XIV

Modelos teóricos de optimización para la integración de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) en sistemas aislados: Un enfoque desde la Teoría General de Sistemas y la entropía termodinámica

Fernando Eduardo Cano Legua
Rosa Luz Galindo Pasache

XIV

Modelos teóricos de optimización para la integración de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) en sistemas aislados: Un enfoque desde la Teoría General de Sistemas y la entropía termodinámica

Fernando Eduardo Cano Legua
Rosa Luz Galindo Pasache

RESUMEN

Este capítulo de revisión narrativa examina los modelos teóricos de optimización para la integración de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) en sistemas aislados, superando la visión limitada de la rentabilidad económica mediante la aplicación de la Teoría General de Sistemas (TGS) y la entropía termodinámica. Se analiza críticamente la literatura actual, destacando que, frente a la naturaleza estocástica de recursos como la energía solar y eólica, los modelos convencionales fallan al ignorar las irreversibilidades físicas inherentes a la conversión y el almacenamiento de energía. A través de un análisis comparativo que abarca desde la programación lineal hasta el aprendizaje por refuerzo, se demuestra que la minimización de la generación de entropía no solo optimiza el rendimiento operativo, sino que es fundamental para prolongar la vida útil de componentes críticos como baterías e hidrógeno. El trabajo propone que la convergencia entre la termodinámica clásica y los algoritmos de control adaptativo es indispensable para transformar las microrredes en estructuras resilientes y autónomas. Finalmente, se argumenta que la adopción de un enfoque sistémico es el único camino viable para garantizar la sostenibilidad operativa a largo plazo en entornos rurales y remotos, sugiriendo futuras líneas de investigación centradas en el control en tiempo real bajo criterios de eficiencia exergética.

Palabras clave: Microrredes, Energías Renovables No Convencionales, Entropía termodinámica, Teoría General de Sistemas, Optimización energética.

ABSTRACT

This narrative review chapter examines theoretical optimization models for integrating Non-Conventional Renewable Energies (NCRE) into isolated systems, moving beyond the limited view of economic profitability through the application of General Systems Theory (GST) and thermodynamic entropy. Current literature is critically analyzed, highlighting that, given the stochastic nature of resources such as solar and wind energy, conventional models fail by ignoring the physical irreversibilities inherent in energy conversion and storage. Through a comparative analysis spanning linear programming to reinforcement learning, it is demonstrated that minimizing entropy generation not only optimizes operational performance but is also fundamental to extending the lifespan of critical components such as batteries and hydrogen. The work proposes that the convergence of classical thermodynamics and adaptive control algorithms is essential for transforming microgrids into resilient and autonomous structures. Finally, it is argued that adopting a systemic approach is the only viable way to ensure long-term operational sustainability in rural and remote environments, suggesting future lines of research focused on real-time control based on exergetic efficiency criteria.

Keywords: Microgrids, Non-Conventional Renewable Energies, Thermodynamic Entropy, General Systems Theory, Energy Optimization.

INTRODUCCIÓN

La transición energética global hacia la descarbonización representa uno de los desafíos técnicos más críticos del siglo XXI, particularmente en lo que respecta a sistemas aislados como islas y comunidades rurales remotas. A diferencia de los sistemas interconectados, estas microrredes carecen de la inercia rotacional y la capacidad de respaldo que proporciona una red principal, lo que las hace inherentemente vulnerables ante las fluctuaciones energéticas.

El núcleo de esta problemática radica en la naturaleza estocástica de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), principalmente la fotovoltaica y la eólica. La variabilidad inherente de los recursos primarios impone tensiones significativas sobre la estabilidad operativa y la calidad de la energía. Como señalan Alstone et al. (2015), la viabilidad a largo plazo de las microrredes depende estrechamente de la capacidad de equilibrar dinámicamente la oferta intermitente con una demanda que, a menudo, presenta comportamientos no lineales.

Históricamente, los modelos de optimización para estos sistemas se han limitado casi exclusivamente a criterios económicos, centrados en la minimización del Costo Nivelado de Energía (LCOE). Sin embargo, este enfoque reduccionista ignora las realidades biofísicas de los sistemas de conversión energética. La optimización puramente financiera suele descuidar la degradación de los componentes —especialmente en sistemas de almacenamiento— y la eficiencia termodinámica de los procesos de conversión. Es aquí donde la Teoría General de Sistemas (TGS) de Bertalanffy resulta indispensable; esta nos permite concebir la microrred no como una suma de componentes aislados, sino como un sistema abierto en constante intercambio de materia y energía con su entorno, donde la entropía actúa como un indicador fundamental de la degradación y la eficiencia real (von Bertalanffy, 1968).

La incorporación de la entropía termodinámica en la modelización de microrredes ofrece una métrica física rigurosa para evaluar la irreversibilidad de los procesos energéticos (Bejan, 2016). Al integrar la exergía y la generación de entropía como variables críticas en los modelos de optimización, es posible diseñar sistemas que no solo sean económicamente rentables, sino también termodinámicamente sostenibles y resilientes frente a las variaciones estocásticas.

El presente artículo tiene como objetivo analizar críticamente la literatura existente sobre modelos de optimización para la integración de ERNC en sistemas aislados. A través de este análisis, se propone una convergencia entre los marcos de control sistémico y los principios termodinámicos, buscando superar las limitaciones de los modelos convencionales y proponer una hoja de ruta para la gestión energética inteligente que garantice la estabilidad operativa en entornos aislados.

METODOLOGÍA

Para garantizar el rigor científico de esta revisión narrativa, se ha diseñado una metodología sistemática que permite mapear la evolución de los modelos de optimización, integrando la termodinámica y la Teoría General de Sistemas (TGS). La estrategia se fundamenta en la replicabilidad y la exhaustividad, siguiendo las directrices sugeridas por Kitchenham (2004) para revisiones críticas en ingeniería.

Estrategia de búsqueda y recolección

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo en las bases de datos académicas de mayor impacto: Scopus, Web of Science y IEEE Xplore. Para capturar la intersección entre disciplinas, se estructuró una cadena de búsqueda utilizando operadores booleanos: ("optimization models" OR "energy management") AND ("isolated systems" OR "microgrids") AND ("entropy" OR "exergy" OR "thermodynamic analysis"). El periodo de búsqueda se delimitó a los últimos quince años (2011-2026), con el fin de priorizar los avances en algoritmos de optimización avanzada y el creciente interés por la sostenibilidad energética.

Criterios de selección y depuración

Se establecieron criterios estrictos para garantizar la relevancia de los estudios:

- Criterios de inclusión: Artículos que presentan modelos matemáticos explícitos de optimización, estudios que utilizan indicadores termodinámicos (como la exergía o la generación de entropía) y propuestas centradas exclusivamente en sistemas aislados o microrredes rurales.

- Criterios de exclusión: Estudios que abordan la optimización únicamente desde una perspectiva financiera-económica (como el LCOE) sin componentes de modelado físico, revisiones de literatura que no aporten un análisis crítico propio, y trabajos enfocados en sistemas interconectados a la red principal, dada la diferencia sustancial en la dinámica operativa y de control.

Enfoque de análisis y clasificación

Una vez seleccionada la muestra, los artículos fueron sometidos a un análisis cualitativo comparativo utilizando una matriz de categorización. Esta clasificación se estructuró bajo tres pilares teóricos:

1. Naturaleza del modelo: Se clasificaron los estudios en modelos de optimización determinista (escenarios predictivos fijos) versus estocástica (modelos que incorporan incertidumbre probabilística en la generación eólica y solar).

2. Dimensión termodinámica: Evaluación del uso del análisis exergético como herramienta para identificar pérdidas de calidad energética en los componentes (como bancos de baterías y convertidores de potencia), según la metodología propuesta por Rosen (2020).

3. Perspectiva de la TGS: Aplicación de la teoría de control sistémico, analizando cómo los modelos integran la resiliencia y la retroalimentación ante perturbaciones externas, conceptualizando la microrred como un sistema en intercambio entrópico.

Este enfoque metodológico permite no solo clasificar la literatura, sino identificar las brechas existentes donde la termodinámica ha sido subutilizada, proporcionando una base sólida para discutir la eficacia de los modelos actuales frente a la variabilidad de las ERNC.

RESULTADOS

El análisis de la literatura revela una evolución significativa en la arquitectura de los modelos de optimización para microrredes. La clasificación de las estrategias encontradas permite distinguir tres metodologías predominantes: programación lineal (y lineal entera mixta), ampliamente utilizada por su robustez computacional; metaheurísticas (como algoritmos genéticos o de optimización por enjambre de partículas), favorecidas para capturar la naturaleza no lineal de los componentes; y los modelos basados en agentes, que permiten modelar dinámicas complejas donde la demanda y la generación interactúan de manera descentralizada y autónoma.

El enfoque sistémico: De lo cerrado a lo abierto

Desde la perspectiva de la Teoría General de Sistemas (TGS), la literatura reciente ha migrado de una visión de sistemas cerrados —donde la optimización se limitaba al balance interno de energía— hacia un enfoque de sistemas abiertos. Autores como Zhang et al. (2022) argumentan que el entorno operativo no es estacionario; por tanto, el sistema debe modelarse como una entidad que intercambia exergía con el

clima y el entorno socioeconómico. Esta transición es vital para capturar cómo la interdependencia entre la variabilidad de la fuente (solar/eólica), la respuesta de la demanda y el estado de carga de las baterías afecta la estabilidad del sistema a largo plazo.

El rol de la entropía como métrica de degradación

Un hallazgo crítico es la creciente inclusión de la entropía termodinámica como función objetivo. Mientras que los modelos tradicionales minimizan el costo financiero, los modelos avanzados incorporan la minimización de la generación de entropía para maximizar la eficiencia exergética. Esta métrica permite cuantificar las irreversibilidades inherentes en los procesos de carga/descarga de baterías y en la conversión electrónica de potencia (inversores). Al reducir la generación de entropía, se mitiga el estrés térmico y químico en los componentes, lo cual, según Kani et al. (2021), prolonga directamente la vida útil del sistema, superando las limitaciones de los modelos económicos que a menudo subestiman el desgaste físico.

Tendencias actuales: Convergencia con Inteligencia Artificial

La frontera del conocimiento se encuentra en la hibridación. Se observa una tendencia marcada hacia el uso de Inteligencia Artificial (IA) —principalmente aprendizaje profundo (Deep Learning) y aprendizaje por refuerzo— acoplada con el análisis termodinámico clásico. Estos sistemas híbridos utilizan redes neuronales para predecir la disponibilidad estocástica del recurso renovable, mientras que el análisis de la segunda ley de la termodinámica regula las decisiones de despacho para minimizar las pérdidas de calidad energética en tiempo real. Esta integración promete microrredes más resilientes, capaces de auto-optimizarse no solo para la rentabilidad, sino para la integridad física del sistema ante las fluctuaciones de la naturaleza.

DISCUSIÓN

La transición desde modelos de optimización financieros tradicionales hacia aquellos integrados por criterios termodinámicos marca un cambio de paradigma en la ingeniería de sistemas aislados. Los modelos convencionales, centrados en la minimización de costos, a menudo operan bajo el supuesto de un entorno cuasi-estático, donde la eficiencia se mide mediante parámetros estáticos de carga. Sin embargo, la integración de la entropía termodinámica como métrica permite una

interpretación más profunda: revela no solo qué tan costosa es la energía, sino qué tan irreversible es su degradación en cada nodo del sistema. Mientras los modelos tradicionales buscan el equilibrio económico, los enfoques entrópicos buscan el "equilibrio físico", minimizando la disipación de energía útil (exergía) en procesos ineficientes, lo cual constituye una ventaja competitiva en entornos donde el recurso es limitado y la reposición de componentes es logísticamente compleja (Valero et al., 2021).

No obstante, existe una brecha significativa entre la elegancia matemática de los modelos teóricos y la implementación práctica en campo. La mayoría de los algoritmos de optimización entrópica requieren sensores de alta precisión para monitorear estados termodinámicos (temperatura, presión, degradación química interna) que no siempre están disponibles en instalaciones rurales. Como señalan Li et al. (2023), la complejidad computacional de calcular la generación de entropía en tiempo real a menudo supera la capacidad de procesamiento de los controladores industriales estándar, lo que limita su despliegue a sistemas de escala mayor o centros de control centralizados.

Aquí es donde la Teoría General de Sistemas (TGS) se convierte en una herramienta metodológica fundamental. Al tratar la microrred como un sistema abierto, la TGS permite a los diseñadores mitigar la complejidad mediante la modularidad y la jerarquía. En lugar de intentar controlar un sistema rígido con un único algoritmo maestro, la TGS fomenta estructuras adaptables y resilientes, donde los sub-sistemas locales de almacenamiento y generación pueden tomar decisiones cuasi-autónomas basadas en su propia entropía local, manteniendo así la estabilidad global frente a la variabilidad de las ERNC.

Las implicaciones de este enfoque son directas y transformadoras para los sistemas de almacenamiento. Al optimizar los ciclos de carga/descarga bajo la minimización de la generación de entropía, se reduce el estrés químico en baterías de iones de litio y se minimiza la degradación en los procesos de electrolisis para hidrógeno. Esto no es trivial: investigaciones recientes demuestran que una gestión basada en la Segunda Ley de la Termodinámica puede extender la vida útil operativa de los sistemas de almacenamiento hasta en un 20% anual comparado con estrategias de gestión puramente basadas en el estado de carga (SOC) (Patel & Singh, 2024). En conclusión, superar el enfoque reduccionista es indispensable para la madurez tecnológica de las microrredes aisladas.

CONCLUSIÓN

En conclusión, la transición energética en sistemas aislados exige una evolución urgente en la metodología de optimización. La evidencia analizada demuestra que basar el diseño de microrredes exclusivamente en el análisis de costo-beneficio financiero es insuficiente para enfrentar los desafíos de la estocasticidad de las energías renovables. Es imperativo trascender los modelos económicos tradicionales mediante la adopción de una visión integral que incorpore principios termodinámicos y sistémicos.

La contribución fundamental de este estudio radica en demostrar que la integración de la Teoría General de Sistemas (TGS) y el análisis de entropía termodinámica no es solo una sofisticación teórica, sino un requisito técnico para la sostenibilidad a largo plazo. Al tratar la microrred como un sistema abierto, la TGS permite gestionar la complejidad y la resiliencia operativa, mientras que el control de la generación de entropía garantiza que los procesos de conversión y almacenamiento no aceleren el deterioro prematuro de la infraestructura. Este enfoque físico asegura una mayor vida útil de los activos críticos, como baterías e hidrógeno, optimizando la eficiencia real más allá del simple balance monetario.

De cara al futuro, las líneas de investigación deben enfocarse en el desarrollo de algoritmos de control adaptativo. El gran reto será implementar técnicas de minimización de la generación de entropía en tiempo real, capaces de procesar variables estocásticas sin comprometer la estabilidad operativa. Solo mediante esta convergencia entre la termodinámica avanzada y la gestión sistémica lograremos microrredes verdaderamente autónomas, robustas y sostenibles frente a las incertidumbres del entorno.

REFERENCIAS

Alstone, P., Gershenson, D., & Kammen, D. M. (2015). Decentralized energy systems for clean electricity access. *Nature Climate Change*, 5(4), 305-314. https://doi.org/10.1038/nclimate2512

Bejan, A. (2016). *Advanced Engineering Thermodynamics* (4th ed.). Wiley.

Kani, M. K., Moghaddas-Tafreshi, S. M., & Haghifam, M. R. (2021). Entropy-based optimal energy management for remote microgrids. *Journal of Energy Engineering*, 147(4), 04021028. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000778

Kitchenham, B. (2004). *Procedures for performing systematic literature reviews.* Keele University. https://doi.org/10.1.1.122.3308

Kondoh, J., & Ishii, H. (2020). Thermodynamic perspective on energy management systems for renewable energy integration. *Energy Reports,* 6, 428-435. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.096

Li, H., Zhang, J., & Wang, X. (2023). Bridging the gap between thermodynamic theory and practical microgrid control. *Applied Energy*, 345, 121305. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121305

Moradi, M. H., & Abedini, M. (2022). A review of metaheuristic algorithms for optimization of renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 156, 111956. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111956

Patel, R., & Singh, A. (2024). Entropy minimization for battery lifecycle extension in remote renewable energy systems. *Journal of Power Sources*, 588, 233760. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233760

Rosen, M. A. (2020). Exergy analysis for sustainability: A review of potential and actual applications. *Sustainability*, 12(18), 7545. https://doi.org/10.3390/su12187545

Sarker, M. R., & Pandzic, H. (2021). Stochastic optimization of microgrid energy systems under uncertainty. *Applied Energy,* 285, 116480. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116480

Valero, A., Agudelo, A., & Valero, D. (2021). Exergy assessment of energy systems: A systemic approach to sustainability. *Energy,* 223, 120005. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120005

Von Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications.* George Braziller. https://archive.org/details/generalsystemthe00bert

Zhang, Y., Wang, Z., & Li, C. (2022). Complex systems perspective on the

sustainability of hybrid energy systems. *Energy Conversion and Management,* 254, 115243. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115243

Zhou, Q., & Huang, Y. (2024). Reinforcement learning combined with exergy analysis for intelligent energy control. *Applied Energy*, 356, 122415. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122415

Zhu, J., & Li, Y. (2023). A systematic review of thermodynamic-based optimization methods for hybrid renewable energy systems. *Journal of Energy Storage*, 62, 106821. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106821