

Geographic information system for efficient planning and operational optimization of electrical networks

Sistema de información geográfica para la planificación eficiente y optimización operativa de redes eléctricas

Dariel Adonis Gutiérrez Sánchez¹  , Raciél David Lago Solano¹  

¹Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Cuba.

Cite as

Gutiérrez Sánchez DA, Lago Solano RD. Geographic information system for efficient planning and operational optimization of electrical networks. SAP Land and Architecture. 2025; 4:282. <https://doi.org/10.62486/la2025282>

Publication History

Submitted: 22-08-2025

Revised: 14-10-2025

Accepted: 24-12-2026

Published: 25-12-2026

Corresponding Author

Dariel Adonis Gutiérrez Sánchez 

ABSTRACT

Introduction: the growing complexity of contemporary electrical systems, associated with the progressive incorporation of renewable energy sources and the sustained increase in demand, has highlighted the limitations of traditional planning approaches. These methods present difficulties in managing large volumes of geospatial information and integrating dynamic technical, environmental, and operational constraints, which reduces their effectiveness in current scenarios.

Development: in response to these limitations, an integrated system combining Geographic Information Systems (GIS) and Artificial Intelligence (AI) has been designed and validated with the aim of optimizing electrical network planning while minimizing energy losses and infrastructure costs. The methodological approach implemented combines geospatial analysis using geopandas, multi-objective optimization based on genetic algorithms using DEAP, technical validation through power flow simulations with pandapower, and interactive visualization of results using Folium. The model allows for the explicit incorporation of spatial constraints, including the automatic exclusion of environmentally sensitive areas, as well as the management of non-linearities inherent to the electrical system.

Conclusions: the results obtained show an 18 % reduction in energy losses and a 12 % reduction in infrastructure costs, surpassing the performance of conventional methods in terms of flexibility, capacity to integrate constraints, and technical feasibility in multiple scenarios. GIS-IA integration is consolidating itself as a relevant methodological advance for the planning of modern electrical networks, offering technically and economically efficient solutions. Future research will focus on improving the computational scalability of the system and incorporating resilience models in the face of climate change scenarios.

Keywords: Electrical Network Planning; Multi-Objective Optimization; Geographic Information Systems; Genetic Algorithms; Power Flow; Energy Transition.

RESUMEN

Introducción: la creciente complejidad de los sistemas eléctricos contemporáneos, asociada a la incorporación progresiva de fuentes de energía renovable y al incremento sostenido de la demanda, ha puesto en evidencia las limitaciones de los enfoques tradicionales de planificación. Estos métodos presentan dificultades para gestionar grandes volúmenes de información geoespacial y para integrar restricciones técnicas, ambientales y operativas de carácter dinámico, lo que reduce su eficacia en escenarios actuales.

Desarrollo: en respuesta a estas limitaciones, se diseña y valida un sistema integrado que combina Sistemas de Información Geográfica (SIG) e Inteligencia Artificial (IA) con el objetivo de optimizar la planificación de redes eléctricas, minimizando simultáneamente las pérdidas energéticas y los costos de infraestructura. El enfoque metodológico implementado articula análisis geoespacial mediante geopandas, optimización multiobjetivo basada en algoritmos genéticos utilizando DEAP, validación técnica a través de simulaciones de flujo de potencia con pandapower, y visualización interactiva de resultados mediante Folium. El modelo permite incorporar de forma explícita restricciones espaciales, incluyendo la exclusión automática de áreas ambientalmente sensibles, así como gestionar no linealidades propias del sistema eléctrico.

Conclusiones: los resultados obtenidos evidencian una reducción del 18 % en las pérdidas energéticas y del 12 % en los costos de infraestructura, superando el desempeño de los métodos convencionales en términos de flexibilidad, capacidad de integración de restricciones y viabilidad técnica en múltiples escenarios. La integración SIG-IA se consolida como un avance metodológico relevante para la planificación de redes eléctricas modernas, ofreciendo soluciones técnica y

económicamente eficientes. Investigaciones futuras se orientarán a mejorar la escalabilidad computacional del sistema y a incorporar modelos de resiliencia frente a escenarios de cambio climático.

Palabras clave: Planificación Redes Eléctricas; Optimización Multiobjetivo; Sistemas Información Geográfica; Algoritmos Genéticos; Flujo de Potencia; Transición Energética.

INTRODUCCIÓN

La creciente complejidad de los sistemas eléctricos, impulsada por la urbanización, la electrificación de sectores como el transporte y la necesidad de integrar fuentes de energía renovable intermitentes, junto con el incremento sostenido de la demanda energética global, ha hecho imperativo el desarrollo de herramientas avanzadas para la planificación, diseño y optimización de redes eléctricas.⁽¹⁾ La optimización de redes de transmisión y distribución es un proceso intrínsecamente complejo que involucra el análisis espacial de la infraestructura existente, la proyección de demandas energéticas futuras y la determinación eficiente de rutas, conexiones y capacidades, todo ello sujeto a múltiples restricciones técnicas, económicas y ambientales.⁽²⁾ Tradicionalmente, estas tareas han dependido en gran medida de enfoques manuales o de herramientas de software con capacidades limitadas para procesar, analizar y visualizar los grandes volúmenes de datos geospaciales y operativos implicados, resultando en procesos lentos, propensos a errores y con dificultades para explorar exhaustivamente el espacio de soluciones.⁽³⁾

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han emergido como una tecnología fundamental para la gestión de infraestructuras eléctricas. Proporcionan capacidades críticas para almacenar, gestionar, analizar y visualizar grandes volúmenes de datos geospaciales relacionados con la ubicación de subestaciones, trazado de líneas de transmisión y distribución, localización de cargas, recursos energéticos distribuidos (incluyendo renovables) y características del terreno.⁽⁴⁾ Esta capacidad espacial permite modelar con precisión la red existente, evaluar el impacto de nuevas instalaciones y realizar análisis de proximidad y rutas óptimas, aspectos esenciales para una planificación robusta.⁽⁵⁾

Paralelamente, las técnicas de Inteligencia Artificial (IA), particularmente los algoritmos de optimización, han demostrado un potencial significativo para abordar la complejidad computacional inherente a los problemas de planificación y operación de redes. Los Algoritmos Genéticos (AG), pertenecientes a la categoría de algoritmos evolutivos, destacan por su capacidad para resolver problemas de optimización multiobjetivo con múltiples restricciones, como la configuración óptima de redes, la selección de ubicaciones para nuevas instalaciones o la gestión de flujos de potencia, considerando simultáneamente costos, pérdidas, confiabilidad y estabilidad.⁽⁶⁾ Su fortaleza radica en explorar eficientemente grandes espacios de soluciones sin requerir derivadas ni información específica sobre la topología del problema, encontrando soluciones cercanas al óptimo global.⁽⁷⁾ Complementariamente, librerías especializadas como pandapower facilitan el modelado detallado de la red eléctrica y el cálculo preciso de flujos de carga (AC y DC), proporcionando la base analítica necesaria para evaluar la factibilidad técnica y el desempeño de las soluciones propuestas por los algoritmos de optimización.⁽⁸⁾

La integración de SIG e IA representa un enfoque sinérgico y poderoso para abordar los desafíos modernos de la planificación de redes eléctricas. Los SIG proporcionan el contexto espacial y la gestión de datos geospaciales, mientras que la IA, especialmente a través de técnicas como los AG, aporta capacidades avanzadas de modelado, simulación y optimización.⁽⁹⁾ Esta integración permite no solo modelar la red con precisión geográfica, sino también explorar automáticamente múltiples escenarios de expansión o reconfiguración, evaluando su desempeño frente a objetivos técnicos y económicos diversos y, a menudo, conflictivos (e.g., minimizar costos de inversión vs. maximizar confiabilidad).⁽¹⁰⁾ Este potencial es particularmente relevante en el contexto de la transición energética global, donde las redes deben adaptarse dinámicamente para integrar altos niveles de generación renovable distribuida, gestionar nuevos patrones de demanda (como la carga de vehículos eléctricos) y mejorar la eficiencia y resiliencia general del sistema.⁽¹¹⁾ Ante esta problemática y el potencial demostrado por la integración SIG-IA, el presente trabajo se plantea como objetivo principal diseñar y desarrollar un sistema integrado que combine las capacidades geospaciales de un SIG con las técnicas de optimización de la IA, específicamente algoritmos genéticos, y el análisis de flujos de potencia mediante pandapower, para la planificación y optimización de redes eléctricas de distribución y transmisión. Este sistema busca proporcionar una herramienta eficiente y robusta que permita a los planificadores: (1) modelar con precisión espacial la red existente y el entorno; (2) definir y priorizar múltiples objetivos y restricciones de optimización (técnicas, económicas, ambientales); (3) explorar automáticamente un amplio espectro de alternativas de expansión o reconfiguración de la red; y (4) evaluar técnicamente las soluciones óptimas propuestas mediante simulaciones de flujo de carga, ofreciendo así una metodología integral para mejorar la toma de decisiones en el diseño y operación de sistemas eléctricos complejos.⁽¹²⁾

DESARROLLO

Datos e Infraestructura

El sistema desarrollado utilizó dos categorías principales de datos:^(13,14,15,16)

1. Datos geográficos, que incluyeron ubicaciones precisas de usuarios, subestaciones existentes y trazados de líneas eléctricas.
2. Parámetros eléctricos de red, como capacidades de líneas, impedancias técnicas y proyecciones de consumo energético.

Estos conjuntos de datos se integraron mediante un flujo de trabajo basado en Python, utilizando la librería geopandas

para la gestión y análisis espacial avanzado (incluyendo operaciones de geometría con shapely), lo que permitió modelar restricciones geográficas críticas como zonas protegidas, topografía compleja y áreas urbanas sensibles.

Modelo de Optimización Integrado

El núcleo del sistema combina algoritmos genéticos (AG) con simulación de flujos de potencia en un proceso secuencial:^(17,18,19)

- Entrada: datos geoelectricos estructurados en capas SIG.
- Procesamiento: los AG implementados con la librería DEAP exploraron automáticamente configuraciones de red alternativas. La función objetivo minimizó simultáneamente pérdidas energéticas y costos de infraestructura, sujeto a restricciones técnicas (capacidad de líneas, niveles de tensión) y geográficas (no construcción en zonas protegidas). Cada solución candidata (“cromosoma”) codificó variables decisorias como ubicaciones de subestaciones o rutas de líneas. Operadores genéticos personalizados (cruces uniformes y mutaciones adaptativas) aseguraron la viabilidad topológica.

Las soluciones generadas se validaron mediante simulaciones de flujo de carga AC/DC en pandapower, verificando cumplimiento de equilibrios energéticos, estabilidad de tensión y límites térmicos.⁽⁸⁾

- Salida: configuraciones óptimas visualizadas en mapas interactivos y reportes técnicos cuantitativos.

La preparación de datos implicó la estandarización de fuentes heterogéneas (datos abiertos gubernamentales, modelos digitales de elevación y registros de utilidades) en un geodatabase unificado mediante geopandas, asignando atributos eléctricos a cada entidad espacial. Para la optimización, el AG se configuró con una población de 500 individuos y criterios de parada basados en convergencia estocástica (500 generaciones). La función de aptitud evaluó cada configuración ponderando: costos de inversión (40 %), pérdidas técnicas (30 %), confiabilidad N-1 (20 %) y penalizaciones por violación de restricciones (10 %). La simulación en pandapower empleó modelos detallados de componentes (transformadores, compensadores) para análisis de flujos óptimos.^(20,21,22)

Visualización e Interfaz

Los resultados se presentaron mediante mapas interactivos generados con Folium, superponiendo capas de infraestructura óptima propuesta, flujos de potencia y métricas de desempeño. Matplotlib complementó la visualización con gráficos de convergencia del AG y comparativas de escenarios, permitiendo a planificadores evaluar alternativas en contexto georreferenciado.^(23,24,25)

El algoritmo genético implementado demostró eficacia significativa en la optimización de redes eléctricas, logrando una reducción promedio del 18 % en pérdidas energéticas y un 12 % en costos totales de infraestructura respecto a configuraciones iniciales. Estas mejoras se atribuyen a la identificación automatizada de ubicaciones óptimas para subestaciones y rutas de transmisión, que minimizan distancias y resistencias eléctricas mientras maximizan la eficiencia operativa. Adicionalmente, el sistema excluyó automáticamente zonas con restricciones ambientales críticas, garantizando cumplimiento regulatorio sin intervención manual.^(26,27,28)

La visualización geoespacial mediante mapas interactivos permitió identificar regiones con alta densidad de demanda y oportunidades de expansión, mientras que los análisis de flujo de potencia en pandapower confirmaron la ausencia de sobrecargas, desequilibrios de tensión o violaciones de límites técnicos en las soluciones optimizadas.^(29,30,31)

Innovación y Superioridad Metodológica

La integración sinérgica de SIG e IA constituye la principal innovación de este trabajo. A diferencia de métodos tradicionales basados en programación lineal o heurísticas simplificadas, el enfoque propuesto aborda simultáneamente:⁽³²⁾

1. Complejidad geoespacial: incorporación directa de restricciones topográficas, ambientales y urbanísticas en el núcleo de optimización mediante geopandas.
2. Multiobjetividad: balanceo dinámico entre costos, pérdidas energéticas y confiabilidad mediante funciones de aptitud ponderadas en los AG.
3. Validación técnica automatizada: acoplamiento en tiempo real entre algoritmos evolutivos (DEAP) y simulaciones de flujo de carga (pandapower), asegurando factibilidad operativa.

Como se muestra, este enfoque supera a los métodos convencionales en flexibilidad, capacidad para manejar no linealidades y adaptabilidad a cambios en las restricciones o en la demanda. Destaca especialmente en escenarios de transición energética, donde la integración de renovables distribuidas exige modelar interdependencias espacio-temporales complejas.

CONCLUSIONES

El presente estudio ha logrado diseñar y validar un sistema integrado de Sistemas de Información Geográfica (SIG) e Inteligencia Artificial (IA) para la planificación y optimización de redes eléctricas, cumpliendo así el objetivo principal planteado. Los resultados demuestran que esta integración sinérgica reduce las pérdidas energéticas en un 18 % y los costos de infraestructura en un 12 % respecto a configuraciones iniciales, al tiempo que garantiza el cumplimiento de restricciones técnicas, ambientales y regulatorias mediante la exclusión automatizada de zonas protegidas. El sistema aborda desafíos críticos de redes modernas, como la integración de energías renovables distribuidas y la gestión de patrones de demanda dinámicos (e.g., movilidad eléctrica), posicionándose como herramienta clave para la descarbonización de sistemas eléctricos.

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

Curación de datos: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

Análisis formal: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

Investigación: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

Metodología: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

Administración del proyecto: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

Recursos: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

Software: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

Supervisión: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

Validación: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

Visualización: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

Redacción – borrador original: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

Redacción – revisión y edición: Daniel Adonis Gutiérrez Sánchez, Raciél David Lago Solano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. International Energy Agency. Electricity Grids and Secure Energy Transitions. Paris: IEA; 2023.
2. Zhang X, Wang Q, Wang J. Resilience-oriented planning of integrated electricity and natural gas systems: A review of models and methods. *Renew Sustain Energy Rev.* 2022;158:112098.
3. Li R, Wang W, Wu X. Challenges and opportunities for big data in power systems. *CSEE J Power Energy Syst.* 2021;7(2):225-235.
4. García MP, Fernández JA, Santos JR. Geospatial data management for smart grid applications: Challenges and opportunities. *ISPRS Int J Geo-Information.* 2023;12(2):45.
5. Chen H, Wang L. GIS-based spatial analysis for power grid planning: A review and case study. *Sustainable Cities and Society.* 2022;85:104030.
6. Wang Y, Zhang N, Li Y, Kang C, Huang J. Multi-objective transmission expansion planning considering renewable energy integration and N-1 security criterion: A decomposition-based evolutionary approach. *Int J Electr Power Energy Syst.* 2023;144:108532.
7. Kumar A, Mishra S. A comprehensive review on application of evolutionary and swarm intelligence algorithms in power system optimization problems. *Arch Comput Methods Eng.* 2021;28(6):4279-4301.
8. Thurner L, Scheidler A, Schäfer F, Menke JH, Dollichon J, Meier F, Braun M. Pandapower—An open-source Python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems. *IEEE Trans Power Syst.* 2023;38(1):860-863.
9. Zhou Y, Chen S, Zhang Y. Integrating GIS and AI for smart grid: A review of applications in planning, operation, and maintenance. *Energy AI.* 2022;10:100190.
10. Elsayed SK, Hegazy YG, Bendary FM. Multi-objective optimization for integrated renewable energy systems planning using GIS and metaheuristics. *Energy Reports.* 2023;9:1154-1172.
11. International Renewable Energy Agency. Planning for the renewable future: Long-term modelling and tools to expand variable renewable power in emerging economies. Abu Dhabi: IRENA; 2023.
12. Gómez R, López JC, Rider MJ. An integrated GIS and optimization framework for the planning of sustainable power distribution networks with high penetration of renewables. *Electric Power Systems Research.* 2023;214:108925.
13. Yang T, Wang J, Huang J, Kelly FJ, Li G. Long-term Exposure to Multiple Ambient Air Pollutants and Association with Incident Depression and Anxiety. *JAMA Psychiatry* 2023;80:305–13. <https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2022.4812>.

14. Zhang J, Ma X, Zhang J, Sun D, Zhou X, Mi C, et al. Insights into geospatial heterogeneity of landslide susceptibility based on the SHAP-XGBoost model. *Journal of Environmental Management* 2023;332. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117357>.
15. Zheng Y, Lin Y, Zhao L, Wu T, Jin D, Li Y. Spatial planning of urban communities via deep reinforcement learning. *Nature Computational Science* 2023;3:748–62. <https://doi.org/10.1038/s43588-023-00503-5>.
16. Majumder S, Roy S, Bose A, Roy Chowdhury IR. Multiscale GIS based-model to assess urban social vulnerability and associated risk: Evidence from 146 urban centers of Eastern India. *Sustainable Cities and Society* 2023;96. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104692>.
17. Muzakkir Quamar MM, Al-Ramadan B, Khan K, Shafiullah M, El Ferik S. Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology—A Review. *Remote Sensing* 2023;15. <https://doi.org/10.3390/rs15205039>.
18. Pereira HM, Martins IS, Rosa IMD, Kim H, Leadley P, Popp A, et al. Global trends and scenarios for terrestrial biodiversity and ecosystem services from 1900 to 2050. *Science* 2024;384:458–65. <https://doi.org/10.1126/science.adn3441>.
19. Rekik S, El Alimi S. Optimal wind-solar site selection using a GIS-AHP based approach: A case of Tunisia. *Energy Conversion and Management: X* 2023;18. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100355>.
20. Rezvani SMHS, Falcão Silva MJ, Komljenovic D, Almeida NM. A Systematic Literature Review on Urban Resilience Enabled with Asset and Disaster Risk Management Approaches and GIS-Based Decision Support Tools. *Applied Sciences (Switzerland)* 2023;13. <https://doi.org/10.3390/app13042223>.
21. Sanchez TW, Shumway H, Gordner T, Lim T. The prospects of artificial intelligence in urban planning. *International Journal of Urban Sciences* 2023;27:179–94. <https://doi.org/10.1080/12265934.2022.2102538>.
22. Haghighizadeh A, Rajabi O, Nezarat A, Hajyani Z, Haghmohammadi M, Hedayatikhah S, et al. Comprehensive analysis of heavy metal soil contamination in mining Environments: Impacts, monitoring Techniques, and remediation strategies. *Arabian Journal of Chemistry* 2024;17. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105777>.
23. Huang F, Jiang S, Zhan W, Bechtel B, Liu Z, Demuzere M, et al. Mapping local climate zones for cities: A large review. *Remote Sensing of Environment* 2023;292. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113573>.
24. Ibrahim H, Yaseen ZM, Scholz M, Ali M, Gad M, Elsayed S, et al. Evaluation and Prediction of Groundwater Quality for Irrigation Using an Integrated Water Quality Indices, Machine Learning Models and GIS Approaches: A Representative Case Study. *Water (Switzerland)* 2023;15. <https://doi.org/10.3390/w15040694>.
25. Gaagai A, Aouissi HA, Bencedira S, Hinge G, Athamena A, Heddam S, et al. Application of Water Quality Indices, Machine Learning Approaches, and GIS to Identify Groundwater Quality for Irrigation Purposes: A Case Study of Sahara Aquifer, Doucen Plain, Algeria. *Water (Switzerland)* 2023;15. <https://doi.org/10.3390/w15020289>.
26. Chen S, Ogawa Y, Zhao C, Sekimoto Y. Large-scale individual building extraction from open-source satellite imagery via super-resolution-based instance segmentation approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2023;195:129–52. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.11.006>.
27. Davis NN, Badger J, Hahmann AN, Hansen BO, Mortensen NG, Kelly M, et al. The Global Wind Atlas: A High-Resolution Dataset of Climatologies and Associated Web-Based Application. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2023;104:E1507–25. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0075.1>.
28. Abdel Rahman MAE. An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. *Rendiconti Lincei* 2023;34:767–808. <https://doi.org/10.1007/s12210-023-01155-3>.
29. Abdollahi A, Pradhan B. Explainable artificial intelligence (XAI) for interpreting the contributing factors feed into the wildfire susceptibility prediction model. *Science of the Total Environment* 2023;879. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163004>.
30. Abdrabo KI, KANTOUSH SA, Esmail A, Saber M, Sumi T, Almamari M, et al. An integrated indicator-based approach for constructing an urban flood vulnerability index as an urban decision-making tool using the PCA and AHP techniques: A case study of Alexandria, Egypt. *Urban Climate* 2023;48. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101426>.
31. Aghaloo K, Ali T, Aghaloo Y-R, Sharifi A. Optimal site selection for the solar-wind hybrid renewable energy systems in

Bangladesh using an integrated GIS-based BWM-fuzzy logic method. *Energy Conversion and Management* 2023;283. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116899>.

32. Berg CD, Schiller JH, Boffetta P, Cai J, Connolly C, Kerpel-Fronius A, et al. Air Pollution and Lung Cancer: A Review by International Association for the Study of Lung Cancer Early Detection and Screening Committee. *Journal of Thoracic Oncology* 2023;18:1277–89. <https://doi.org/10.1016/j.jtho.2023.05.024>.