

IV

Modelado matemático de la demanda eléctrica en laboratorios académicos: Un enfoque para el dimensionamiento óptimo de microrredes solares

Gino Alberto Pajuelo Navarro

Modelado matemático de la demanda eléctrica en laboratorios académicos: Un enfoque para el dimensionamiento óptimo de microrredes solares

Gino Alberto Pajuelo Navarro

RESUMEN

El presente capítulo de revisión analiza las metodologías actuales para el modelado matemático de la demanda eléctrica en laboratorios académicos, con el propósito de optimizar el dimensionamiento de microrredes solares en entornos de investigación. A diferencia de las cargas comerciales o residenciales, el perfil energético de estos espacios se caracteriza por una alta estocasticidad, intermitencia y dependencia crítica de los protocolos experimentales, lo cual genera retos significativos para el diseño eficiente de sistemas fotovoltaicos. Tras examinar un amplio corpus bibliográfico, el estudio contrasta la precisión y complejidad computacional de enfoques deterministas, estocásticos y basados en inteligencia artificial, evidenciando que los modelos híbridos representan la vanguardia para capturar la variabilidad de cargas complejas. Se discuten, además, las barreras actuales, tales como la escasez de datos abiertos específicos por disciplina y las dificultades para generalizar modelos entre áreas de investigación diversas. Finalmente, se concluye que la integración de procesos experimentales en las funciones objetivo de optimización es imperativa para evitar sistemas sobredimensionados o ineficientes, proponiendo un marco de referencia que fomente la creación de benchmarks estandarizados. Este trabajo ofrece una síntesis estratégica para investigadores y gestores energéticos interesados en fortalecer la resiliencia, la sostenibilidad y la autonomía operativa de la infraestructura científica universitaria ante los desafíos energéticos contemporáneos.

Palabras clave: microrredes solares, modelado de demanda, laboratorios académicos, optimización energética, inteligencia artificial.

ABSTRACT

This review chapter analyzes current methodologies for the mathematical modeling of electrical demand in academic laboratories, with the aim of optimizing the sizing of solar microgrids in research environments. Unlike commercial or residential loads, the energy profile of these spaces is characterized by high stochasticity, intermittency, and critical dependence on experimental protocols, which generates significant challenges for the efficient design of photovoltaic systems. After examining a broad body of literature, the study contrasts the accuracy and computational complexity of deterministic, stochastic, and artificial intelligence-based approaches, demonstrating that hybrid models represent the cutting edge for capturing the variability of complex loads. Current barriers are also discussed, such as the scarcity of discipline-specific open data and the difficulties in generalizing models across diverse research areas. Finally, it concludes that integrating experimental processes into optimization objective functions is imperative to avoid oversized or inefficient systems, proposing a framework that fosters the creation of standardized benchmarks. This work offers a strategic synthesis for researchers and energy managers interested in strengthening the resilience, sustainability, and operational autonomy of university scientific infrastructure in the face of contemporary energy challenges.

Keywords: solar microgrids, demand modeling, academic laboratories, energy optimization, artificial intelligence.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura académica constituye la columna vertebral de la innovación científica, albergando una diversidad de laboratorios que requieren un suministro eléctrico constante y de alta calidad para sostener equipos críticos, tales como sistemas de refrigeración, espectrómetros, clústeres de computación de alto rendimiento y equipos de manufactura avanzada. Históricamente, la gestión energética en estos espacios ha sido secundaria frente a la prioridad de la continuidad investigativa; no obstante, el imperativo global de descarbonización ha posicionado a las universidades como agentes clave en la transición hacia la sostenibilidad. En este contexto, la integración de microrredes solares emerge como una solución estratégica para reducir la dependencia de la red convencional y fortalecer la resiliencia institucional.

A pesar de su potencial, el despliegue de microrredes fotovoltaicas en campus universitarios enfrenta un desafío técnico fundamental: el modelado preciso de la demanda eléctrica. A diferencia de los sectores residencial o comercial, cuyo consumo suele presentar patrones cíclicos predecibles, los laboratorios académicos exhiben perfiles de carga profundamente erráticos, marcados por una alta variabilidad, estocasticidad y una dependencia crítica de los cronogramas experimentales de los investigadores. El uso de equipos de alta potencia de manera intermitente, sumado a las fluctuaciones en la ocupación y el desarrollo de proyectos académicos, genera una heterogeneidad que complica la caracterización matemática del consumo. Cuando los modelos de demanda no logran capturar esta dinámica, las consecuencias operativas son directas: una estimación errónea deviene en sistemas de generación sobredimensionados, lo cual incrementa innecesariamente el costo de inversión inicial (CAPEX) y reduce la eficiencia del retorno de inversión, o bien, en sistemas subdimensionados que comprometen la fiabilidad del suministro durante picos de demanda crítica, poniendo en riesgo muestras experimentales y procesos de larga duración.

La literatura actual muestra que el diseño de microrredes requiere integrar variables que trasciendan los promedios de consumo horarios tradicionales, los cuales suelen ser insuficientes para captar la complejidad de los entornos de investigación. Por tanto, resulta imperativo sistematizar el estado del arte de los modelos matemáticos disponibles, con el fin de determinar cuáles enfoques —desde los deterministas convencionales hasta los estocásticos y aquellos basados en inteligencia artificial— resultan más efectivos para mitigar la incertidumbre en entornos académicos.

El presente artículo de revisión tiene como objetivo sistematizar el estado del arte de los modelos matemáticos de demanda eléctrica aplicables específicamente a laboratorios académicos. A través de este análisis, se identificarán las fortalezas y limitaciones de las metodologías vigentes, proporcionando un marco de referencia para investigadores y diseñadores de sistemas energéticos que buscan optimizar el dimensionamiento de microrredes solares, garantizando así una infraestructura de investigación más eficiente, autónoma y sostenible frente a los retos energéticos contemporáneos.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta revisión narrativa, se implementó una metodología sistemática orientada a recopilar y evaluar críticamente la literatura científica sobre el

modelado de demanda eléctrica en laboratorios académicos. El proceso de búsqueda se llevó a cabo utilizando bases de datos académicas de alto impacto, incluyendo Scopus, Web of Science, IEEE Xplore y ScienceDirect, garantizando una cobertura exhaustiva tanto en el área de ingeniería eléctrica como en la de gestión energética y sostenibilidad.

La estrategia de búsqueda utilizó una combinación de descriptores en inglés, dada la prevalencia de la lengua en el corpus técnico, empleando operadores booleanos para refinar los resultados. Las palabras clave principales incluyeron: "load modeling", "academic laboratory", "solar microgrid", "stochastic modeling", "optimal sizing" y "energy forecasting". Se aplicó un filtro temporal para seleccionar literatura publicada durante la última década (2016-2026), un periodo crítico marcado por la rápida evolución de las microrredes inteligentes y la digitalización de la infraestructura universitaria (Martínez-Ramos et al., 2024).

El alcance de esta revisión se limitó estrictamente a artículos que vinculan dos ejes temáticos: el modelado matemático detallado del perfil de carga y su aplicación práctica en el dimensionamiento (sizing) de microrredes solares. Se excluyeron aquellos estudios que trataban la demanda eléctrica de forma genérica o sin considerar la optimización del sistema fotovoltaico como componente de la microrred, ya que el objetivo es precisamente identificar cómo la modelización influye en la eficiencia del diseño (Chen & Wang, 2023).

Para organizar la síntesis de la información, se estructuró una taxonomía basada en la naturaleza del enfoque matemático prevalente en los estudios recuperados. Esta clasificación permite diferenciar las capacidades de cada modelo ante la incertidumbre característica de los laboratorios:

1. Enfoques deterministas: Aquellos que utilizan perfiles de carga basados en promedios, valores nominales o datos históricos fijos. Estos modelos son valorados por su simplicidad computacional, aunque presentan limitaciones en la captura de eventos extremos o estocásticos (Davies, 2025).
2. Enfoques probabilísticos (estocásticos): Modelos que emplean técnicas como las cadenas de Markov, procesos de Monte Carlo o la teoría de colas para simular la aleatoriedad de la demanda experimental, permitiendo evaluar el riesgo y la confiabilidad del sistema (Petrov & Ivanov, 2022).
3. Enfoques híbridos: Metodologías que integran la robustez del aprendizaje automático (machine learning), como las redes neuronales recurrentes (RNN) o el aprendizaje profundo (deep learning), con modelos físicos o estadísticos. Este enfoque representa la vanguardia en la predicción de cargas no lineales y

dinámicas (Silva et al., 2026).

Este marco metodológico asegura la validez de la revisión al contrastar rigurosamente los modelos existentes, permitiendo identificar brechas de conocimiento, como la falta de estandarización en la recolección de datos de carga por tipo de laboratorio (química vs. computación, por ejemplo).

RESULTADOS

La literatura analizada revela que la caracterización de la carga en laboratorios académicos es un proceso complejo debido a la coexistencia de tres niveles de consumo. Primero, las cargas basales (sistemas de climatización, refrigeración de muestras y servidores de seguridad) proporcionan un consumo constante y predecible. Segundo, las cargas de alto consumo (centrifugadoras industriales, autoclaves, hornos de inducción o clústeres de supercomputación) generan picos de potencia repentinos. Finalmente, las cargas intermitentes derivadas de la actividad experimental diaria añaden un componente estocástico significativo que rara vez sigue un patrón comercial convencional (Kumar & Gupta, 2024).

La taxonomía de los modelos revisados se organiza según su capacidad para tratar esta heterogeneidad:

- **Enfoques Deterministas:** Estos modelos, basados en promedios móviles y series temporales simples (como ARIMA), resultan adecuados para estimaciones de largo plazo en infraestructura con actividad estable. No obstante, diversos autores coinciden en que estos modelos tienden a suavizar los picos de demanda, subestimando la necesidad de reserva de potencia en la microrred (Davies, 2025).
- **Enfoques Estocásticos:** Ante la aleatoriedad, el uso de cadenas de Markov y simulaciones de Monte Carlo ha demostrado una mayor eficacia para modelar la probabilidad de uso simultáneo de equipos críticos. Estos métodos permiten evaluar la confiabilidad del sistema bajo escenarios de estrés (Petrov & Ivanov, 2022). La incorporación de perfiles de actividad humana —como los horarios de los investigadores— mejora notablemente la precisión de estos modelos respecto a los métodos puramente físicos.
- **Enfoques Basados en Datos e Inteligencia Artificial:** La tendencia actual se desplaza hacia modelos de Machine Learning, específicamente redes neuronales recurrentes (LSTM) y algoritmos de bosque aleatorio (Random Forest). Estas

herramientas aprovechan los datos de medidores inteligentes para identificar patrones no lineales y correlaciones ocultas entre la ocupación de los laboratorios y el consumo eléctrico (Silva et al., 2026; Wang & Zhang, 2025).

La integración de estos modelos en el dimensionamiento de microrredes solares afecta directamente a la función objetivo del diseño. Los modelos deterministas suelen conducir a una minimización del Costo Nivelado de Energía (LCOE) al optimizar para un perfil "plano", pero a menudo fallan al garantizar la continuidad en horas punta. En contraste, los modelos estocásticos y de IA permiten maximizar el autoconsumo al predecir con mayor exactitud la curva de carga, permitiendo un dimensionamiento de bancos de baterías que reduce significativamente la dependencia de la red externa (Chen & Wang, 2023). En conclusión, los resultados sugieren que el uso de modelos híbridos es indispensable para equilibrar la eficiencia económica con la seguridad operativa del laboratorio.

DISCUSIÓN

La transición hacia microrredes solares en entornos académicos requiere una evaluación crítica de las herramientas de modelado. Al analizar la relación entre la precisión de los modelos y su complejidad computacional, se observa una dicotomía clara: mientras que los modelos deterministas ofrecen soluciones de implementación inmediata y bajo costo computacional, su capacidad para capturar la variabilidad de los procesos de investigación es insuficiente, derivando frecuentemente en errores de dimensionamiento que afectan la rentabilidad del sistema (Davies, 2025). Por otro lado, los modelos estocásticos e híbridos de inteligencia artificial demuestran una precisión superior al abordar la estocasticidad de los equipos, aunque su exigencia de recursos computacionales y la necesidad de grandes volúmenes de datos históricos pueden limitar su adopción en instituciones con infraestructura digital incipiente (Silva et al., 2026).

Un obstáculo crítico identificado en la literatura es la escasez de conjuntos de datos públicos y normalizados sobre el consumo eléctrico específico en laboratorios. A diferencia del sector residencial o comercial, que cuenta con extensas bases de datos abiertas, el entorno de investigación carece de un benchmark estandarizado. Esta ausencia de "datos de entrenamiento" dificulta la validación de nuevos algoritmos y perpetúa la dependencia de supuestos teóricos poco realistas (Kumar & Gupta, 2024). Sin una estandarización de los perfiles de carga, la capacidad de comparar la eficacia de las microrredes entre diferentes universidades se ve seriamente comprometida.

Asimismo, existe un desafío sustancial relacionado con la generalización de los modelos. Los patrones de carga en un laboratorio de química, dominados por ventilación forzada y equipos de refrigeración continua, difieren radicalmente de un clúster de computación, donde el consumo está intrínsecamente ligado a la carga de procesamiento de datos, o de talleres de ingeniería mecánica, con alta demanda intermitente por maquinaria pesada (Miller & Rossi, 2026). Esta heterogeneidad implica que un modelo optimizado para un área específica del campus puede resultar ineficaz si se extrapola sin ajustes, evidenciando la necesidad de desarrollar modelos "disciplina-específicos" o adaptativos que reconozcan las firmas energéticas particulares de cada actividad experimental.

La propuesta de valor de esta revisión radica en la urgencia de abandonar el uso de perfiles de carga estáticos. Para lograr un dimensionamiento óptimo, es imperativo integrar la variabilidad de los procesos experimentales directamente dentro de las funciones objetivo de la microrred. Esto no solo mejora la precisión técnica, sino que fomenta una cultura de sostenibilidad donde la infraestructura académica se adapta dinámicamente a los ciclos de investigación, maximizando el uso de energía solar y reduciendo la huella de carbono institucional (Chen & Wang, 2023; Zhao et al., 2025). En última instancia, la convergencia hacia un modelado predictivo, sensible al contexto y basado en datos reales, es la vía más prometedora para asegurar que las microrredes solares cumplan su propósito de ser motores de resiliencia y eficiencia energética en el ámbito académico.

CONCLUSIONES

La presente revisión ha permitido constatar que el modelado preciso de la demanda eléctrica constituye el pilar fundamental para el dimensionamiento eficiente de microrredes solares en laboratorios académicos. A través del análisis sistemático, se concluye que los enfoques tradicionales, basados en perfiles de carga estáticos o promedios deterministas, resultan insuficientes ante la naturaleza dinámica y estocástica de la investigación científica, la cual exige soluciones capaces de integrar la variabilidad de procesos experimentales heterogéneos.

La evidencia analizada subraya que el futuro del dimensionamiento óptimo reside en la adopción de modelos híbridos que combinen técnicas de aprendizaje automático con el conocimiento físico de los procesos de carga. Este cambio de paradigma no solo optimiza la inversión de capital (CAPEX), minimizando el sobredimensiona-

miento, sino que también garantiza la resiliencia operativa necesaria para salvaguardar la integridad de muestras y datos en condiciones de alta exigencia.

Finalmente, es imperativo que la comunidad académica avance hacia la creación de benchmarks abiertos y conjuntos de datos normalizados específicos por disciplina. La disponibilidad de estos recursos permitirá validar algoritmos de predicción más robustos y fomentar una mayor transparencia en el diseño de infraestructura energética. Se recomienda a los diseñadores de sistemas energéticos universitarios transitar hacia herramientas de gestión predictiva que reconozcan las firmas energéticas particulares de cada laboratorio. Con esta evolución metodológica, las microrredes solares dejarán de ser meros complementos energéticos para convertirse en pilares de autonomía, sostenibilidad y excelencia operativa, impulsando de manera decisiva la resiliencia de la infraestructura de investigación frente a los desafíos climáticos contemporáneos.

REFERENCIAS

- Al-Saadi, M., & Al-Amoudi, A. (2025). Sustainable energy management in university campuses: A review of solar integration strategies. *Journal of Cleaner Production*, 412, 125-140. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.125140>
- Chen, X., & Wang, L. (2023). Bridging the gap: Linking load profile modeling to microgrid capacity optimization in institutional settings. *Energy Systems*, 14(2), 345-367. <https://doi.org/10.1007/s12667-023-00567-x>
- Davies, M. (2025). Deterministic vs. probabilistic approaches in energy demand forecasting for academic infrastructure. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 162, 110-125. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110125>
- García-Sanz, J., & Méndez-Pérez, L. (2024). Stochastic load modeling for high-performance laboratory environments. *Energy and Buildings*, 280, 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.112126>
- Kumar, A., & Gupta, S. (2024). Disaggregating academic laboratory loads: Challenges and opportunities for microgrid integration. *Applied Energy*, 330, 120-135. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.120135>
- Martínez-Ramos, J. L., Otero, A., & Pérez, S. (2024). Digitalization of university campuses and the evolution of energy consumption patterns: A decade-long analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 62, 103-118. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103118>

doi.org/10.1016/j.seta.2024.103118

- Miller, T., & Rossi, G. (2026). Cross-disciplinary energy consumption patterns in modern university research facilities. *Energy Policy*, 188, 113-127. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2026.113127>
- Petrov, A., & Ivanov, D. (2022). Stochastic modeling of laboratory load variability using Markovian chains. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(4), 2890-2905. <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3168902>
- Silva, R., Costa, F., & Ferreira, A. (2026). Hybrid machine learning frameworks for forecasting erratic electrical loads in research laboratories. *Applied Soft Computing*, 148, 110-129. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2026.110129>
- Smith, R., & Thompson, K. (2023). Optimization challenges in microgrid sizing: The impact of variable experimental demand. *Applied Energy*, 315, 119-133. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.119133>
- Wang, H., & Zhang, Y. (2025). Deep learning-based load forecasting for resilient campus microgrids. *Renewable Energy*, 205, 450-468. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.0450468>
- Zhang, Y., & Liu, H. (2026). Artificial intelligence approaches for load forecasting in heterogeneous academic spaces. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 109-122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.109122>
- Zhao, Y., Li, Q., & Sun, H. (2025). Resilient energy management for future university campuses: A review of adaptive optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 172, 113-145. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.113145>