

REVISIÓN

Desarrollo de una plataforma interactiva para simular y analizar redes eléctricas de distribución

Juan Diego Guzmán Masso^a, Ronny Steven Gutiérrez Rodríguez^a,
Michael Smith Ramírez Ortiz^a, Sandra Rocío Forero^a

^a Estudiantes, Programa de Ingeniería, Corporación Universitaria del Meta - UNIMETA. Villavicencio, Meta, Colombia.

^b Jefe de Investigación, Escuela de Ciencias Administrativas, Corporación Universitaria del Meta - UNIMETA. Villavicencio, Meta, Colombia.

RESUMEN

Este artículo describe el desarrollo de una plataforma interactiva orientada a la simulación y visualización de redes eléctricas de distribución, concebida como herramienta pedagógica para apoyar la formación de estudiantes de ingeniería eléctrica. A partir de un análisis bibliográfico sistemático sobre simulación de sistemas eléctricos, laboratorios virtuales y enfoques constructivistas, se identificaron limitaciones recurrentes de las plataformas existentes en costos, accesibilidad y complejidad de uso. Con base en estos hallazgos, se diseñó una plataforma que integra un entorno visual tridimensional para representar de forma intuitiva los principales componentes de las redes de distribución (líneas, transformadores, subestaciones y fuentes de generación distribuida). El desarrollo incluyó una biblioteca de modelos 3D optimizados y escenarios urbanos simulados que facilitan la comprensión de la relación entre infraestructura eléctrica y territorio. La propuesta constituye una alternativa viable y accesible para fortalecer la enseñanza en ingeniería eléctrica, y puede ampliarse en futuras investigaciones para incorporar análisis cuantitativos y validaciones educativas más robustas.

Palabras clave: redes eléctricas de distribución; simulación interactiva; plataformas educativas; modelo tridimensional; aprendizaje constructivista.

Development of an Interactive Platform to Simulate and Analyze Electrical Distribution Networks

ABSTRACT

This article presents the development of an interactive platform aimed at the simulation and visualization of electrical distribution networks, conceived as a pedagogical tool to support the education of electrical engineering students. Based on a systematic literature review on power system simulation, virtual laboratories, and constructivist learning approaches, recurrent limitations in existing platforms were identified, particularly in terms of cost, accessibility, and operational complexity. Drawing on these findings, a platform was designed that integrates a three-dimensional visual environment, enabling an intuitive representation of the main components of distribution networks. The development process included the creation of an optimized library of 3D models and the configuration of simulated urban scenarios. The proposed platform represents a viable and accessible alternative for strengthening teaching and learning in electrical engineering, and can be extended in future work to incorporate quantitative analyses and more robust educational validation.

Keywords: electrical distribution networks; interactive simulation; educational platforms; three-dimensional modeling; constructivist learning.

* Autor de correspondencia.
Correo electrónico:
sandrarocioforero@yahoo.es

I. Introducción

La electricidad es un pilar fundamental para el desarrollo y funcionamiento de la sociedad moderna, indispensable para el bienestar, la productividad industrial y la provisión de servicios esenciales (Flavin & Lenssen, 1994). En este contexto, las redes de distribución desempeñan un papel crítico, pues transportan la energía desde las centrales generadoras hasta los puntos finales de consumo (ScienceDirect Topics, 2018). La eficiencia, confiabilidad y resiliencia de estas redes son cruciales, dado que cualquier fallo puede generar impactos significativos en la economía y la vida cotidiana (Macmillan *et al.*, 2023).

Estas redes comprenden una infraestructura compleja de líneas, transformadores, subestaciones y sistemas de protección, con topologías frecuentemente radiales o en anillo (Prakash *et al.*, 2016). Para analizar y optimizar su comportamiento se han desarrollado diversas plataformas de simulación (Ringkjøb *et al.*, 2018), pero muchas presentan limitaciones en accesibilidad, costo y complejidad de uso, lo que dificulta su adopción en entornos educativos (De-Jesús-Grullón *et al.*, 2024). Una barrera principal es el alto nivel de especialización técnica requerido, que limita su utilidad pedagógica (Bottaccioli *et al.*, 2018), y muchas carecen de funcionalidades para simular escenarios contemporáneos como la generación distribuida o la respuesta ante eventos extremos (González *et al.*, 2017; Hariri *et al.*, 2017).

Ante esta problemática, este artículo presenta el desarrollo de una plataforma interactiva de simulación para redes de distribución, diseñada para ser más accesible, intuitiva y pedagógicamente efectiva. La plataforma integra un entorno visual interactivo que facilita la comprensión de conceptos técnicos complejos mediante la experimentación práctica, apoyándose en principios de aprendizaje constructivista (Negahban, 2024), e incorpora la capacidad de simular escenarios avanzados alineados con las redes inteligentes (Smart Grids) y la normativa vigente, como el RETIE y la norma IEEE 1584 (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2004).

El objetivo principal es proporcionar una herramienta eficaz que contribuya a cerrar la brecha formativa en ingeniería eléctrica, permitiendo a estudiantes y profesionales analizar el comportamiento de las redes de distribución en un entorno virtual seguro y representativo. El artículo se organiza en metodología (Sección II), fundamentación del desarrollo (Sección III), resultados (Sección IV) y conclusiones (Sección V).

II. Metodología

La metodología se estructuró en dos fases complementarias. La primera consistió en un análisis bibliográfico sistemático y comparativo de las plataformas de simulación existentes, evaluando su efectividad, limitaciones, costos y características (De-Jesús-Grullón *et al.*, 2024; Ringkjøb *et al.*, 2018), lo que permitió identificar las brechas críticas —en particular la complejidad de uso y la elevada especialización técnica— que dificultan la formación de nuevos ingenieros (Bottaccioli *et al.*, 2018). Esta revisión aportó el fundamento teórico del diseño, confirmando la importancia de interfaces interactivas

y accesibles (Jain *et al.*, 2020; Kolari & Savander-Ranne, 2004).

La segunda fase se concentró en el diseño y la implementación de la plataforma, con un enfoque centrado en el usuario. Para materializar visualmente los componentes de la red y superar la abstracción de los diagramas unifilares, se empleó modelado y renderizado 3D con el software Blender, con el que se creó una biblioteca de activos digitales optimizados (transformadores, postes, líneas) (Antoncic *et al.*, 2019). El desarrollo siguió una metodología ágil de iteraciones rápidas. Para la validación se planearon pruebas de rendimiento cuantitativas y una evaluación de efectividad educativa.

Se aclara que, en la etapa reportada en este artículo, la plataforma alcanzó el nivel de prototipo funcional con su biblioteca de modelos y escenarios; las pruebas de rendimiento y la validación educativa quedan planeadas como trabajo futuro.

III. Fundamentación del desarrollo

La efectividad de estas herramientas no radica únicamente en su capacidad de cálculo, sino en integrar el rigor de la ingeniería eléctrica con interfaces que promuevan la experimentación activa y la exploración autónoma (Jain *et al.*, 2020). La visualización interactiva de fenómenos técnicos mejora la comprensión de conceptos abstractos (Kolari & Savander-Ranne, 2004): la representación gráfica de líneas, campos eléctricos y flujos de potencia facilita una comprensión intuitiva que los métodos basados en ecuaciones o diagramas unifilares no logran con la misma eficacia. El éxito de una herramienta educativa depende, así, del equilibrio entre precisión técnica y accesibilidad pedagógica (Kolari & Savander-Ranne, 2004).

Este enfoque se alinea con la teoría del aprendizaje constructivista, según la cual el conocimiento se construye activamente mediante la experiencia y la resolución de problemas (Serafín *et al.*, 2015). Una plataforma de simulación permite al estudiante manipular variables, cometer errores sin riesgo y recibir retroalimentación inmediata; este ciclo de acción-observación-reflexión es esencial para una comprensión profunda de los principios que gobiernan las redes de distribución.

Desde la ingeniería eléctrica, el núcleo funcional es la simulación de redes: replicar su comportamiento en un entorno virtual para analizar el rendimiento bajo diversas condiciones (Antoncic *et al.*, 2019), modelando los componentes fundamentales y principios como el flujo de potencia (Olauson *et al.*, 2020). La utilidad aumenta cuando las simulaciones son interactivas y en tiempo real (Quirós-Tortós *et al.*, 2017). La evolución hacia sistemas descentralizados y sostenibles exige incorporar modelos de generación distribuida y evaluar el comportamiento de redes inteligentes (Lazarou *et al.*, 2013), fundamentales para la transición energética. Complementariamente, la eficiencia energética emerge como criterio indispensable (Martínez-Velasco & Guerra, 2016), al permitir cuantificar y visualizar las pérdidas técnicas de distintas configuraciones.

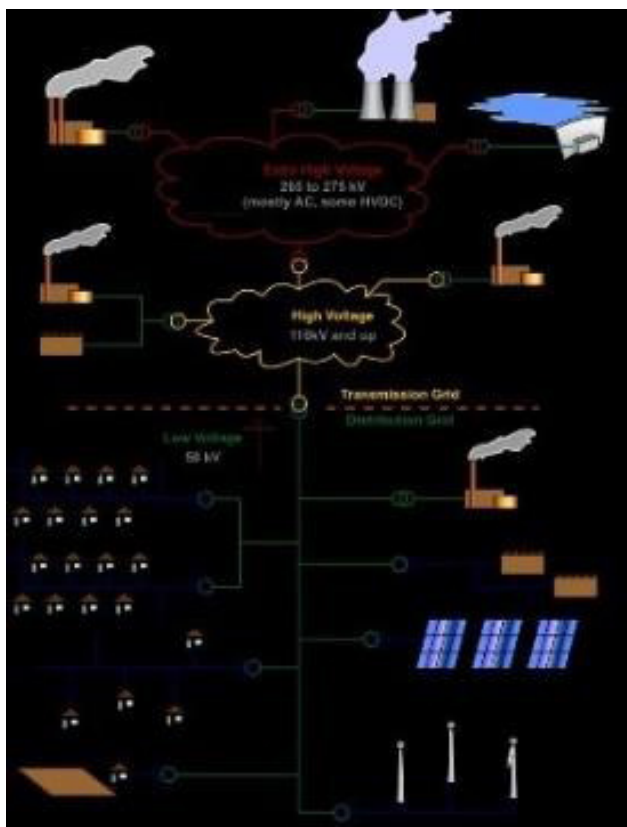
La plataforma está destinada principalmente a estudiantes de ingeniería eléctrica de la UNIMETA, un contexto donde la accesibilidad y la pertinencia local son

prioritarias, por lo que debe operar en la infraestructura de los laboratorios universitarios y ofrecer una curva de aprendizaje suave. Para educar en prácticas profesionales rigurosas, el desarrollo se alineó con marcos normativos como el RETIE y la norma IEEE 1584 para el análisis de cortocircuitos (IEEE, 2018), asegurando que los modelos reflejen estándares técnicos y de seguridad reconocidos.

IV. Resultados

El principal resultado es la materialización de una plataforma interactiva para la simulación de redes de distribución que integra criterios técnicos, pedagógicos y normativos. La arquitectura conceptual del sistema eléctrico simulado (Fig. 1) sintetiza la relación funcional entre generación, transmisión, distribución y consumo, e identifica los flujos de energía desde fuentes centralizadas y distribuidas hasta las cargas finales.

Figura 1. Arquitectura conceptual del sistema eléctrico simulado.



Fuente: elaboración propia.

La representación conceptual de las tipologías de generación (Fig. 2) incluye fuentes convencionales y renovables, lo que refleja la capacidad de la plataforma para diferenciar múltiples tecnologías, fundamental para el análisis de escenarios de transición energética.

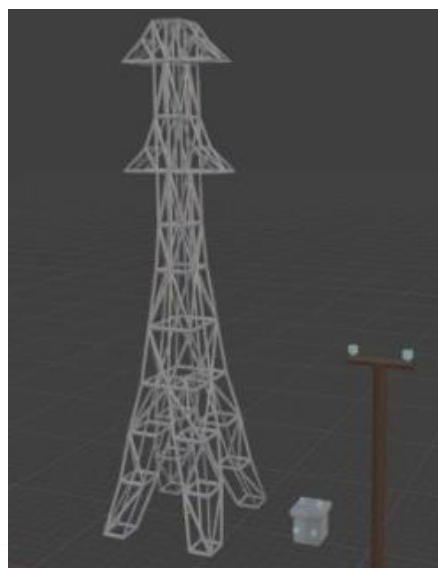
Figura 2. Representación conceptual de fuentes de generación eléctrica.



Fuente: elaboración propia.

El modelo tridimensional de infraestructura de transmisión (Fig. 3) evidencia la viabilidad de representar elementos estructurales complejos —torres y postes— mediante geometría simplificada que mantiene la reconocibilidad técnica sin comprometer el rendimiento computacional.

Fig. 3. Modelo tridimensional de infraestructura de transmisión eléctrica.



Fuente: elaboración propia.

La capacidad de incorporar generación distribuida se evidencia en el modelo de un aerogenerador integrado al entorno de red (Fig. 4), que permite explorar escenarios propios de las redes inteligentes, como la inyección local de potencia y su influencia en la estabilidad del sistema.

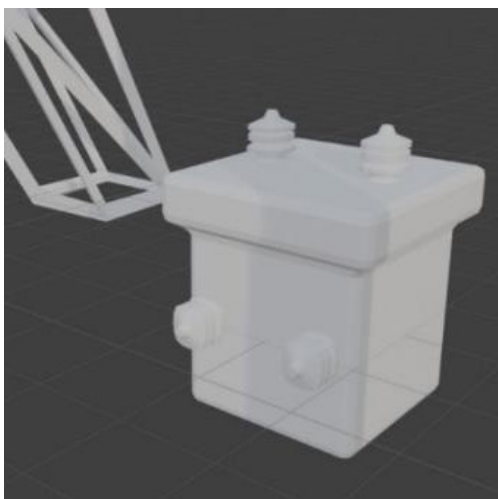
Figura 4. Modelo tridimensional de aerogenerador integrado a la red.



Fuente: elaboración propia.

El modelo del transformador de distribución (Fig. 5), componente crítico para la reducción de tensión, ilustra la biblioteca de activos digitales, con un nivel de detalle suficiente para el reconocimiento técnico y una geometría optimizada para la interacción en tiempo real.

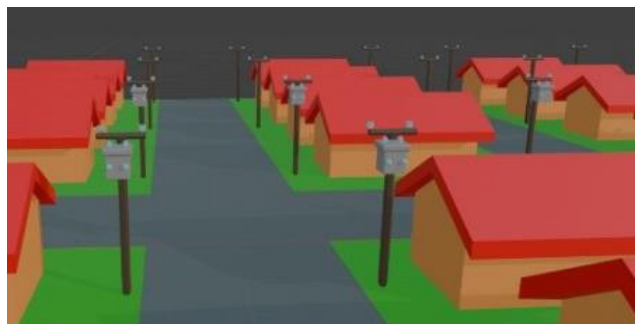
Figura 5. Modelo tridimensional de transformador de distribución.



Fuente: elaboración propia.

La integración de los componentes en un entorno funcional se evidencia en el escenario urbano de red de distribución residencial a nivel de calle (Fig. 6), que articula viviendas, postes, transformadores y trazado vial, demostrando que la plataforma trasciende el modelado aislado y ofrece un entorno integral para analizar configuraciones reales de baja tensión.

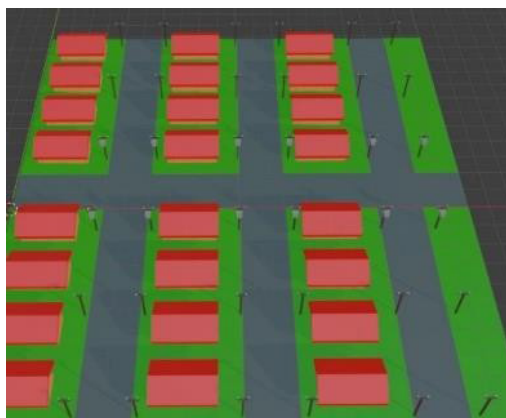
Figura 6. Escenario urbano simulado de red de distribución residencial.



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la vista superior de un escenario urbano de mayor densidad (Fig. 7) evidencia la capacidad de escalar la simulación a configuraciones más complejas y facilita la comprensión global de la topología de la red, complementando las vistas a nivel de calle.

Figura 7. Escenario urbano simulado de red de distribución.



Fuente: elaboración propia.

En conjunto, los resultados demuestran que la plataforma ofrece una representación visual clara, técnica y pedagógicamente efectiva de las redes de distribución. La progresión desde esquemas conceptuales hasta escenarios urbanos integrados evidencia un desarrollo coherente, alineado con los principios constructivistas y con los requerimientos técnicos del sector, y sienta las bases para su validación educativa y su ampliación futura.

V. Conclusiones

El desarrollo de la plataforma interactiva evidencia su potencial como herramienta para apoyar la enseñanza y el aprendizaje en ingeniería eléctrica. La investigación

permitió identificar de manera sistemática las principales limitaciones de las plataformas de simulación disponibles —altos costos, complejidad operativa y barreras de accesibilidad—, diagnóstico que fundamentó el diseño de una solución más asequible, intuitiva y alineada con las necesidades pedagógicas del contexto académico.

El diseño logró integrar una interfaz intuitiva con funciones de visualización y simulación que facilitan la interacción activa del usuario y favorecen la comprensión del comportamiento de las redes de distribución. Esta combinación de accesibilidad, claridad visual y coherencia técnica posiciona la herramienta como una alternativa viable frente a las soluciones existentes.

Como líneas de trabajo futuras se plantean las pruebas de rendimiento cuantitativas del prototipo y una validación educativa con estudiantes —con grupos de comparación e instrumentos de medición del aprendizaje— que permita cuantificar el aporte real de la plataforma, así como la incorporación de análisis cuantitativos de flujo de potencia y de pérdidas técnicas.

Tipo de artículo

Artículo de investigación.

Procedencia

Producto de investigación del programa de Ingeniería, UNIMETA.

Financiación

Sin financiación externa.

Referencias

- Antončić, M., Mikec, M., & Blažič, B. (2019). Development of distribution network model in OpenDSS using MATLAB and GIS data. En *7th International Youth Conference on Energy (IYCE)* (pp. 1–6).
- Bottaccioli, L., Patti, E., Macii, E., & Acquaviva, A. (2018). GIS-based software infrastructure to model PV generation in fine-grained spatio-temporal domain. *IEEE Systems Journal*, 12(3), 2832–2841.
- De-Jesús-Grullón, R. E., et al. (2024). Modeling and simulation of distribution networks with high renewable penetration in open-source software: QGIS and OpenDSS. *Energies*, 17(12), Artículo 2925.
- Flavin, C., & Lenssen, N. (1994). Powering the future toward a sustainable electricity industry. *Solar Today*, 8(5), 26–28.
- González, R., et al. (2017). OpenDSS-based distribution network analyzer in open source GIS environment. En *IEEE PES T&D Conference & Exposition Latin America* (pp. 1–5).
- Hariri, A., Newaz, A., & Faruque, M. O. (2017). Open-source Python–OpenDSS interface for hybrid simulation of PV impact studies. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(12), 3125–3133.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE]. (2018). *IEEE guide for performing arc-flash hazard calculations* (IEEE Std 1584-2018).
- Jain, A. K., et al. (2020). Dynamic hosting capacity analysis for distributed photovoltaic resources: Framework and case study. *Applied Energy*, 280, Artículo 115633.
- Kolari, S., & Savander-Ranne, C. (2004). Visualisation promotes apprehension and comprehension. *International Journal of Engineering Education*, 20(3), 484–493.
- Lazarou, S., Vita, V., Karampelas, P., & Ekonomou, L. (2013). A power system simulation platform for planning and evaluating distributed generation systems based on GIS. *Energy Systems*, 4(3), 379–391.
- Macmillan, M., et al. (2023). Shedding light on the economic costs of long-duration power outages: A review. *Energy Research & Social Science*, 99, Artículo 103055.
- Martínez-Velasco, J., & Guerra, G. (2016). Reliability analysis of distribution systems with photovoltaic generation using a power flow simulator and a parallel Monte Carlo approach. *Energies*, 9(7), Artículo 537.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2004). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)* (Resolución n.º 180398 de 2004).
- Negahban, A. (2024). Simulation in engineering education: The transition from physical experimentation to digital immersive simulated environments. *SIMULATION*, 100(7), 695–708.
- Olauson, J., Marin, M., & Söder, L. (2020). Creating power system network layouts: A fast parallel algorithm. *IEEE Systems Journal*, 14(3), 3687–3694.
- Prakash, K., Lallu, A., Islam, F. R., & Mamun, K. A. (2016). Review of power system distribution network architecture. En *3rd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering* (pp. 1–5).
- Quirós-Tortós, J., et al. (2017). Geo-information is power: Using GIS to assess rooftop photovoltaics in Costa Rica. *IEEE Power & Energy Magazine*, 15(4), 48–56.
- Ringkjøb, H.-K., Haugan, P., & Solbrekke, I. (2018). A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 440–459.
- ScienceDirect Topics. (2018). Energy distribution systems: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96.
- Serafín, Č., Dostál, J., & Havelka, M. (2015). Inquiry-based instruction in the context of constructivism. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 186, 592–599.