(k) + \frac{T}{m_{tank} c_p} (Q_{in}^{th}(k) + Q_{boiler}(k) - Q_{DHW}(k) - Q_{abs}(k) - Q_{loss}^{env}(k)) \quad (17)$$

donde m_{tank} es la masa de agua almacenada, considerada constante.

3.7. Balance de potencia eléctrica

El equilibrio eléctrico del sistema se impone considerando las unidades generadoras, los consumos internos, la generación renovable y el intercambio con la red. En forma agregada, ver Figura 1, (18):

$$P_{fc}(k) + P_{gt}(k) + P_{st}(k) + P_{RES}(k) + P_{grid}(k) - P_{el}(k) - P_{bat}(k) = P_{dem}(k) \quad (18)$$

donde $P_{dem}(k)$ es la demanda eléctrica de las cargas del hospital.

3.8. Definición final de estados, controles y perturbaciones

Una vez establecidas las ecuaciones físicas, el sistema puede representarse como modelo en el espacio de estados. El vector de estado recoge las variables acumulativas asociadas a los balances dinámicos, de acuerdo con (19):

$$x(k) = [SOC(k), m_{H_2}(k), m_{O_2}(k), m_{H_2O}(k), \dots, T_{tank}(k)]^T \quad (19)$$

Las variables de control se asocian a la operación de los equipos gestionables, (20):

$$u(k) = [P_{bat}(k), P_{el}(k), P_{fc}(k), P_{gt}(k), \dots, P_{grid}(k), \dot{m}_{NG}(k)]^T \quad (20)$$

Las perturbaciones agrupan las variables exógenas que condicionan la operación del sistema. De forma compacta, puede escribirse como (21):

$$w(k) = [P_{RES}(k), P_{dem}(k), d_{H_2}(k), d_{O_2}(k), \dots, d_{H_2O}(k), \dot{m}_{DHW}, Q_{cool}(k), T_{in}(k), T_{amb}(k)]^T \quad (21)$$

donde d_{O_2} es la perturbación neta entre la demanda de O_2 y la entrada externa; d_{H_2} y d_{H_2O} son las perturbaciones externas (solo entradas) de H_2 y agua a los depósitos, respectivamente.

Con estas definiciones, el modelo se expresa de forma compacta como (22):

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ew(k) \quad (22)$$

donde las matrices A , B y E dependen de los parámetros energéticos, estequiométricos y térmicos, y pueden actualizarse en cada muestreo para reflejar variaciones del punto de operación, en cuyo caso se escribirán como $A(k)$, $B(k)$ y $E(k)$.

4. Simulaciones

En esta sección se presentan los resultados de simulación del modelo propuesto considerando parámetros representativos obtenidos de la literatura y de especificaciones de fabricantes, tal como se recoge en la Tabla 1. El objetivo principal en este estudio preliminar no es evaluar una estrategia óptima de operación, sino validar la coherencia física y dinámica del modelo y estudiar la interacción entre los dominios eléctrico, químico y térmico bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

Tabla 1: Parámetros energéticos y operativos del modelo (Par.: parámetro; Val.: valor).

Par.	Val.	Par.	Val.	Par.	Val.
$\overline{P}_{el}$	1500 kW	Q_{cool}	100 kW	η_{boiler}	0.88
$\overline{P}_{fc}$	250 kW	η_{bat}	0.93	η_{hx}	0.90
$\overline{P}_{gt}$	150 kW	η_{el}	0.68	η_m	0.90
d_{O_2}	25 kg/h	η_{fc}	0.50	η_g	0.95
$\dot{m}_{DHW}$	2500 kg/h	η_{gt}	0.33	η_{is}	0.75

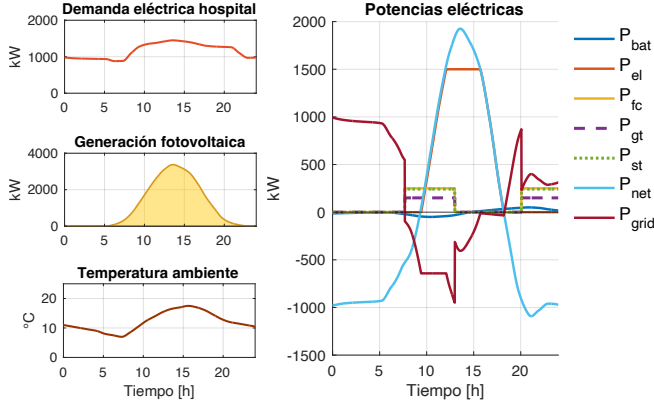


Figura 2. A la izquierda: perfiles de las variables exógenas del modelo: demanda eléctrica del hospital (arriba), generación fotovoltaica (medio) y temperatura ambiente (abajo). A la derecha: evolución temporal de las potencias eléctricas del modelo.

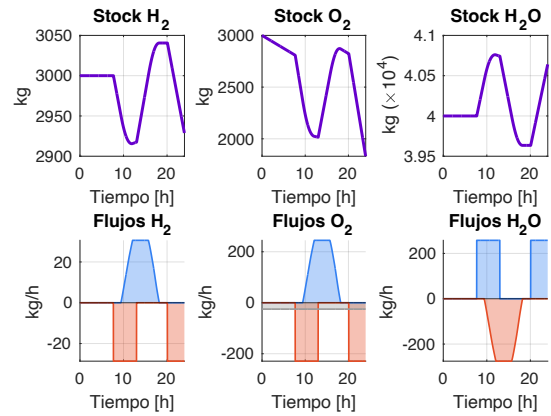
La simulación se realiza para un horizonte de 24 horas con $T = 1$ min. Las variables exógenas, Figura 2 (izq.), siguen el perfil de un día típico de invierno en Huelva. Además, para analizar la respuesta dinámica del sistema se consideran perfiles representativos de operación para los distintos equipos. La batería sigue un perfil prefijado de carga y descarga en el rango ± 50 kW, mientras que el electrolizador opera durante los periodos de excedente fotovoltaico útil. La pila de combustible y la turbina de gas se activan cuando la temperatura del depósito de ACS desciende por debajo de 60°C y se detienen cuando supera los 70°C . Esta lógica, aparentemente tan simple, se adopta únicamente para generar distintos modos de funcionamiento y analizar la coherencia de los balances energéticos y másicos del sistema. La potencia intercambiada con la red se obtiene del balance instantáneo de potencias, mientras que el caudal de gas natural permanece constante con un valor de 22 kg/h.

5. Discusión

Los resultados obtenidos permiten validar la coherencia física y dinámica del modelo, así como analizar la interacción entre los dominios eléctrico, físico-químico y térmico bajo los distintos modos de operación considerados.

En cuanto a los resultados obtenidos respecto del funcionamiento eléctrico del modelo, en la Figura 2 (dcha.) se recoge la evolución temporal de las potencias. La potencia intercambiada con la red, P_{grid} , presenta periodos de importación ($P_{grid} > 0$) y exportación ($P_{grid} < 0$), reflejando directamente el equilibrio instantáneo entre generación, almacenamiento y demanda. Durante las horas nocturnas y de baja radiación solar el sistema requiere importación de energía, mientras que en el periodo central del día aparecen excedentes asociados principalmente a la generación

fotovoltaica. Asimismo, se observa que el electrolizador opera coincidiendo con dichos excedentes hasta alcanzar su potencia nominal, comportamiento coherente con el criterio de operación impuesto. La activación de la pila de combustible y la turbina de gas implica, además, una contribución adicional de la turbina de vapor derivada del aprovechamiento térmico residual de ambos equipos. La evolución temporal de las potencias confirma así la coherencia del balance eléctrico global del sistema y la correcta interacción entre los diferentes subsistemas energéticos. Por último, el SOC de la batería alcanzó un valor final del 58.20% partiendo de un valor inicial del 60%, lo que indica un comportamiento globalmente equilibrado del almacenamiento a lo largo del horizonte temporal considerado.

Figura 3. Evolución temporal de los stocks (fila superior) y los flujos (fila inferior) de H_2 , O_2 y H_2O . En las gráficas de flujos, los valores positivos indican producción y los negativos consumo; el color azul identifica al equipo productor y el naranja al consumidor: electrolizador (productor) y pila de combustible y turbina de gas (consumidores) para H_2 y O_2 , e inversamente para H_2O . Para el O_2 se incluye en gris el aporte medicinal.

En el dominio físico-químico, la Figura 3 recoge la evolución temporal de los stocks y flujos másicos de H_2 , O_2 y H_2O . La dinámica obtenida responde a los modos de operación impuestos para el electrolizador, la pila de combustible y la turbina de gas. El H_2 actúa como vector energético intermedio entre los procesos de electrólisis y generación termoelectrónica. Con objeto de garantizar la reposición del H_2 consumido, se consideró una potencia nominal del electrolizador significativamente superior a la suma de las potencias nominales de la pila de combustible y la turbina de gas, además de un mayor tiempo de operación asociado a los periodos de excedente renovable. Como resultado, los stocks de H_2 y H_2O presentan variaciones reducidas entre el inicio y el final del día, lo que evidencia la consistencia global de los balances másicos. El stock de O_2 muestra una disminución más acusada debido a la demanda medicinal constante de 25 kg/h incorporada al modelo. Las relaciones estequiométricas definidas se verifican directamente a partir de los flujos simulados: durante la operación del electrolizador, los caudales de O_2 (~ 240 kg/h) y H_2O (~ 270 kg/h) mantienen con respecto al flujo de H_2 (~ 30 kg/h) proporciones próximas a 8 y 9, respectivamente, coherentes con las relaciones molares impuestas en el modelo. Estas proporciones se mantienen igualmente durante la operación de la pila de combustible y la turbina de gas, validando la consistencia fisicoquímica de la formulación propuesta.

En el dominio térmico, la Figura 4 (arriba) presenta el balance en el depósito de ACS. El aporte térmico procedente del gas natural permanece constante, actuando como carga base del sistema térmico. Por su parte, las contribuciones asociadas a la pila de combustible y la turbina de gas dependen de los periodos de activación definidos previamente, generando incrementos puntuales de calor recuperado. El balance térmico se completa con la demanda de ACS, la potencia asociada a los equipos de absorción y las pérdidas térmicas hacia el entorno. La influencia conjunta de todos estos términos sobre la temperatura del depósito se observa en la Figura 4 (abajo), donde los periodos de funcionamiento de la pila de combustible y la turbina de gas producen aumentos progresivos de temperatura, mientras que los intervalos sin aporte térmico adicional conducen a descensos graduales provocados por la demanda y las pérdidas. Este comportamiento pone de manifiesto la coherencia entre los balances energéticos definidos, la dinámica térmica del depósito y los modos de operación considerados, validando así la capacidad del modelo para representar de forma integrada la interacción entre los distintos dominios energéticos del sistema.

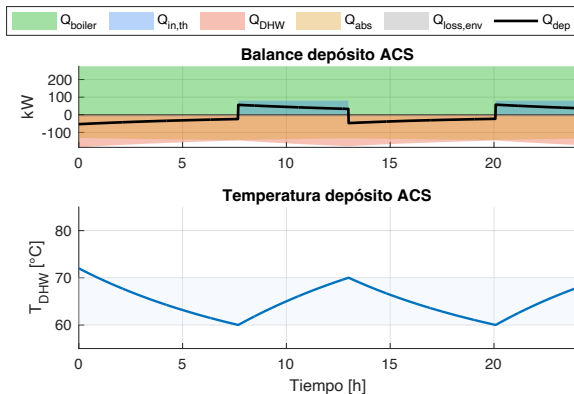


Figura 4. Arriba: balance térmico en el depósito de ACS. Abajo: Evolución de la temperatura en el depósito de ACS.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una propuesta de arquitectura y un modelo de estado para una microrred multienergía orientada a aplicaciones hospitalarias, integrando de forma coherente los dominios eléctrico, físico-químico y térmico. La formulación, basada en una representación en el espacio de estados en tiempo discreto, permite capturar los principales acoplamientos entre los subsistemas de almacenamiento eléctrico, conversión basada en hidrógeno y aprovechamiento térmico.

El modelo incorpora una descripción agregada de los flujos de energía y materia, incluyendo la interacción entre el electrolizador, la pila de combustible, la turbina de gas y la turbina de vapor, así como la gestión del almacenamiento térmico mediante un depósito de agua caliente sanitaria y el soporte de una caldera auxiliar. El uso de coeficientes

equivalentes y simplificaciones basadas en rendimientos, permite mantener la tratabilidad del modelo sin perder coherencia física.

Los resultados de simulación obtenidos validan el comportamiento esperado de la arquitectura propuesta, mostrando la correcta interacción entre generación, almacenamiento y demanda en el sistema multienergía. En este sentido, el modelo desarrollado constituye una base adecuada para el diseño de estrategias de control basadas en modelo, orientadas a la gestión eficiente y fiable del sistema.

Como trabajo futuro, se plantea la validación experimental del modelo con datos reales, así como su aplicación en esquemas avanzados de optimización y control para mejorar la operación de microrredes hospitalarias.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PID2023-148456OB-C41 y PID2023-148456OB-C43, financiados por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER, UE.

Referencias

- Bawaneh, K., Ghazi Nezami, F., Rasheduzzaman, M., Deken, B., 2019. Energy Consumption Analysis and Characterization of Healthcare Facilities in the United States. *Energies* 12, 3775. DOI: 10.3390/en12193775
- Buonomano, A., Calise, F., Ferruzzi, G., Vanoli, L., 2014. A novel renewable polygeneration system for hospital buildings: Design, simulation and thermo-economic optimization. *Appl. Therm. Eng.* 67, 43–60. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.03.008
- Hervás-Zaragoza, J., Colmenar-Santos, A., Rosales-Asensio, E., Colmenar-Fernández, L., 2022. Microgrids as a mechanism for improving energy resilience during grid outages: A post COVID-19 case study for hospitals. *Renew. Energy* 199, 308–319. DOI: 10.1016/j.renene.2022.08.132
- Isa, N.M., Das, H.S., Tan, C.W., Yatim, A.H.M., Lau, K.Y., 2016. A techno-economic assessment of a combined heat and power photovoltaic/fuel cell/battery energy system in Malaysia hospital. *Energy* 112, 75–90. DOI: 10.1016/j.energy.2016.06.056
- Karliner, J., Slotterback, S., Boyd, R., Ashby, B., Steele, K., 2019. Health Care's Climate Footprint: How the Health Sector Contributes to the Global Climate Crisis and Opportunities for Action. URL: <https://global.noharm.org/focus/climate/health-care-climate-footprint-report> (accessed 5.11.26).
- Liu, J., Jian, L., Wang, W., Qiu, Z., Zhang, J., Dastbaz, P., 2021. The role of energy storage systems in resilience enhancement of health care centers with critical loads. *J. Energy Storage* 33, 102086. DOI: 10.1016/j.est.2020.102086
- Mazzeo, D., Baglivo, C., Panico, S., Manieri, M., Matera, N., Congedo, P.M., 2023. Eco-Sustainable Energy Production in Healthcare: Trends and Challenges in Renewable Energy Systems. *Energies* 16, 7285. DOI: 10.3390/en16217285
- Teke, A., Timur, O., 2014. Assessing the energy efficiency improvement potentials of HVAC systems considering economic and environmental aspects at the hospitals. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 33, 224–235. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.002
- Vivas, F.J., Segura, F., Andújar, J.M., Caparrós, J.J., 2020. A suitable state-space model for renewable source-based microgrids with hydrogen as backup for the design of energy management systems. *Energy Convers. Manag.* 219, 113053. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113053