

Estrategia metodológica para la localización eficiente de sistemas alternativos de energía en microrredes aisladas

Methodological strategy for the efficient location of alternative energy systems in off grid microgrids

Recibido: 25 de enero 2025

Aprobado: 28 de mayo de 2025

publicación: 1 de septiembre de 2025

Forma de citar: M. D. Villamizar-Jaimes, L. D. Pabón-Fernández, E. A. Caicedo-Peñaranda y O. J. Suárez-Sierra, "Estrategia metodológica para la localización eficiente de sistemas alternativos de energía en microrredes aisladas," Revista Mundo FESC, vol. 15, no. 33, pp. 27-43, 2025. DOI: 10.61799/2216-0388.1970

Maria Daniela Villamiza jaimes



Ingeniero Eléctrico,
maria.villamizar8@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0009-0000-9721-5320>,
Universidad de Pamplona,
Pamplona, Colombia.

Luis David Pabón Fernández



Magister en Controles Industriales,
davidpabon@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0003-1788-4781>,
Universidad de Pamplona,
Pamplona, Colombia.

Edison Andrés Caicedo Peñaranda



Magister en Controles Industriales,
edison.caicedo@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0003-4557-1061>,
Universidad de Pamplona,
Pamplona, Colombia.

Oscar Javier Suarez Sierra



Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica,
oscar.suarez@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0002-6754-5713>,
Universidad de Pamplona,
Pamplona, Colombia.

***Autor para correspondencia:**

E-mail: maria.villamizar8@unipamplona.edu.co



Estrategia metodológica para la localización eficiente de sistemas alternativos de energía en microrredes aisladas

Palabras clave: análisis de flujo de carga, generación fotovoltaica, microrred aislada, ubicación eficiente.

Resumen

En microrredes aisladas, la ubicación inadecuada de los sistemas de generación fotovoltaica puede ocasionar desequilibrios en la regulación de tensión, incremento en las pérdidas de potencia y bajo aprovechamiento de los recursos renovables. Esta situación limita la eficiencia energética y la estabilidad operativa del sistema. Este artículo presenta una estrategia metodológica para determinar la ubicación de sistemas fotovoltaicos en una microrred aislada, a partir de un análisis de flujo de carga y el estudio de diversos escenarios de operación. La metodología abordó criterios técnicos como la regulación de tensión como elemento principal de selección al igual que las pérdidas de potencia y los perfiles de voltaje como parámetros de validación. Esta estrategia se aplica a un estudio de caso de una microrred compuesta por un nodo principal que integra un sistema de almacenamiento en baterías, una fuente fotovoltaica fija, y cinco nodos dispuestos en una topología radial, cada uno asociado a cargas residenciales monofásicas. El objetivo es incluir generación fotovoltaica adicional en dos puntos más de la microrred. Los resultados obtenidos al aplicar la metodología muestran que los nodos uno y cinco son las ubicaciones más adecuadas para incorporar los sistemas de generación fotovoltaica adicional, debido a que la configuración reduce las pérdidas de energía, mejora el perfil de tensión en los nodos y mantiene una regulación estable en las líneas.

Methodological strategy for the efficient location of alternative energy systems in off grid microgrids

Abstract

In isolated microgrids, the inappropriate placement of photovoltaic generation systems can lead to voltage regulation imbalances, increased power losses, and underutilization of renewable resources. This situation limits the system's energy efficiency and operational stability. This article presents a methodological approach for determining the optimal placement of photovoltaic systems in an isolated microgrid, based on load flow analysis and the evaluation of various operating scenarios. The methodology addresses technical criteria, such as voltage regulation as the primary selection criterion, and power losses and voltage profiles as validation parameters. This strategy is applied to a case study of a microgrid composed of a main node integrating a battery storage system, a fixed photovoltaic array, and five nodes arranged in a radial topology, each associated with single phase residential loads. The objective is to include additional photovoltaic generation at two more points within the microgrid. The results obtained by applying the methodology show that nodes one and five are the most suitable locations for additional photovoltaic generation systems, as the configuration reduces energy losses, improves the voltage profile at the nodes, and maintains stable regulation on the lines.

Keywords: efficient location, isolated microgrid, load flow analysis, photovoltaic generation.

Introducción

Las microrredes aisladas constituyen sistemas eléctricos autónomos que integran generación distribuida, almacenamiento de energía y cargas locales dentro de una topología de distribución generalmente radial [1], [2]. Desde la perspectiva del análisis de sistemas de potencia, la operación de las microrredes aisladas está condicionada por la ubicación y el nivel de penetración de las fuentes renovables, particularmente de la generación fotovoltaica, cuya inyección de potencia modifica los flujos de corriente y las tensiones nodales a lo largo de la red [3].

La instalación de sistemas de energía solar en lugares inadecuados dentro de la microrred puede generar desviaciones significativas en relación con el funcionamiento previsto del sistema [4], [5]. En las redes radiales, la inyección de potencia activa en nodos intermedios o distantes del nodo principal modifica la distribución de las corrientes, lo que afecta de manera directa el rendimiento eléctrico general [6], [7]. Estas variaciones están muy ligadas a la impedancia de las líneas y a la ubicación de las cargas. Por lo tanto, colocar la generación distribuida en sitios inadecuados puede desestabilizar el sistema [8], [9].

En este sentido, el flujo de carga se considera una herramienta analítica clave para estudiar el comportamiento de microrredes aisladas bajo diferentes condiciones de operación [10], [11]. Es posible evaluar el efecto de la generación fotovoltaica sobre las tensiones nodales y las corrientes de línea, así como identificar configuraciones que permitan un funcionamiento más eficiente del sistema [12], [13].

En redes eléctricas con generación distribuida, el flujo de potencia proporciona una base cuantitativa para comparar alternativas de diseño y operación [14]. Bajo este enfoque, el presente artículo propone una estrategia metodológica para la ubicación de sistemas fotovoltaicos en una microrred aislada de topología radial, basada en la evaluación de múltiples escenarios operativos mediante estudios de flujo de carga.

Una microrred en modo aislado puede describirse como una infraestructura eléctrica que integra recursos de generación distribuida con sistemas de almacenamiento energético, típicamente baterías, y diversos tipos de cargas eléctricas [15], [16], [17]. Su característica principal es la operación autónoma, independiente de la red eléctrica convencional, condición que las convierte en una solución técnica especialmente adecuada para el suministro de energía en regiones rurales o geográficamente apartadas [18], [19].

La Figura 1, representa una microrred aislada basada en generación fotovoltaica, para el suministro eléctrico local sin interconexión a una red de potencia convencional. La estructura del sistema se basa en varios nodos de consumo residenciales. Algunos hogares tienen generación distribuida que utiliza paneles solares y en ocasiones sistemas de baterías para almacenar energía. Sin embargo, hay usuarios que no cuentan con

generación propia, los cuales pueden recibir energía a través de flujos de otras viviendas que tienen excedentes, estableciendo así un modelo de intercambio de energía a nivel local.

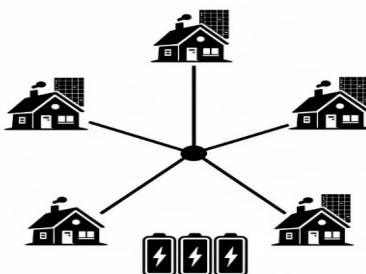


Figura 1. Microrred aislada basada en generación fotovoltaica y almacenamiento de energía.

Este artículo plantea una estrategia metodológica para determinar la ubicación eficiente de generación fotovoltaica en microrredes aisladas, integrando criterios técnicos de regulación de tensión y desempeño eléctrico dentro de un esquema de análisis por escenarios.

Materiales y métodos

Un estudio comparable llevado a cabo por [20], presenta un enfoque que facilita la identificación de fuentes y el almacenamiento de energía, además del diseño de la red de distribución en un área que no está conectada a una red mayor. El enfoque propuesto emplea programación entera no lineal, la cual se resuelve usando algoritmos como la optimización por enjambre de partículas de tipo cuántico y algoritmos genéticos en Matlab. Los hallazgos indican los lugares de generación de energía fotovoltaica que ofrecen la mejor solución disponible.

Los autores citados en [21], realizan un modelo de programación lineal entera mixta para determinar la ubicación y el tamaño de generadores solares distribuidos en una microrred pequeña que opera de manera aislada. Se llevó a cabo una prueba del modelo de 14 nodos, utilizando datos reales sobre la estructura, el consumo y la generación. Los hallazgos indican el lugar más adecuado para instalar los generadores fotovoltaicos y su capacidad ideal, además de la mejora en el perfil de voltaje y la reducción de pérdidas energéticas.

La metodología propuesta en este estudio de caso se estructura como un proceso secuencial e iterativo, que permite evaluar el desempeño del sistema de distribución, considerando distintos escenarios operativos y criterios técnicos previamente definidos. La metodología parte de una definición explícita del problema asociado a los límites de tensión, la cargabilidad de líneas y la evaluación de las pérdidas, como indicadores de desempeño para definir la ubicación más apropiada de la generación fotovoltaica dentro de la microrred.

En la fase inicial se realiza la recopilación de las características del sistema, la topología de la red, los parámetros eléctricos de líneas y transformadores, características de las cargas y parámetros de los arreglos fotovoltaicos. Una vez establecidos los parámetros del sistema, se implementa el modelo eléctrico en un software especializado para la simulación de redes de potencia, permitiendo analizar el comportamiento de la red de distribución en ausencia de nuevas unidades de generación fotovoltaica.

De esta manera, se establece un escenario base con la información general de la microrred, en el cual se realizarán las simulaciones indicadas para evaluar los diferentes escenarios de ubicación de las fuentes de generación fotovoltaica. Seguidamente, el usuario define el número de fuentes de generación a ubicar en la microrred, con esto se plantean los escenarios de configuración N+1 pertinentes, manteniendo fijos los parámetros eléctricos del modelo base. Esta etapa busca que la valoración del efecto de la generación adicional se lleve a cabo bajo criterios uniformes y replicables.

La estrategia propuesta busca analizar todas las posibles combinaciones de generación alternativa adicional, estableciendo los escenarios operativos para cada combinación. En cada escenario se realiza la evaluación del flujo de carga buscando la configuración más eficiente en cuanto a la regulación de tensión presente en cada tramo de las líneas de distribución. Mediante el análisis comparativo de los resultados de las regulaciones de tensión de los diferentes escenarios, se determina la configuración que muestra el mejor desempeño general de la microrred, asegurando los límites operativos y el cumplimiento de los perfiles de tensión, cargabilidad y pérdidas de energía.

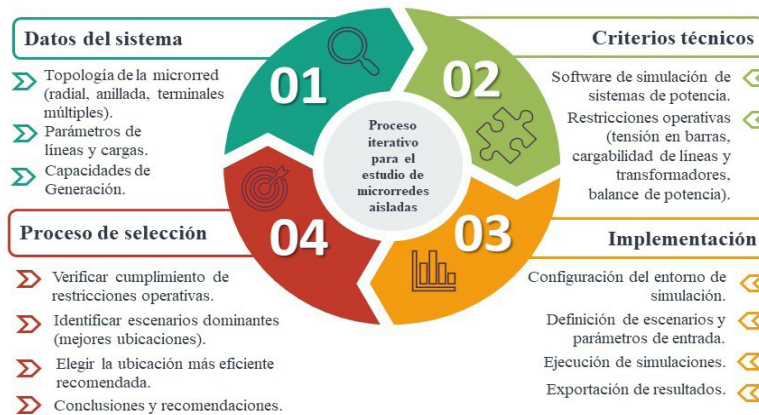


Figura 2. Estrategia metodológica reproducible para el estudio de microrredes aisladas.

En la primera fase, se parametrizan los datos del sistema, que incluyen la topología y los parámetros eléctricos de las líneas, las cargas y la generación, los cuales forman las entradas para el análisis. Luego, se establecen los criterios técnicos, como el software de simulación y las limitaciones operativas que aseguran una operación segura. En la tercera fase, se lleva a cabo la implementación, se registra la configuración de los escenarios, y la exportación de los resultados, lo que permite que el proceso se ejecute en

circunstancias similares. Por último, la fase de selección compila los resultados y permite realizar una comparación objetiva de las configuraciones analizadas, identificando la ubicación más eficiente.

Diagrama de flujo

La Figura 3, presenta el diagrama de flujo de la estrategia metodológica propuesta, en donde se describen los pasos secuenciales. Como se puede observar, el primer paso es la selección de la microrred a utilizar, en donde se establecen los puntos de carga a tener en cuenta y la disposición de la topología física de la misma.

Seguidamente, se caracterizan desde el punto de vista eléctrico todas las variables a tener en cuenta, como líneas, cargas, transformadores, etc. A partir de esta información, se modela en un software especializado la topología de la microrred, empleando una herramienta de simulación que permita realizar análisis de flujo de carga. De esta manera se ejecuta la simulación del caso base, correspondiente a la operación de la microrred sin la generación fotovoltaica adicional. Se genera el reporte de variables eléctricas, tales como la regulación de tensión, la cargabilidad de las líneas y las pérdidas de potencia, que servirán como referencia para las comparaciones posteriores.

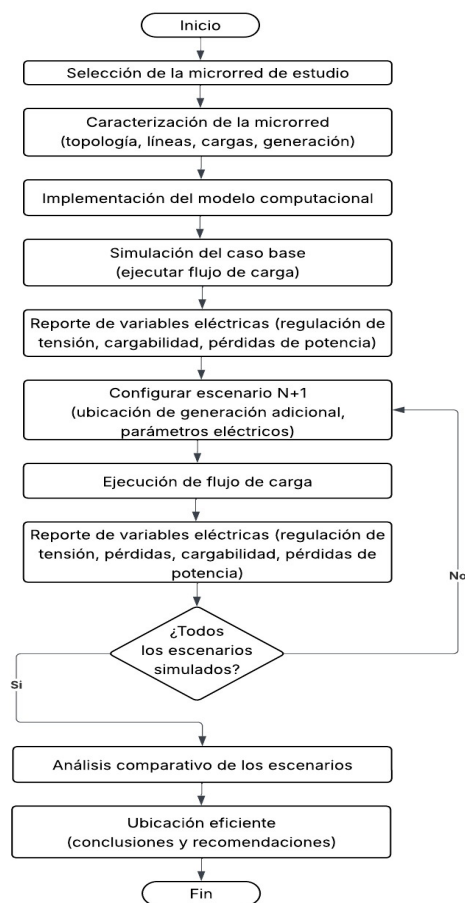


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología propuesta

Después de esto y con la indicación del número de fuentes de generación fotovoltaica a añadir, se configuran todos los escenarios de fuentes de generación adicional en una ubicación específica de la microrred, definiendo sus parámetros eléctricos y de operación. Para cada escenario planteado, se ejecuta nuevamente el flujo de carga y se elabora un reporte actualizado de las variables eléctricas.

Este procedimiento se repite de manera iterativa para las diferentes ubicaciones y configuraciones de generación, hasta verificar si todos los escenarios han sido simulados. Una vez completadas todas las simulaciones, se realiza un análisis comparativo de los escenarios, en el cual se comparan los parámetros de regulación de tensión, perfil de tensión, la cargabilidad de las líneas y el perfil de pérdidas de energía. Finalmente, a partir de este análisis, se determina la ubicación más eficiente de la generación adicional, formulando las conclusiones y recomendaciones correspondientes para la operación y planificación de la microrred.

Estudio de caso

Como ejemplo de aplicación de la estrategia propuesta, se presenta una microrred compuesta por un nodo principal como se evidencia en la Figura 4, en el cual se integran un sistema de almacenamiento de energía en baterías y una fuente de generación fotovoltaica fija, operando a un nivel de tensión de 660V en corriente alterna. Este nodo actúa como punto central de generación y almacenamiento del sistema.

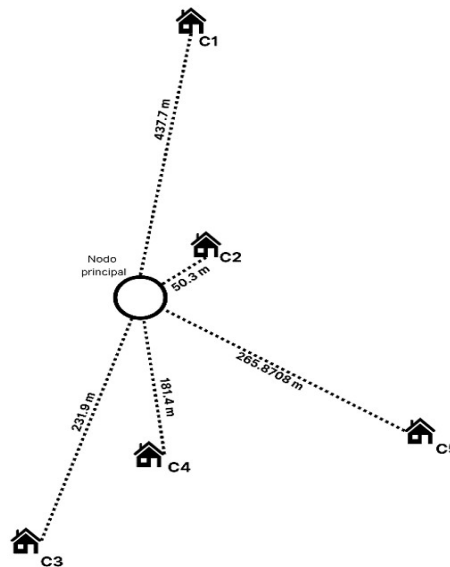


Figura 4. Topología de la microrred.

Adicionalmente, la microrred cuenta con cinco nodos radiales conectados al nodo principal mediante un sistema de líneas de distribución que opera a 660V, las cuales permiten la transferencia de energía hacia los puntos de consumo. Cada nodo radial incorpora un transformador reductor monofásico de 5kVA, encargado de disminuir el nivel de tensión de 660V a 127V, con el fin de alimentar cargas residenciales monofásicas.

Caracterización de la microrred

Los nodos radiales representan los puntos de conexión de las cargas residenciales monofásicas. Las líneas de distribución se caracterizan por la definición de sus parámetros eléctricos, incluyendo la longitud, la tensión nominal de operación y la resistencia. La Tabla I, muestra las características eléctricas de los conductores utilizados en las líneas, teniendo en cuenta el calibre mínimo para redes de distribución.

Tabla I. Parámetros eléctricos de las líneas.

Calibre AWG	Tensión nominal (V)	Corriente nominal (A)	Resistencia AC 20°C (Ω/km)	Reactancia X' (Ω/km)
2	1143,154	185	0,829	0,381

Las cargas representan perfiles de consumo típicos de viviendas rurales. Para su modelado se especifican los valores de potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia, considerando un esquema de conexión fase–neutro (FN).

En el nodo principal, se integra una fuente de generación fotovoltaica, con una potencia activa de 2800W correspondiente a 4 paneles solares de 700W pico. En la Tabla II, se observan los parámetros eléctricos de los paneles solares.

Tabla II. Parámetros eléctricos del arreglo fotovoltaico.

Potencia nominal (W)	Voltaje nominal (V)	Corriente nominal (A)	Voltaje de circuito abierto (V)	Corriente de corto circuito (A)
700	40,5	17,29	48,3	18,27

El sistema de almacenamiento en baterías se modela mediante una máquina síncrona equivalente, con el propósito de representar el comportamiento dinámico del convertidor bidireccional y permitir la definición de una barra de referencia en el estudio de flujo de carga. Bajo este enfoque, el sistema garantiza el balance de potencia activa y reactiva de la microrred cuando opera de manera independiente.

Implementación en modelo computacional

El diseño de la microrred se lleva a cabo empleando el programa DIgSILENT PowerFactory, que facilita la representación precisa de la disposición física y eléctrica de la microrred en estudio. La Figura 5, muestra el modelo eléctrico de la microrred en condiciones iniciales.

Inicialmente, se lleva a cabo la simulación de la microrred teniendo en cuenta únicamente la generación solar fija situada en el nodo central, sin añadir generación distribuida extra en los nodos radiales. Se realiza el modelo y simulación de los escenarios operativos utilizando un criterio N+1, teniendo en cuenta que el objetivo es la adición de dos puntos extra de generación solar en nodos radiales de la microrred.

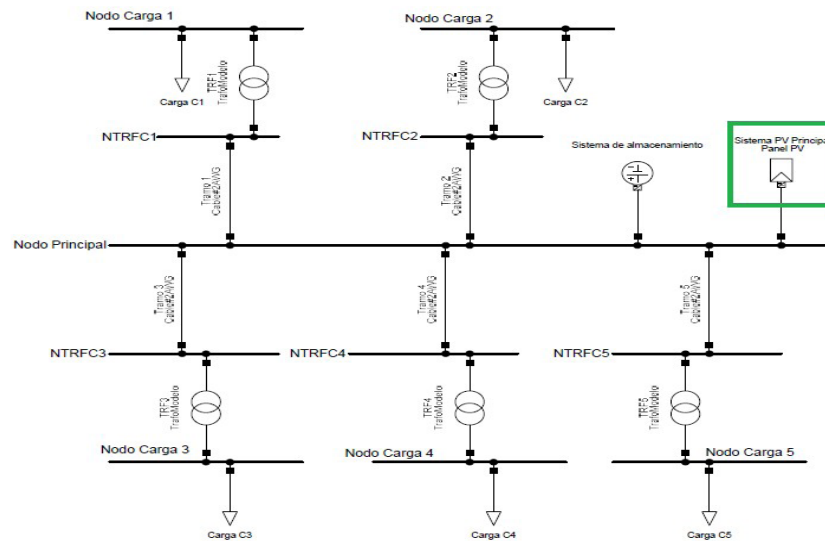


Figura 5. Modelo eléctrico de la microrred en condiciones iniciales.

Cada uno de estos escenarios representa una distribución diferente de la generación solar en los nodos de consumo, lo que permite examinar cómo su localización influye en el comportamiento eléctrico del sistema. Adicionalmente, se ejecuta el estudio de flujo de carga para cada disposición evaluando las variables eléctricas más relevantes de la microrred. En la Figura 6, se muestra la disposición que pertenece al Escenario 1, donde se sitúa la generación solar adicional en los nodos radiales de carga C1 y C2.

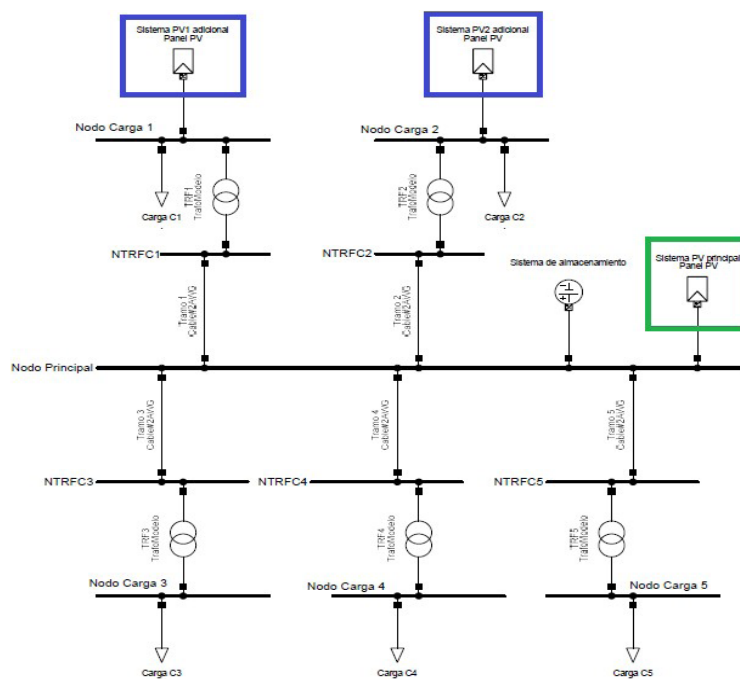


Figura 6. Topología de la microrred para el Escenario 1.

Se evalúan todas las combinaciones posibles para la ubicación de dos puntos adicionales

de generación fotovoltaica, en los cinco nodos radiales de la microrred, lo que da lugar a un total de diez escenarios de simulación. La definición de cada escenario se realiza considerando una capacidad fotovoltaica previamente establecida, la cual se distribuye de manera equitativa entre los nodos seleccionados en cada configuración de generación adicional.

Una vez modelados los distintos escenarios de operación, se ejecutan los estudios de flujo de carga correspondientes, incorporando en cada caso los puntos de generación fotovoltaica en los nodos radiales definidos. A partir de estas simulaciones se obtienen y analizan las principales variables eléctricas de la microrred.

Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis de flujo de carga, los cuales muestran el comportamiento de las variables eléctricas esenciales en el estudio.

Regulación de tensión

En la Figura 7, se muestra la caída de tensión porcentual correspondiente a cada uno de los escenarios analizados, asociada a los distintos tramos de línea que conectan los nodos radiales. Este análisis permite evaluar el desempeño del perfil de tensión en función del nivel de carga y de las características propias de cada línea de distribución, particularmente su longitud.

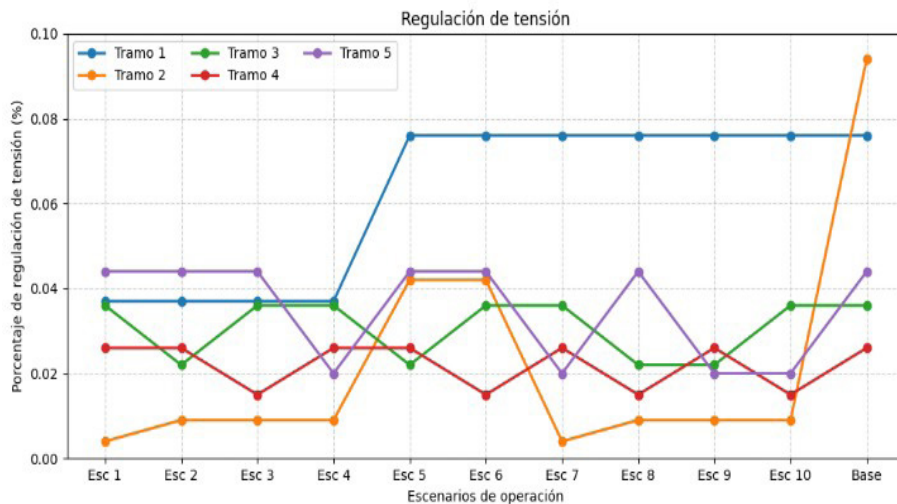


Figura 7. Resultados de la regulación de tensión de la microrred.

A partir del análisis de los resultados mostrados en la Figura 7, correspondientes a los diez escenarios de operación, incluido el escenario base, en los diferentes tramos de la red, se determinó que el escenario 4 presenta la menor regulación de tensión entre los casos considerados. La Figura 8 muestra la configuración del escenario 4.

Este comportamiento indica que dicha configuración es la alternativa más favorable, en cuanto a la regulación de tensión, para la ubicación de los dos sistemas de generación fotovoltaica, cada uno conformado por dos paneles solares, los cuales se localizan en los nodos de carga C1 y C5.

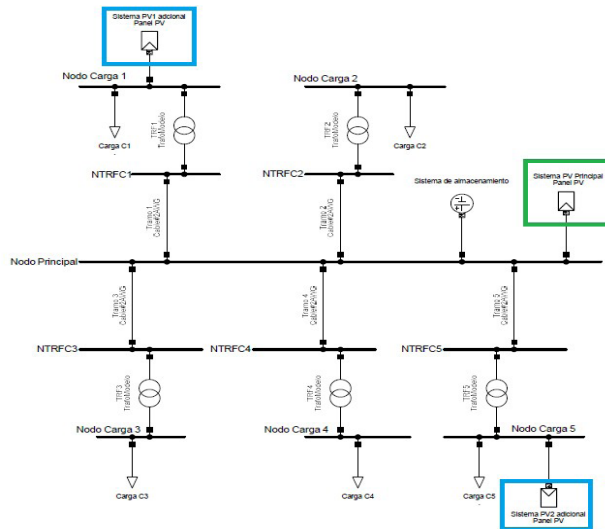


Figura 8. Escenario 4.

Una vez identificado la configuración óptima, se realiza un flujo de carga en dicho escenario para analizar otras variables clave como la cargabilidad de las líneas, las pérdidas de potencia y el perfil en las líneas de distribución. En la Figura 9, se observa la topología de la microrred con los puntos de generación adicional, ubicándose en las zonas de consumo C1 y C5.

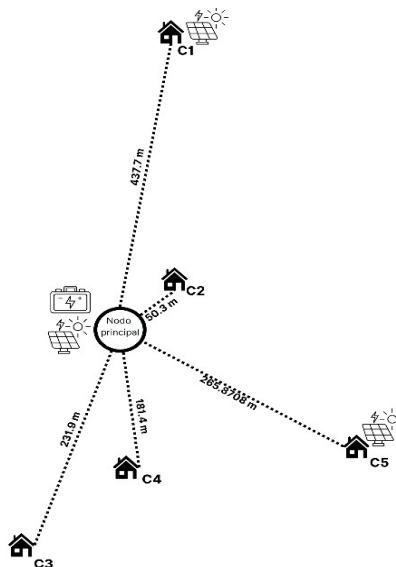


Figura 9. Estructura de la microrred con fuentes de generación adicionales.

Perfil de tensión en los nodos del escenario 4

Los resultados del perfil de tensión se muestran en la Figura 10, la variación máxima es del 0.0727% con respecto a los 660V nominales, lo que evidencia una dispersión mínima entre los valores nodales, indicando un funcionamiento estable y equilibrado del sistema, el cual opera dentro de los límites admisibles de tensión.

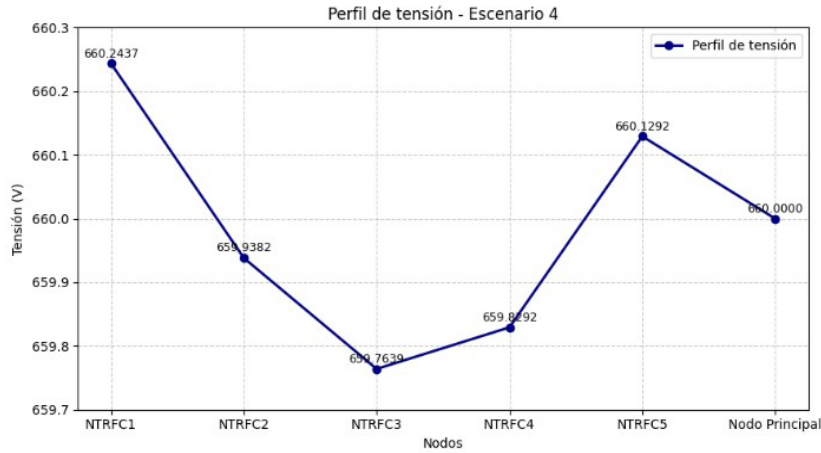


Figura 10. Perfil de tensión en los nodos para el escenario 4.

Perfil de cargabilidad en las líneas de distribución del escenario 4

La Figura 11, se muestra el perfil de cargabilidad correspondiente a cada tramo de la red, donde se evidencia una variación del 0.365%, lo que indica que las líneas de distribución operan en condiciones equilibradas, presentando una dispersión moderada respecto a los niveles de carga.

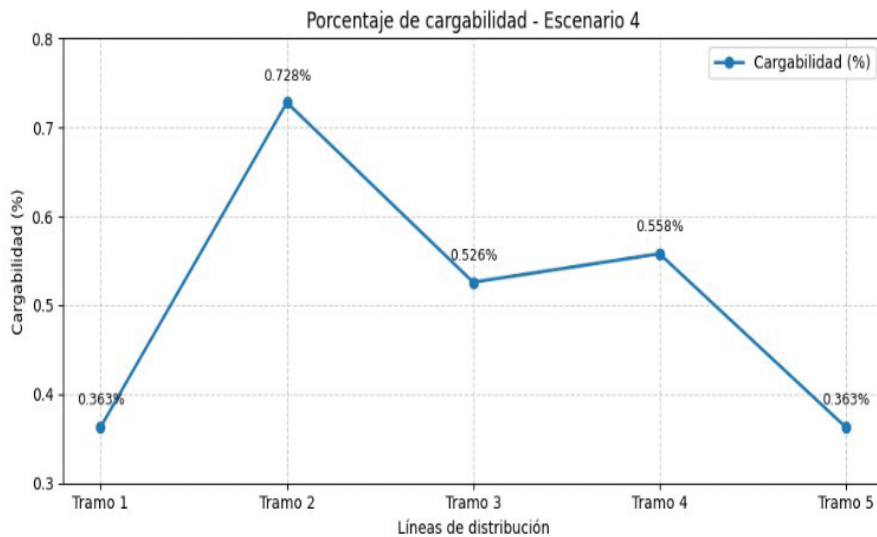


Figura 11. Perfil de cargabilidades en las líneas de distribución para el escenario 4.

Perfil de pérdidas de energía en las líneas de distribución del escenario 4

Las pérdidas de energía en las líneas de distribución constituyen un indicador fundamental de la eficiencia y la calidad del suministro eléctrico. Dichas pérdidas dependen de diversos factores, entre los que se destacan la longitud de las líneas, el nivel de carga conectada y la configuración del sistema. En la Figura 12, se presenta el perfil de pérdidas de energía en los distintos tramos de la red, se observa que el tramo 3 registra las mayores magnitudes, esto se debe a su longitud de 231.9m y a la ausencia de generación distribuida en dicho tramo.

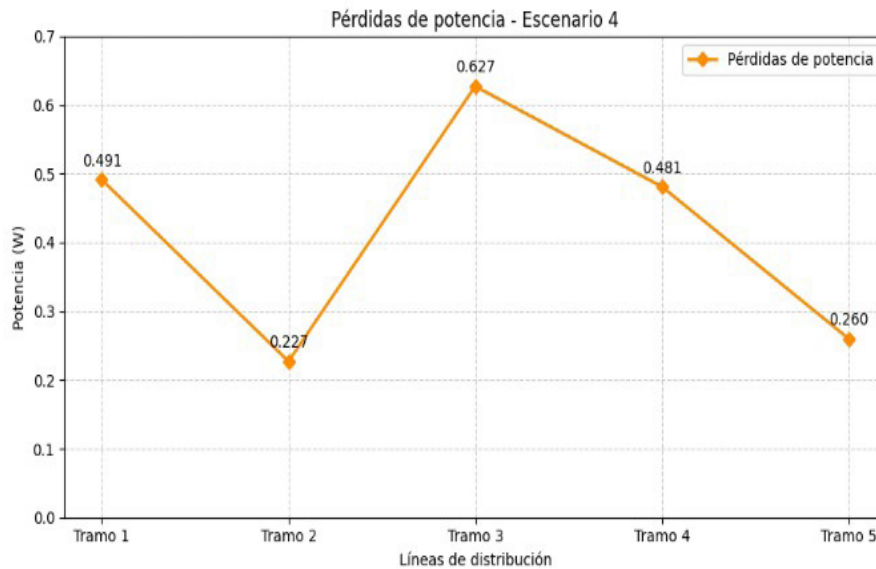


Figura 12. Perfil de pérdidas de potencia en las líneas de distribución para el escenario 4.

Por otro lado, se observa que el tramo 2 presenta las pérdidas más bajas, esto se debe a que es la línea con menor longitud, con una distancia de 50.3m. Como se puede ver en los perfiles de tensión, cargabilidad y pérdidas, el escenario con mejor regulación de voltaje, presenta buenos indicadores en las variables de operación. Esto muestra que la estrategia metodológica basada en la selección del mejor perfil de regulación es una buena opción a la hora de proponer configuraciones de microrredes con múltiples fuentes de generación.

Conclusiones

La metodología facilita la identificación de la disposición de generación fotovoltaica más eficiente, considerando las regulaciones de tensión como criterio principal. El perfil de tensión, la capacidad de las líneas y las pérdidas de energía, validan el comportamiento adecuado de la microrred. En el caso particular del estudio mostrado, el escenario 4 ofrece el mejor rendimiento. En esta disposición, las fuentes de energía solar se distribuyen en las áreas de consumo C1 y C5, lo que favorece una mejor distribución de la energía.

La utilización de una herramienta especializada permite la ejecución de estudios

de flujo de carga para los diferentes escenarios de operación, facilitando el análisis de variables eléctricas. Esta aproximación permite respaldar técnicamente la toma de decisiones en el diseño y planificación de microrredes aisladas.

La estrategia metodológica desarrollada es un aporte significativo para el diseño, análisis y optimización de microrredes independientes con integración de generación solar, contribuyendo a la aplicación en otras microrredes con características similares.

El análisis de flujo de carga es una herramienta clave para entender y anticipar cómo se comportan eléctricamente las microrredes aisladas frente a la inclusión de recursos energéticos distribuidos. Su uso facilita una evaluación organizada de la inyección de potencia en diferentes puntos de la red, permitiendo reconocer posibles anomalías y ayuda a comparar diversas situaciones operativas bajo criterios técnicos.

Como trabajos futuros, se plantea expandir la metodología creada en este estudio mediante la adición de nuevos criterios de evaluación, que abarquen aspectos técnicos y económicos aplicables al estudio de microrredes, así como la integración de diferentes fuentes de generación. En el aspecto técnico, se propone añadir métricas de confiabilidad y medidas relacionadas con la calidad eléctrica, como la distorsión armónica y las fluctuaciones de voltaje y frecuencia. Desde el ámbito económico, se consideran factores como el costo de inversión, el costo nivelado de energía y los costos vinculados a la operación y mantenimiento. También se plantea analizar distintas configuraciones topológicas, incluyendo diseños radiales, en anillo y en malla.

Adicionalmente, se plantea profundizar métodos de optimización e inteligencia computacional para ayudar en la toma de decisiones relacionadas con la ubicación de sistemas de generación. Esto incluye la implementación de algoritmos genéticos, algoritmos genéticos que incorporan búsqueda de patrones, y estrategias fundamentadas en inteligencia artificial. Estas técnicas permiten enfrentar la complejidad no lineal y multiobjetivo del problema planteado, lo que facilita la identificación de configuraciones óptimas bajo las limitaciones técnicas, operativas y económicas que caracterizan a las microrredes.

Referencias

- [1] M. Ahmed, L. Meegahapola, A. Vahidnia y M. Datta, "Stability and Control Aspects of Microgrid Architectures–A Comprehensive Review", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 144730-144766, 2020. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3014977>
- [2] R. Elazab, A. Abdelnaby y A. Ali, "Impacts of multiple demand-side management strategies on microgrids planning: a literature survey", *Clean Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 36–54, enero de 2024. <https://doi.org/10.1093/ce/zkad057>
- [3] P. Mehta, P. Bhatt y V. Pandya, "Optimal selection of distributed generating units and its placement for voltage stability enhancement and energy loss minimization", *Ain Shams*

Engineering Journal, vol. 9, no. 2, pp. 187–201, junio de 2018. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.10.009>

[4] M. Abujubbeh, M. Fahrioglu y F. Al-Turjman, "Power loss reduction and voltage enhancement via distributed photovoltaic generation: Case study in North Cyprus", *Computers and Electrical Engineering*, vol. 95, pp. 107432, octubre de 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107432>

[5] W. Haider, S. Hassan, A. Mehdi, A. Hussain, G. Adjayeng y C. Kim, "Voltage Profile Enhancement and Loss Minimization Using Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation in Reconfigured Network", *Machines*, vol. 9, no. 1, pp. 20, enero de 2021. <https://doi.org/10.3390/machines9010020>

[6] S. Aleem, S. Hussain y T. Ustun, "A Review of Strategies to Increase PV Penetration Level in Smart Grids", *Energies*, vol. 13, no. 3, pp. 636, febrero de 2020. <https://doi.org/10.3390/en13030636>

[7] C. Sarimuthu, V. Ramachandaramurthy, H. Mokhlis y K. Agileswari, "Impact of Distributed Generation on Voltage Profile in Radial Feeder", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 6, no. 3, pp. 583, junio de 2017. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v6.i3.pp583-590>

[8] M. Ettehadi, H. Ghasemi y S. Vaez-Zadeh, "Voltage Stability-Based DG Placement in Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 171–178, enero de 2013. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2012.2214241>

[9] I. Salam, M. Yousif, M. Numan, K. Zeb y M. Billah, "Optimizing Distributed Generation Placement and Sizing in Distribution Systems: A Multi-Objective Analysis of Power Losses, Reliability, and Operational Constraints", *Energies*, vol. 16, no. 16, pp. 5907, agosto de 2023. <https://doi.org/10.3390/en16165907>

[10] A. Esmaeli, M. Abedini y M. Moradi, "A novel power flow analysis in an islanded renewable microgrid", *Renewable Energy*, vol. 96, pp. 914–927, octubre de 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.077>

[11] S. Kori et al., "Load flow analysis of rural islanded hybrid microgrid," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 14, no. 4, abril de 2025. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18107128>

[12] A. Gawlak y M. Kornatka, "Analysis of the Impact of Photovoltaic Generation on the Level of Energy Losses in a Low-Voltage Network", *Energies*, vol. 17, no. 23, pp. 5957, noviembre de 2024. <https://doi.org/10.3390/en17235957>

- [13] A. Hida, O. Karapici, R. Buhaljoti y D. Gashi, "Impact of Photovoltaic Penetration on the Distribution System Operation. Case Study Albania", *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 1–10, junio de 2025. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d13.0548>
- [14] M. Abbasi, E. Abbasi, L. Li, R. Aguilera, D. Lu y F. Wang, "Review on the Microgrid Concept, Structures, Components, Communication Systems, and Control Methods", *Energies*, vol. 16, no. 1, pp. 484, enero de 2023. <https://doi.org/10.3390/en16010484>
- [15] M. Jahromi, E. Yaghoubi y E. Yaghoubi, "Optimal generation and distribution planning in smart microgrids under conditions of multi-microgrid disconnection using a hierarchical control strategy", *Electrical Engineering*, marzo de 2025. <https://doi.org/10.1007/s00202-025-03036-4>
- [16] M. Maghami, J. Pasupuleti y C. Ling, "Impact of Photovoltaic Penetration on Medium Voltage Distribution Network", *Sustainability*, vol. 15, no. 7, pp. 5613, marzo de 2023. <https://doi.org/10.3390/su15075613>
- [17] R. Zahira, D. Lakshmi, G. Ezhilarasi, P. Sivaraman, C. Ravi y C. Sharmeela, "Stand-alone microgrid concept for rural electrification: A review," *Residential Microgrids and Rural Electrifications*, pp. 109-130, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90177-2.00013-X>
- [18] E. Khatun, M. Hossain, M. Ali y M. Halim, "A Review on Microgrids for Remote Areas Electrification-Technical and Economical Perspective", *International Journal of Robot and Control Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 627–642, septiembre de 2023. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v3i4.985>
- [19] A. Arango y R. Álvarez, "Microrredes: nuevo paradigma en las redes eléctricas", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, no. 22, pp. 42–48, 2013. <https://doi.org/10.24054/rcta.v2i22.1924>
- [20] P. Acevedo, C. Camacho, G. Osma y R. Rodríguez, "Localization of Energy Sources and Distribution System Sizing in a Low Voltage Isolated Microgrid", *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies*, Porto, Portugal, 2019, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/SEST.2019.8848993>
- [21] J. Jiménez, J. Cardona y S. Carvajal, "Location and optimal sizing of photovoltaic sources in an isolated mini-grid", *TecnoLógicas*, vol. 22, no. 44, pp. 61–80, enero de 2019. <https://doi.org/10.22430/22565337.1182>