

Retos de la planificación energética de micro-redes en regiones rurales remotas con cargas dispersas

Energy planning challenges of microgrid in remote rural regions with scattered loads

R. Rodríguez¹, G. Osma², G. Ordóñez³

¹ GISEL, Universidad Industrial de Santander, Colombia. rusber.rodriguez@correo.uis.edu.co

² GISEL, Universidad Industrial de Santander, Colombia. gealosma@uis.edu.co

³ GISEL, Universidad Industrial de Santander, Colombia. gaby@uis.edu.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

RESUMEN

En general, las soluciones de energización para regiones rurales remotas se basan en grupos electrógenos, lo cual acarrea un alto costo financiero y ambiental por el uso de combustibles fósiles. No obstante, tales soluciones podrían incorporar fuentes de energía renovable, almacenamiento y gestión de energía, convirtiéndolas en micro-redes (MG). La implementación de MG en regiones rurales remotas enfrenta retos como la energización de viviendas dispersas y la distribución de fuentes de energía. A fin de explorar la viabilidad de energizar regiones remotas con MG, este documento expone aspectos técnicos sobre la planificación de MG en dichas regiones centrándose en el dimensionamiento de los sistemas de abastecimiento energético y el diseño de la red eléctrica de distribución. Se presenta una revisión de estrategias de planificación energética y se propone la adaptación e integración de algunas técnicas para la planificación energética de MG aisladas con demanda y generación dispersas.

PALABRAS CLAVE: Cargas dispersas, Energías renovables, Micro-redes remotas, Planificación energética, Regiones rurales, Sistema de distribución.

ABSTRACT

In general, energizing solutions for remote rural regions are based on generating sets; this brings a high financial and environmental cost by using fossil fuels. However, such solutions might incorporate renewable energy sources, storage and energy management, becoming them into microgrids (MG). The implementation of MG in rural remote regions confronts challenges such as the energization of scattered loads and the distribution of energy sources. In order to explore the feasibility of energizing remote regions with MG, this research sets out technical aspects about MG planning in these regions, focusing on the sizing of energy supply systems and the electrical distribution grid design. A review of energy planning strategies is presented and it is proposed an adaptation and integration of some techniques for energy planning of isolated MG with Scattered demand and generation.

KEYWORDS: Distribution system, Energy planning, Remote microgrid, Renewable energies, Rural regions, Scattered loads.

1. INTRODUCCIÓN

Según Hatziargyriou [1], una micro-red (MG) se puede definir como una red eléctrica formada a partir de

recursos energéticos distribuidos y sistemas de almacenamiento con el fin de satisfacer cargas locales. Tiene la capacidad de controlar el flujo de potencia activa

y reactiva, permitiendo una relación estrecha entre generación y demanda.

Algunas de las ventajas que ofrece una MG son la eficiencia energética, la reducción de las emisiones de gases contaminantes y la posibilidad de operar en modo interconectado o aislado de una red eléctrica convencional u otra MG [2], [3].

Dada la capacidad de operación autónoma (*off-grid*) de las MG, algunas investigaciones ([3]–[8]) consideran a éstas como una alternativa para satisfacer los requerimientos energéticos de poblaciones rurales.

En general, las poblaciones rurales no interconectadas tienden a estar conformadas por un conjunto de viviendas apartadas entre sí. Esto conlleva a considerar un sistema de distribución con fuentes dispersas de generación, a fin de disminuir las pérdidas por transmisión de potencia [5]. Los sistemas diseñados para atender estas demandas son llamados MG remotas o sistemas híbridos [3], [9]–[12]; también pueden ser denominados micro-redes con demanda dispersa o SLMG (*Scattered Load Microgrid*). La Figura 1 presenta el diagrama de una SLMG que describe la dispersión tanto de cargas como de las fuentes de generación, las cuales están interconectadas por un sistema de distribución.

El uso de fuentes de energía renovables (RES) puede favorecer el desempeño de las SLMG, ya que permite el aprovechamiento de recursos energéticos locales. No obstante, se requiere de una etapa de planificación energética y topológica debido a la dispersión de la demanda y la generación, y a las múltiples opciones de interconexión entre los componentes de la SLMG. Tal

planificación debe estar orientada a garantizar una operación continua, de calidad y de bajo costo [5].

La planificación energética de una MG consiste en la aplicación de un conjunto de estrategias orientadas al dimensionamiento y operación del sistema eléctrico, de forma que se suplan los requerimientos de energía y se reduzcan los costos de implementación, operación y mantenimiento y el impacto negativo sobre el medio ambiente [3], [13].

Tal planificación se enfoca al dimensionamiento de los recursos energéticos y diseño de la red eléctrica de distribución; asimismo, involucra la definición de una estrategia de despacho de energía, la cual puede ser modelada como un problema de optimización [5].

Con base en la revisión de la literatura, se aprecia la carencia de estudios sobre la planificación energética de SLMG. Por tal razón, este documento expone diversos retos de las SLMG de cara a apoyar el desarrollo de soluciones energéticas más efectivas en las zonas rurales. Tales retos fueron identificados a partir de la revisión del estado del arte de estrategias de planificación energética de micro-redes remotas híbridas. Se enfatiza en la selección y dimensionamiento de las fuentes de energía, la arquitectura del sistema de distribución y el despacho de las fuentes de energía.

La Sección 2 de este documento describe estrategias de planificación energética; la Sección 3 presenta la función de costo para la planificación de SLMG; la Sección 4 aborda la temática de viabilidad de SLMG para la energización de regiones remotas; y finalmente, la Sección 5 presenta las conclusiones del trabajo.

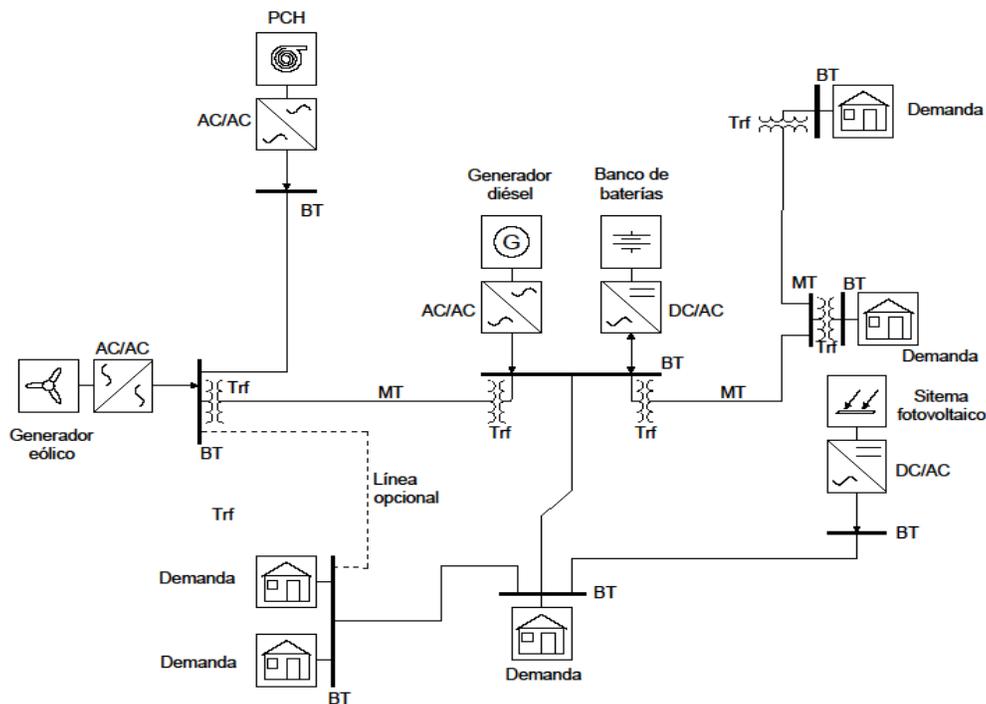


Figura 1. Posible diagrama de una MG diseñada para una región rural remota con cargas dispersas. **Fuente.** Elaboración propia.

2. PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA DE MICRO-REDES Y ZONAS RURALES

La planificación energética de una MG busca garantizar el balance de energía tal que la energía generada sea igual a la energía demandada y el costo global de la MG sea minimizado. Dicho costo incluye la adquisición de componentes, la instalación, la operación, el mantenimiento y puede incluir el impacto al medio ambiente.

Se han empleado diversos algoritmos en el proceso de planificación de MGs, tales como programación entera mixta [14], programación cuadrática [15], relajación lagrangiana [16], algoritmos genéticos [10], [17]–[20], predicción basada en el conocimiento [21], enjambre de partículas PSO [5], [22] y enjambre de partículas de comportamiento cuántico QPSO [23], entre otros.

Este trabajo aborda la planificación energética de MG no interconectadas, las cuales son una potencial solución para la energización de zonas rurales [8]. A continuación se describen las principales diferencias en la planificación energética de MG aisladas con cargas concentradas y cargas dispersas.

2.1. Micro-redes aisladas con cargas concentradas

Los trabajos sobre la planificación de MG en operación aislada (ej. [14]–[16], [24]–[26]) usualmente consideran cargas concentradas o grandes asentamientos de viviendas. Por ende, estas investigaciones no son aplicables directamente al caso de zonas con demanda dispersa, debido a que las cargas dispersas demandan un sistema de distribución con líneas de BT entre 50 m y 300 m, y, en algunos casos, transformadores de potencia, redes de MT y múltiples nodos de conexión; lo que conlleva a pérdidas significativas de energía eléctrica en las líneas.

Además, las cargas concentradas facilitan la localización del sistema de respaldo como generadores diésel y el sistema de almacenamiento de energía cerca de las cargas principales [15], [27].

La planificación energética de MGs aisladas con cargas concentradas (o CLMG) se destaca por considerar el sistema de respaldo y de almacenamiento de energía como criterio de confiabilidad y referencia y omitir las pérdidas por transmisión de energía eléctrica.

No obstante, la planificación de SLMG debe considerar las pérdidas por transmisión de energía, la localización de las fuentes de energía y las interconexiones entre fuentes [10].

En general, se puede apreciar que algunas características de las redes convencionales, MG interconectadas y CLMG son comunes a las SLMG, por lo que tal similitud puede aprovecharse para definir estrategias de planificación energética.

Tales características comunes son: (i) la integración de fuentes de energías renovables y (ii) la optimización de recursos energéticos y el sistema de redes de distribución, transformadores de potencia y redes de BT y MT respecto a las redes convencionales.

La integración y adaptación de estas estrategias de planificación es un desafío que, de ser resuelto, facilitaría la optimización del dimensionamiento y localización de los generadores de energía y la arquitectura del sistema de distribución.

La Tabla 1 lista los principales criterios de la planificación energética de MGs e indica el grado de consideración (baja, media o alta) para cada tipo de MG. El grado de consideración ha sido categorizado de acuerdo a la relevancia que se ha dado a los criterios en las funciones de costo según la literatura consultada.

Tabla 1. Principales criterios en la planificación energética de MG.

Criterio	Consideración		
	MG interconectada	CLMG	SLMG
Disponibilidad de recursos	Alta	Alta	Alta
Dimensionamiento de la fuentes de energías renovables	Alta	Alta	Alta
Confiabilidad de suministro	Alta	Alta	Alta
Medio ambiente	Media	Alta	Alta
Localización de las fuentes de energía	Baja	Media	Alta
Pérdidas por transmisión de energía	Baja	Baja	Alta
Dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía	Media	Alta	Alta
Dimensionamiento del sistema de respaldo	Baja	Alta	Alta
Arquitectura del sistema de distribución	Baja	Baja	Alta

Fuente. Elaboración propia.

2.2. Planificación energética en zonas rurales

Desde la década de los 90s, se han realizado estudios enfocados en optimizar la operación de redes eléctricas en zonas rurales. Así por ejemplo, Joshi *et al.* (1992) [28] emplearon un modelo de programación lineal para minimizar la función de costo de un sistema de suministro de energía en un sector residencial a partir de un *mix* (mezcla) de fuentes energéticas.

Por su parte, Sinha *et al.* (1994) [29] analizaron los aspectos conceptuales y metodológicos de la planificación energética rural. Su diseño tuvo como propósito satisfacer requerimientos productivos para la subsistencia y mejoramiento de la calidad de vida.

Singh *et al.* (1996) [30] desarrollaron un modelo de planificación energética usando la técnica de programación multi-objetivo para pequeñas, medianas y grandes granjas. Este modelo plantea cinco objetivos, minimizar la entrada de energía, maximizar los retornos brutos, minimizar el capital de préstamos y minimizar el

riesgo de disponibilidad de recursos energéticos. Por otra parte Nahman y Spiri (1997) [31], presentaron un modelo para la planificación de redes de distribución rurales de media tensión.

A partir del año 2000, se han desarrollado investigaciones con el enfoque de MG en regiones remotas, que brindan la posibilidad de encontrar escenarios de mayor rendimiento, por el desarrollo de sistemas para la gestión energética y estrategias de despacho que garanticen la estabilidad de la MG.

Así pues, Agalgaonkar *et al.* (2005) [24] presentaron un algoritmo (*Economic Analyzer for Distributed Energy Resources - EADER*) que permite encontrar el costo mínimo de operación y optimizar la selección del mix energético.

Katiraei y Abbey (2007) [25] analizaron la integración de un sistema eólico-diésel empleando como caso de estudio una comunidad aislada de Canadá y cuya finalidad fue optimizar el dimensionamiento de las fuentes de energía y garantizar la estabilidad del sistema.

Por otra parte, Muñoz (2012) [4] presentó una propuesta metodológica de planificación energética para MG aisladas, la cual integra estrategias de optimización energética de MG y está dirigido a zonas no interconectadas. A su vez, Brocco (2013) [7] propuso un sistema de fuentes de energía renovables con reconfiguración, que permite controlar los flujos de potencia a través de las líneas de distribución. Otro trabajo fue el desarrollado por Xie *et al.* (2015), quienes emplearon QPSO para optimizar la capacidad de almacenamiento de un sistema híbrido con banco de baterías y super condensadores.

Por otra parte, Sanchez *et al.* (2015) [8] expusieron algunas tecnologías de energía renovable que han mostrado ser una opción conveniente y económica en comunidades aisladas, especialmente en la región del Amazonas.

Con base en los planteamientos y hallazgos de estas investigaciones, se cree que es posible adaptar las funciones objetivo, incluyendo el costo por pérdidas y criterios propios de las SLMG, para llevar a cabo la planificación energética.

Se aprecia que los criterios fundamentales para la planificación de MG aisladas son el dimensionamiento y programación de operación del sistema de almacenamiento (e.g. bancos de baterías) y la arquitectura del sistema de distribución. Este último incluye el nivel de tensión y la interconexión entre fuentes de energías y cargas.

Los hallazgos de Guo *et al.* [32] evidencian que la integración de etapas como la planificación de los recursos de energía distribuida y la planificación de la topología de la red de distribución ofrece mejores resultados en cuanto a costo de operación y rendimiento que estos mismos procesos de forma separada. Para el caso de las SLMG es fundamental optimizar

simultáneamente el dimensionamiento de las fuentes de energía y la topología de la red de distribución.

3. FUNCIÓN DE COSTO

El objetivo principal de la planificación de una MG es minimizar el costo financiero total garantizando un correcto funcionamiento del sistema eléctrico. Por tal razón, la función objetivo en la planificación energética de una SLMG es la función de costo, la cual debe incluir estratégicamente el costo asociado a las pérdidas de energía.

El costo financiero total de una MG (C_{total}) incluye la inversión inicial o el costo de adquisición (C_{acq}) y los costos de operación y de mantenimiento ($C_{o\&m}$) [32]–[35]. Algunas investigaciones ([32], [35], [36]) incluyen costos asociados al impacto medioambiental (C_{ev}) y a las pérdidas de energía (C_{loss}).

El impacto ambiental puede ser evaluado como una penalización por la emisión de gases contaminantes y como un saldo a favor por el empleo de energías renovables. Las penalizaciones y subsidios dependen de la normativa vigente del país donde se implemente la MG. Por otra parte, el costo asociado a las pérdidas de energía se evalúa mediante una penalización al establecer un límite máximo de pérdidas en potencia $P_{loss,max}$ y pérdidas en energía $E_{loss,max}$. La ecuación (1) muestra la función del costo financiero total.

$$C_{total} = C_{acq} + C_{o\&m} + C_{ev} + C_{loss} \quad (1)$$

4. DISCUSIÓN

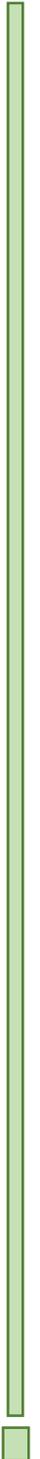
Esta sección aborda las oportunidades y retos respecto a las SLMG que se han identificado en la literatura consultada. La implementación de SLMG se refiere a zonas remotas no electrificadas en regiones rurales donde la posibilidad de interconexión con una red eléctrica principal es casi nula.

Las oportunidades se centran en los beneficios que pueden ofrecer las SLMG a las comunidades rurales y al medio ambiente y los retos en la viabilidad económica. Se considera la planificación energética como factor principal para realizar el análisis económico.

4.1. Oportunidades

Los sistemas fotovoltaicos tienen mayor potencial de penetración en las regiones remotas debido principalmente a la disponibilidad de energía solar. De igual manera, los generadores eólicos y las pequeñas centrales hidráulicas han tenido gran participación en este tipo de soluciones.

La selección de las tecnologías de generación se debe hacer de acuerdo al potencial energético de cada región y debe tener procedimientos de implementación y



transporte eficientes a la zona, así como una alta aceptación por la comunidad involucrada.

Uno de los beneficios que ofrece una MG es el aprovechamiento de los recursos energéticos naturales. Algunos países como Colombia cuentan con un potencial energético (solar, eólico [37], hidráulico [38] y de biomasa residual [39]) satisfactorio para el empleo de fuentes de energía renovables.

La implementación de SLMG permitiría aprovechar el potencial energético de una región a partir de diversas fuentes de energía primaria, garantizando el suministro de energía la mayor parte del tiempo y mejorando la calidad de vida de los habitantes, en condiciones de bajo costo, siempre y cuando exista un diseño optimizado de la SLMG.

Desde el punto de vista medioambiental, el uso de energías renovables aporta a la disminución de emisiones contaminantes. Complementariamente, en algunos países existen políticas que favorecen económicamente los proyectos de generación de energía a partir de fuentes renovables, lo cual representa una oportunidad para la implementación de SLMG.

De manera general, la implementación de SLMG está enfocada a solucionar problemas de energización en regiones remotas de forma colectiva y a la conservación del medio ambiente y se aprecian mejores prestaciones respecto a las soluciones convencionales.

4.2. Retos

La elaboración de diseños optimizados es un reto para la implementación de SLMG. Ahora, dado que el diseño aborda diversos aspectos técnicos, la discusión se centra en la planificación energética a fin determinar la viabilidad financiera de la SLMG respecto a las soluciones convencionales.

Por tratarse de una SLMG, las viviendas (cargas) se distancian entre sí considerablemente (entre 20 m a 300 m), por lo que debe considerarse un sistema de distribución de energía de igual manera optimizado. Asimismo, algunas regiones remotas tienen limitaciones en las rutas de transporte e ingreso, lo que encarece la puesta de componentes en el lugar de la implantación.

Así pues, es necesario formular un problema de optimización del menor costo financiero y una estrategia de planificación que integre factores de diseño claves de una SLMG. Típicamente, la planificación energética determina los sistemas de generación a ser implementados y la capacidad nominal de los mismos. Sin embargo, en la planificación de una SLMG, las pérdidas de energía se relacionan con la interconexión entre componentes y la disposición del sistema de

distribución, ya que pueden existir líneas de distribución extensas e interconexiones ineficientes entre fuentes de energía y cargas. Esto afectaría el dimensionamiento de las fuentes de energía dado que éstas deberán aportar la energía perdida.

Por otro lado, se evidenció la carencia de información en la literatura sobre la localización de las fuentes de energía distribuida dentro de una MG.

Un análisis de localización se realiza generalmente cuando la MG ya está implementada y tiene nodos de conexión definidos y se desea adicionar una fuente de generación o de almacenamiento de energía [40]. Este análisis de localización consiste en conectar iterativamente la nueva fuente de energía en los nodos preexistentes y seleccionar como resultado la opción que cumpla con las restricciones de funcionamiento establecidas y represente el menor costo financiero.

Aunque la ubicación de las fuentes de energía no se relacionan directamente con la función de costo, repercute en el dimensionamiento de los componentes, en la arquitectura del sistema de distribución y en las pérdidas de energía [41].

En la planificación de SLMG los nodos de conexión inicialmente definidos son las viviendas a ser energizadas, y los demás nodos de conexión se definen por la localización de las fuentes de energía.

Por otra parte, la dispersión de las viviendas origina un número elevado de posibilidades para la ubicación de los equipos de generación. A fin de lograr una planificación energética coordinada de SLMG, se recomienda aplicar diversas estrategias para la localización de cada fuente de energía, para luego combinar los resultados obtenidos y seleccionar la combinación óptima.

Si se toman como referencia los resultados de la localización, se parte de un conjunto de combinaciones de nodos de conexión para el dimensionamiento de los sistemas de generación y la arquitectura de la SLMG. Así, para cada combinación de localizaciones existe un conjunto de posibles arquitecturas de la SLMG similares a la presentada en la Figura 1, y por cada posible arquitectura existe un conjunto de posibilidades de dimensionamiento de los sistemas de generación.

Por otro lado, es necesario incluir una estrategia de despacho que satisfaga los requerimientos de la demanda y las pérdidas de energía. Dicha estrategia generalmente comprende el aprovechamiento de la máxima potencia de las fuentes intermitentes (sistemas fotovoltaicos y eólicos) y el balance de potencia por medio de las fuentes controlables (banco de baterías, PCH y generador diésel). La Figura 2 representa la integración de estrategias de planificación energética propuesta en esta sección.

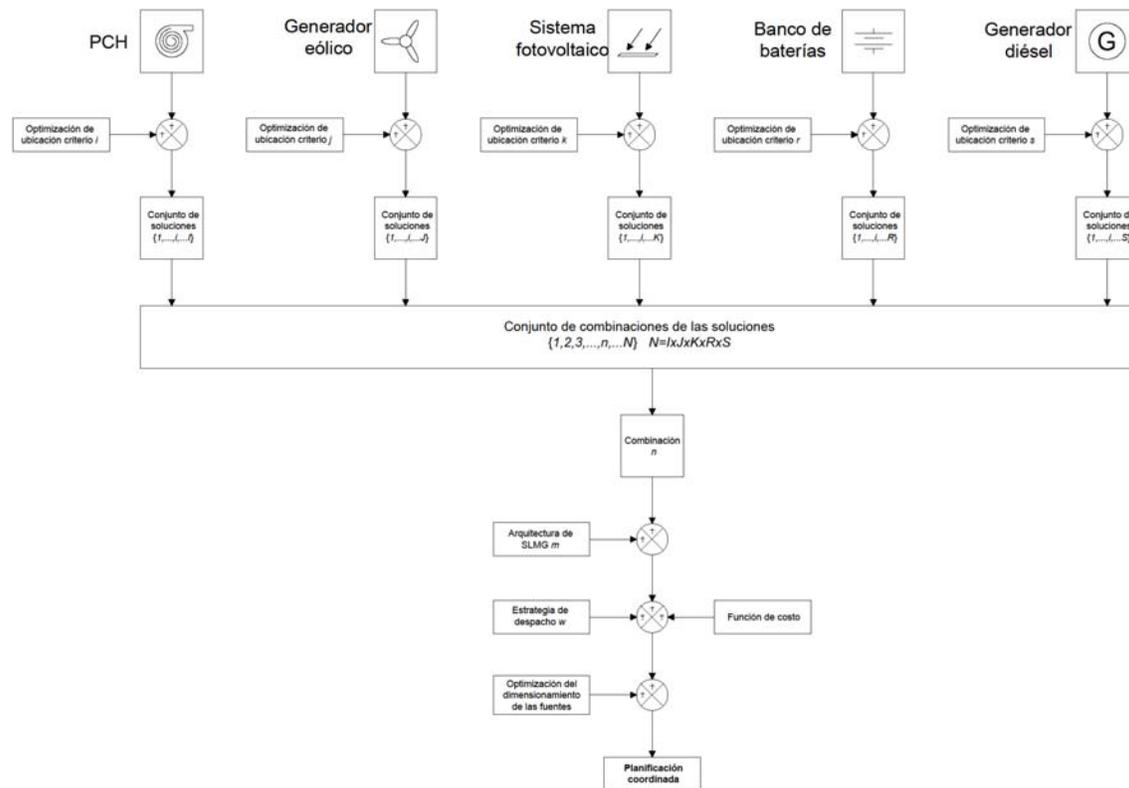


Figura 2. Integración de las etapas de planificación energética para una SLMG. **Fuente.** Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

La viabilidad de la implementación de una solución de energización para una zona remota depende de un análisis financiero que muestre la sostenibilidad del proyecto durante la vida útil del mismo.

La implementación de una MG ha mostrado ser viable en prototipos, aplicaciones industriales y en algunas zonas rurales; sin embargo, presenta barreras de importancia como la dispersión de cargas y el requerimiento de un sistema de distribución con líneas que pueden generar un impacto negativo al medio ambiente debido a la invasión de ecosistemas naturales o zonas protegidas.

Para que las SLMG sean una solución viable para la energización de regiones rurales remotas, se debe garantizar un diseño optimizado que tenga un costo financiero aceptable, el cual inicia con una planificación energética que integre el dimensionamiento de las fuentes de energía, la localización estratégica de las fuentes, la arquitectura del sistema de distribución encargado de interconectar las fuentes de generación con las cargas, y las fuentes y cargas entre sí y una estrategia de despacho que garantice el funcionamiento continuo y balanceado de la SLMG.

La existencia de un vínculo entre la academia, la industria y la sociedad, facilita la creación de soluciones con mayor impacto que afronten los problemas de desenergización rural. En este contexto, también se debe dar apoyos gubernamentales orientados a potenciar dichas soluciones para facilitar su aplicación y de esta manera crear proyectos viables y sostenibles en el tiempo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Hatziargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*. 2014.
- [2] D. Zapata-García, “Definición de componentes tecnológicos de una micro-red inteligente,” Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2014.
- [3] W. K. Chae, H. J. Lee, J. N. Won, J. S. Park, and J. E. Kim, “Design and field tests of an inverted based remote MicroGrid on a Korean Island,” *Energies*, vol. 8, no. 8, pp. 8193–8210, 2015.

- [4] Y. A. Muñoz, "Optimización de recursos energéticos en zonas aisladas mediante estrategias de suministro y consumo," Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [5] H. Liang, H. Liu, and M. Fan, "Optimal Planning of Microgrid applied in Remote Rural Area," *CIGRE*, 2012.
- [6] X. Zhang, R. Sharma, and Y. He, "Optimal energy management of a rural microgrid system using multi-objective optimization," *Innov. Smart Grid Technol. ...*, pp. 1–8, 2012.
- [7] A. Brocco, "Ad-Hoc self-organized microgrid for rural electrification and post-disaster response," *IEEE Green Technol. Conf.*, pp. 315–321, 2013.
- [8] A. S. Sánchez, E. A. Torres, and R. A. Kalid, "Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon Region," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 278–290, 2015.
- [9] W. Chae, H. Lee, S. Hwang, I. Song, and J. Kim, "Isolated MicroGrid's Voltage and Frequency Characteristic with Induction Generator Based Wind Turbine," *Smart Grid Renew. Energy*, no. July, pp. 180–192, 2014.
- [10] R. Martínez-Cid and E. O'Neill-Carrillo, "Sustainable Microgrids for Isolated Systems," *Proc. Transm. Distrib. Conf. Expo. New Orleans, LA, USA, 19–22 April 2010*, pp. 1–7, 2010.
- [11] E. Muljadi and H. E. McKenna, "Power quality issues in a hybrid power system," *Conf. Rec. 2001 IEEE Ind. Appl. Conf. 36th IAS Annu. Meet. (Cat. No.01CH37248)*, vol. 2, pp. 773–781, 2001.
- [12] T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, and T. Funabashi, "A Hybrid Power System Using Alternative Energy Facilities in Isolated Island," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 2, pp. 406–414, 2005.
- [13] X. Zhi-rong, Y. Ping, C. Zhu, Y. Chun-meng, Z. Qun-ru, and Z. Cheng-li, "Energy Management Strategy for Medium-Voltage Isolated Microgrid," pp. 80–85, 2015.
- [14] S. Bahramirad, W. Reder, and A. Khodaei, "Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 2056–2062, 2012.
- [15] P. Lombardi, Z. Styczynski, T. Sokolnikova, and K. Suslov, "Use of energy storage in Isolated Micro Grids," *Proc. - 2014 Power Syst. Comput. Conf. PSCC 2014*, 2014.
- [16] T. Logenthiran and D. Srinivasan, "Short term generation scheduling of a microgrid," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, pp. 1–6, 2009.
- [17] S. Sinha and S. S. Chandel, "Review of software tools for hybrid renewable energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 192–205, 2014.
- [18] C. Bustos, D. Watts, and H. Ren, "MicroGrid operation and design optimization with synthetic wins and solar resources," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 10, no. 2, pp. 1550–1562, 2012.
- [19] A. Arif, F. Javed, and N. Arshad, "Integrating renewables economic dispatch with demand side management in micro-grids: A genetic algorithm-based approach," *Energy Effic.*, vol. 7, no. 2, pp. 271–284, 2014.
- [20] R. Dufo-López and J. L. Bernal-Agustín, "Design and control strategies of PV-diesel systems using genetic algorithms," *Sol. Energy*, vol. 79, no. 1, pp. 33–46, 2005.
- [21] M. Ross, R. Hidalgo, C. Abbey, and G. Joós, "Energy storage system scheduling for an isolated microgrid," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 5, no. 2, pp. 117–123, 2011.
- [22] C. Duran-Santos and J. Forero-Quintero, "Propuesta metodológica para la selección de la topología más adecuada para la implementación de una microred en centros poblados con viviendas en zonas no interconectadas (ZNI)," Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2014.
- [23] X. Xie, H. Wang, S. Tian, and Y. Liu, "Optimal capacity configuration of hybrid energy storage for an isolated microgrid based on QPSO algorithm," in *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, DRPT 2015*, 2015, pp. 2094–2099.
- [24] A. P. Agalgaonkar, C. V. Dobariya, M. G. Kanabar, S. A. Khaparde, and S. V. Kulkarni, "Optimal sizing of distributed generators in MicroGrid," *2006 IEEE Power India Conf.*, vol. 2005, pp. 901–908, 2005.
- [25] F. Katiraei and C. Abbey, "Diesel plant sizing and performance analysis of a remote wind-diesel microgrid," *2007 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet. PES*, pp. 1–8, 2007.
- [26] I. Baring-Gould and M. Dabo, "Technology, Performance, and Market of Wind-Diesel Applications for Remote and Island Communities," no. February, 2009.
- [27] M. Ross, R. Hidalgo, C. Abbey, and G. Joós, "Analysis of energy storage sizing and technologies,"

EPEC 2010 - IEEE Electr. Power Energy Conf. "Sustainable Energy an Intell. Grid," 2010.

[28] B. Joshi, T. S. Bhatti, and N. K. Bansal, "Decentralized energy planning model for a typical village in India," *Energy*, vol. 17, no. 9, pp. 869–876, 1992.

[29] C. S. Sinha, R. P. Venkata, and V. Joshi, "Rural energy planning in India:: Designing effective intervention strategies," *Energy Policy*, vol. 22, no. 5, pp. 403–414, 1994.

[30] S. Singh, I. P. Singh, S. Singh, and C. J. S. Pannu, "Energy Planning of a Punjab Village Using Multiple Objectives Compromise Programming," *Energy Cover. Mgmt*, vol. 37, no. 3, pp. 329–342, 1996.

[31] J. Nahman and J. Spiric, "Optimal planning of rural networks," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 19, no. 8, pp. 549–556, 1997.

[32] X. Guo, H. Guo, and H. Cheng, "Coordinated planning of distributed energy resources and microgrid network," *IEEE PES T&D Conf. Expo. DALLAS*, vol. |, no. 51261130473, p. 5, 2016.

[33] UPME, "Programa De Uso Racional Y Eficiente De Energía Y Fuentes No Convencionales – Proure Plan De Acción Indicativo 2010-2015," pp. 1–49, 2010.

[34] Y. Cao *et al.*, "Parallel algorithms for islanded microgrid with photovoltaic and energy storage systems

planning optimization problem: Material selection and quantity demand optimization," *Comput. Phys. Commun.*, 2016.

[35] W. Gu *et al.*, "Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 26–37, 2014.

[36] W. Su, Z. Yuan, and M. Y. Chow, "Microgrid planning and operation: Solar energy and wind energy," *IEEE PES Gen. Meet. PES 2010*, pp. 1–7, 2010.

[37] IDEAM, "Atlas interactivo," 2015. [Online]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>.

[38] UPME, PUJ, COLCIENCIAS, IDEAM, and IGAC, *Atlas potencial hidroenergetico de Colombia 2015*. Gobierno de Colombia, 2015.

[39] UPME, IDEAM, Colciencias, and UIS, *Atlas del Potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia, 2015.

[40] M. R. Vallem and J. Mitra, "Siting and sizing of distributed generation for optimal microgrid architecture," *Proc. 37th Annu. North Am. Power Symp. 2005*, vol. 2005, pp. 611–616, 2005.

[41] B. Chen, "A Novel Energy Storage Allocation Planning Method for Microgrid," University of Wisconsin Milwaukee, 2016.

