NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA: CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
13 - 16 DE SEPTIEMBRE 2022 CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA
Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI

Sistema de gestión de energía para una microrred que considera la generación de electricidad a partir de biomasa

Albert Deluque Pinto, Gail Gutiérrez Ramirez

Universidad de La Guajira
Riohacha, Colombia

Ernesto Pérez González

Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Colombia

Resumen

El uso de las fuentes renovables no convencionales de generación de energía tales como la fotovoltaica, la eólica y la biomasa, han tomado mucha importancia, no solo porque se consideran de cero emisiones de gases contaminantes, sino también porque su aprovechamiento se puede realizar en zonas con alto potencial en este tipo de fuentes donde el sistema de interconexión eléctrico convencional no llega. Para obtener mayor provecho de estas fuentes se implementan las llamadas microrredes con penetración de fuentes de energía que incluyen renovables y no renovables en conjunto con sistemas de almacenamiento, controladas por sistemas de gestión de energía que busca la operación económica del sistema de generación. Una de las fuentes de generación de energía que más ha llamado la atención es la biomasa dado que en algunos países, como Colombia, existe una gran variedad de fuentes de biomasa residual en los contextos agrícola e industrial que potencia su implementación, por medio de un proceso de gasificación y con el uso de un generador eléctrico de combustión interna, para la generación de electricidad. Sin embargo, la calidad del gas, producto de la gasificación, depende de diferentes variables como la humedad de la biomasa o el agente de gasificación, entre otros, que incide directamente en la generación de energía por parte del conjunto gasificador – generador. Considerando el potencial que tiene Colombia en fuentes como la solar fotovoltaica y la biomasa, en el presente trabajo se propone el desarrollo de un sistema de gestión de energía para una microrred con integración de fuentes renovables, almacenamiento en baterías y conexión a la red eléctrica convencional que considera el comportamiento del gasificador, para un tipo de biomasa, en la generación de energía eléctrica.

Palabras clave: microrred; sistema de gestión de energía; biomasa; gasificador; fuentes no convencionales de generación de energía

Abstract

The use of non-conventional power generation sources such as photovoltaic, wind and biomass, have become very important, not only because they are considered to have zero emissions of polluting gases, but also because they can be used in areas with high potential in this type of sources where the conventional electrical interconnection system does not reach the grid. In order to take greater advantage of these sources, so-called microgrids are implemented with penetration of energy sources that include renewable and non-renewable energy sources in conjunction with storage systems, controlled by energy management systems that seek the economic operation of the generation system. One of the sources of energy generation that has attracted the most attention is biomass, given that in some countries, such as Colombia, there is a wide variety of sources of residual biomass in the agricultural and industrial contexts that can be implemented, by means of a gasification process and with the use of an internal combustion electric generator, for the generation of electricity. However, the quality of the gas, product of gasification, depends on different variables such as biomass humidity or the gasification agent, among others, which directly affect the energy generation by the gasifier - generator set. Considering the potential that Colombia has in sources such as solar photovoltaic and biomass, this paper proposes the development of an energy management system for a microgrid with integration of renewable sources, battery storage and connection to the conventional power grid that considers the behavior of the gasifier, for one type of biomass, in the generation of electricity.

Keywords: *microgrid; energy management system; biomass; gasifier; non-conventional power generation sources*

Nomenclatura

Abreviaturas

EMS: Sistema de gestión de energía

FERNC: Fuentes de energía renovables no convencionales

MG: Microrred

UPME: Unidad de planeación minero-energética

t: índice de tiempo

Parámetros

C_{Tot}: Costo total de operación de la microrred

C_t^f: Costo de la energía de la fuente *f* en el tiempo *t*

Np: Número de periodos de tiempo

P_{min}^f: Potencia mínima de generación de las fuentes

P_{max}^f: Potencia máxima de generación de las fuentes

P_L^{ram}: Rampa de desaceleración del generador del gasificador

P_U^{ram}: Rampa de aceleración del generador del gasificador

Variables.

E_t^{bat}: Energía de las baterías en el tiempo *t*

$E_{car,t}^{bat}$: Energía de carga de las baterías en el tiempo *t*

$E_{des,t}^{bat}$: Energía de descarga de las baterías en el tiempo *t*

E_{min}^{bat}: Energía mínima de almacenamiento de las baterías

E_{max}^{bat}: Energía máxima de almacenamiento de las baterías.

P_t^f: Variable de decisión de la potencia de la fuente *f* en el tiempo *t*

1. Introducción

Los cambios que ha venido sufriendo el medioambiente debido, entre otros, al uso de combustibles fósiles como el petróleo para la generación de energía eléctrica han hecho que se busquen alternativas para la generación de electricidad, de tal manera que el impacto sobre el medio ambiente sea mínimo. Así mismo, surge el interés de llevar soluciones de energía eléctrica a zonas apartadas donde el sistema de interconexión nacional no llega y que por las actividades de tipo social y económico que realizan requieren de soluciones en el aspecto eléctrico, que en ocasiones se convierte en todo un reto y les representa altas sumas de dinero para su operación. Buscando soluciones a los temas planteados, se ha puesto el interés en el uso de fuentes de energía renovables no convencionales (FERNC) como la solar fotovoltaica, la eólica y la biomasa, dado que estas fuentes se consideran amigables con el medio ambiente y existe potencial de uso de estas fuentes en zonas alejadas del sistema de interconexión nacional.

El uso de las FERNC para la generación de electricidad depende de las condiciones ambientales y para superar este inconveniente se combinan dos o más fuentes de energía con el objetivo de contrarrestar las debilidades de una fuente con las fortalezas de otra (Gonzalez et al., 2018). El aprovechamiento de estas fuentes se realiza mediante MG, que básicamente son redes eléctricas de baja potencia que consisten de fuentes de generación distribuida, como turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos y sistema de generación con biomasa, dispositivos de almacenamiento y cargas (Shen et al., 2016).

Para obtener mayor provecho de las MG se implementan los sistemas de gestión de energía (Harmouch et. al., 2018), con lo cual se busca el control y operación económica de la MG decidiendo, en un horizonte de tiempo, la combinación de fuentes y almacenamiento necesarios para alimentar a la carga. La operación de los EMS requiere de datos de entrada como los pronósticos de generación de potencia de las diferentes fuentes y la carga, así como de la definición de una función objetivo de optimización y restricciones con el objetivo de realizar la operación económica de la MG. La implementación de los EMS se realiza mediante diferentes arquitecturas como la centralizada, descentralizada y distribuida (Raya-Armenta et al., 2021). En el EMS centralizado el controlador se encarga de recibir todos los datos, procesarlos y enviar las consignas de operación a los controladores locales de cada una de las fuentes permitiendo, con ello, una mayor observabilidad sobre el funcionamiento del sistema y la conveniencia para la aplicación de algoritmos de optimización precisos (Mao et al., 2014). Por otro lado, en la arquitectura descentralizada las responsabilidades se asignan a los controladores de las fuentes de energía, que se coordinan con los otros controladores para manejar y optimizar la operación de las MG (Mao et al., 2014). Por su parte, el esquema distribuido implementa las ventajas de las arquitecturas previas creando un EMS confiable y flexible con un bajo costo computacional con niveles moderados de coste de infraestructura y dificultad de implementación (Raya-Armenta et al., 2021).

El interés en la implementación de EMS se ha visto plasmado mediante diferentes estudios reportados en la literatura. Lo anterior se puede evidenciar en trabajos como los de (Azzam et al., 2022) , (Javanmard et al., 2021), (Saki et al., 2022) y (Eghbali et al., 2022).

La biomasa es otra fuente de generación de energía que ha llamado la atención para utilizarse en MG. Lo anterior concuerda con lo manifestado en (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)., 2003) donde se afirma que la biomasa residual se puede convertir en una fuente alternativa de energía renovable en Colombia. Sin embargo, a pesar de que se estima que el país tiene un potencial de 15GW de potencia basada en biomasa sólo un 0.8% de los actuales 18GW de capacidad eléctrica instalada se sustenta en este recurso energético(Sagastume Gutiérrez et al., 2020). La biomasa se puede obtener de sectores como la agricultura, ganadería, residuos urbanos, entre otros que ayudan a mantener operativas las plantas que funcionan con este recurso, por ejemplo, los residuos de los bosques plantados y naturales pueden generar anualmente 442 y 698MWh de energía, respectivamente (Masum et al., 2021). En cuanto al potencial de cultivos energéticos la Orinoquía se podría presentar con el mayor potencial de abastecimiento con este tipo de cultivos suministrando la mitad del potencial de eucalipto, palma de aceite y cerca del 40% de caña de azúcar.

Según lo manifestado, el país cuenta con potencial para fortalecer la canasta energética incluyendo a la biomasa como una de sus fuentes y con ello llevar soluciones de suministro de electricidad a zonas aisladas. Sin embargo, esto implica una serie de compromisos de tipo tecnológicos, ya que tecnologías como la gasificación requieren asegurar ciertas características de la biomasa para su utilización. Por ejemplo, la humedad de la biomasa, agente gasificante, temperatura, entre otras variables, pueden afectar la calidad del gas en términos del poder calorífico y disminuir con ello la energía total extraíble del gas producto de la gasificación.

Considerando el potencial en biomasa y otras fuentes alternativas de generación de energía que tiene el país y los retos que trae la utilización de este tipo de fuentes para la generación de electricidad, en este trabajo se plantea el desarrollo de un sistema de gestión de energía para la operación económica de una MG con inclusión de biomasa, almacenamiento en baterías y conexión a la red eléctrica.

Este documento está organizado de la siguiente manera. La descripción de la MG en estudio se muestra en la sección II. En la sección III se realiza la descripción matemática del EMS. En la sección IV se presenta un análisis de la biomasa en la generación de electricidad. Los resultados esperados de la investigación se muestran en la sección V. Finalmente, las conclusiones se presentan en la sección VI.

2. Microrred en estudio

La MG en estudio se muestra en la Figura 1, la cual está compuesta por paneles fotovoltaicos, biomasa, almacenamiento en baterías, red eléctrica convencional, respuesta a la demanda y cargas. La operación económica de la MG se busca por medio de la implementación de un EMS, el cual, una vez ejecutada la optimización en un horizonte de 2 días con intervalo de optimización de 15 minutos, se encargará de enviar las consignas de potencia a cada uno de los controladores locales de los generadores y sistemas de almacenamiento que integran la MG. Para lograr lo anterior es necesario contar con un sistema de comunicación adecuado que permita el intercambio de comunicación entre los controladores locales de la MG y el EMS.

En este caso se utiliza a la red sólo para suministrar potencia a la MG, lo cual, estará determinado por el costo de la energía de la red en cada instante de tiempo de optimización. Por su parte las baterías se utilizan, no sólo para almacenar energía, sino también para suministrarla a la Microred cuando sea requerida por parte del EMS.

La respuesta a la demanda juega un papel importante dentro del esquema propuesto ya que permitirá aplanar la curva de carga y utilizar dispositivos que permitan aprovechar los excesos de generación de energía que se presenten durante la operación del sistema.

En la Tabla 1 se muestran las capacidades de cada una de las fuentes y almacenamiento de la MG.

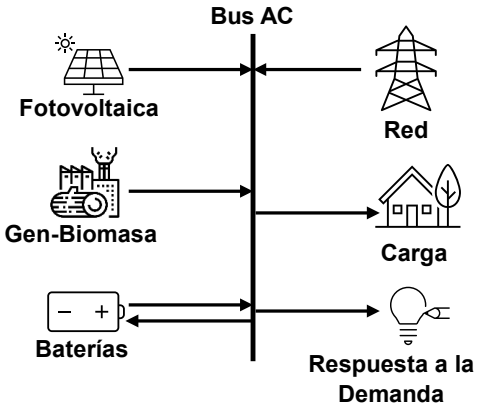

Figura 1. Microrred en estudio. Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Capacidad de los generadores y almacenamiento. Fuente: Elaboración propia

Dispositivo	Capacidad	Unidad
Generador Fotovoltaico	5.4	kW
Generador Biomasa	30	kW
Baterías	5	kWh

3. Descripción Matemática del EMS

El EMS debe responder a los requerimientos de la carga y considerar, para ello, el estado de generación de energía de las fuentes y almacenamiento que componen la MG. Para el envío de los puntos de generación de los equipos que componen la MG y que controlan las diferentes fuentes, el EMS recibe información del pronóstico de las fuentes renovables y la carga, el estado de carga de las baterías, costos de la energía generada por las fuentes, costos de la energía de la red y el de respuesta a la demanda, tal y como se muestra en la Figura 2. Una vez el EMS reciba los datos mencionados, se ejecutan una serie de ecuaciones matemáticas que incluyen función objetivo y restricciones, y se envían los puntos de operación a los controladores locales de los generadores de la MG.

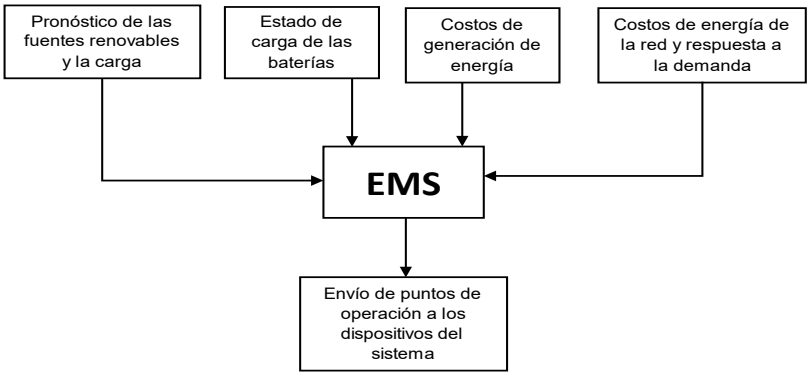

Figura 2. Datos de entrada y salida del EMS. Fuente: Elaboración propia.

3.1. Función Objetivo

En la función objetivo se incluyen todos los parámetros de costos de generación y las variables de decisión correspondiente a las potencias optimas que debe generar cada una de las fuentes y almacenamiento. Estas potencias son los puntos de operación que se le envían a los controladores locales de los generadores. En la ecuación (5) se muestra la forma de la función objetivo

$$C_{Tot} = \sum_{t=1}^{Np} C_t^f \cdot P_t^f \tag{1}$$

3.2. Restricciones

Cada una de las fuentes de generación de energía, el almacenamiento y la respuesta a la demanda tienen sus puntos mínimos y máximos de operación. Para evitar superar estos rangos de operación se establecen restricciones a cada uno de los dispositivos mencionados, de tal manera que se pueda asegurar que las consignas de potencias estén en rangos admisibles por los equipos. Las restricciones de las fuentes de generación como la biomasa, la red y la respuesta a la demanda siguen la estructura de la ecuación (5).

$$P_{min}^f \leq P_t^f \leq P_{max}^f \tag{2}$$

Por su parte, se debe asegurar que entre periodos de optimización el generador del gasificador no sufra aumentos bruscos de generación de potencia, para ello se establece una restricción que considera las rampas de aceleración y desaceleración (Marzband et al. 2017). Lo anterior se muestra en la ecuación (5).

$$P_L^{ram} \leq \left(P_t^f - P_{t-1}^f\right) \leq P_U^{ram} \tag{3}$$

3.2.1. Restricciones de almacenamiento

Dado que la optimización se establece en un horizonte de tiempo es necesario incluir el modelo de carga y descarga de las baterías. El modelo que se utiliza en el trabajo de investigación es el que

se presenta en (Elsied et al. 2016). Dicho modelo es como se muestra en la ecuación (5). Para decidir entre la carga o descarga de las baterías se utilizan variables booleanas.

$$E_t^{bat} = E_{(t-1)}^{bat} + E_{car,t}^{bat} - E_{des,t}^{bat} \quad (4)$$

La energía de las baterías debe estar en un rango de valores adecuados, de tal manera que se eviten descargas profundas o sobre descargas. Por ello, se establece como restricción la ecuación (5).

$$E_{min}^{bat} \leq E_t^{bat} \leq E_{max}^{bat} \quad (5)$$

4. Análisis de la biomasa como fuente de generación de electricidad

La biomasa se ha incluido en diferentes estudios que buscan la generación de electricidad y de calor por medio de MG. Es así como en el trabajo presentado por (Zheng et al., 2018) se presenta un modelo económico de programación lineal para evaluar un sistema de cogeneración (calor y electricidad) que incluye biomasa. (Morato et al., 2020) desarrollan una solución para el problema de gestión de energía y el reparto de recursos de MG cooperativas basadas en energías renovables en la industria de la caña de azúcar brasileña. Los anteriores son algunos estudios donde se incluye la biomasa para la generación de energía. Sin embargo, un aspecto importante a la hora de utilizar a la biomasa como fuente de electricidad mediante un proceso de gasificación, es el poder calorífico del gas producto de la gasificación (syngas), el cual depende de variables como la humedad de la biomasa, la composición del gas y el factor de aire. Cualquier variación de los parámetros descritos pueden afectar significativamente el comportamiento del generador conectado al gasificador.

Para analizar el comportamiento de un sistema de generación basado en biomasa para el suministro de electricidad en (Centeno et al., 2012) se realiza un estudio, mediante simulaciones, que busca analizar el comportamiento del poder calorífico del syngas para una biomasa determinada para diferentes valores de factor de aire y humedad. En el estudio realizado por (Centeno, 2010) se afirma que, en general, bajos contenidos de humedad en la biomasa aumenta el poder calorífico del syngas favoreciendo la generación de energía eléctrica y en casos de altos contenidos de humedad el proceso requiere mayor de manda de calor para evaporarlo, lo cual afectaría el proceso de obtención de electricidad. Siguiendo el procedimiento mostrado en (Centeno, 2010) se realizaron simulaciones obteniendo como resultado la superficie de generación de electricidad para diferentes valores de porcentaje de humedad y factor de aire que se muestra en la Figura 3. En esta figura se muestra cómo cambia la potencia eléctrica de salida del generador con la variación de los parámetros considerados.

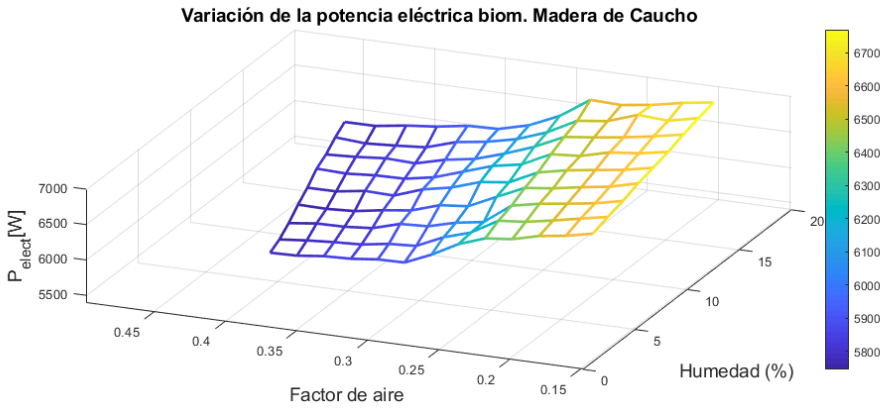

Figura 3. Superficie de generación de potencia eléctrica para la madera caucho. Fuente: Elaboración propia

5. Resultados esperados

Con el objetivo de realizar pruebas al EMS que se está desarrollando y para analizar su respuesta a entradas escalón se suponen que los datos de las fuentes y la carga son como se muestran en la Figura 4. Donde PV representa la fuente fotovoltaica, BM representa la fuente de biomasa y PL representa la carga que se debe alimentar. En el caso de la fuente de biomasa se supone que la calidad del gas varía entre suministros de biomasa al gasificador y por eso el comportamiento que se muestra en la figura.

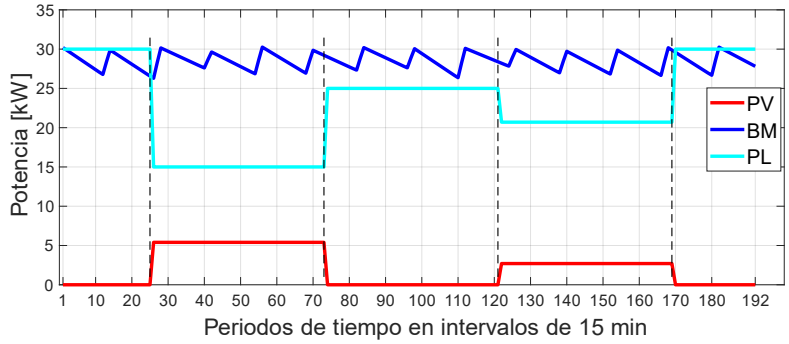

Figura 4. Fuentes del sistema y carga. Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizadas las simulaciones se obtiene como resultado lo mostrado en la Figura 5. En esta figura RD representa el suministro de potencia de la red y BT la carga (potencias negativas) y descarga (potencias positivas) de las baterías. En esta figura se puede apreciar cómo el EMS es capaz de distribuir, en el horizonte de optimización, cada una de las fuentes para alimentar a la carga. En este sentido, se puede ver que en los intervalos 1, 2, 4 5 se cargan las baterías, mientras que en el intervalo 3 se descargan. Por otro lado, la red se utiliza en todo el intervalo dado que el precio de la potencia de ésta es menor que el de la fuente de biomasa. En todo momento la carga se debe alimentar, a pesar del costo de la potencia de las fuentes y este es el caso de los intervalos

1 y 5 donde se aumenta la generación de la fuente de biomasa para alimentar en su totalidad a la carga.

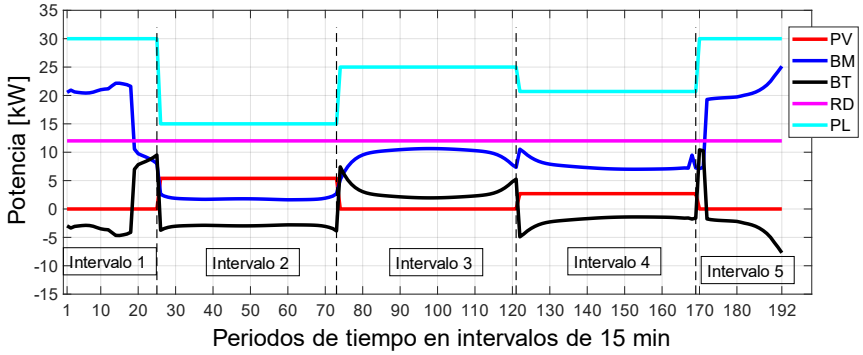

Figura 5. Resultados de la gestión de la MG. Fuente: Elaboración propia.

6. Conclusiones

En este documento se realiza la descripción del trabajo de investigación que se encuentra en etapa de desarrollo por parte de los autores. En este caso se realiza la descripción de la MG en estudio sobre la cual se está trabajando para el desarrollo del sistema de gestión de energía y en el cual se evidencia la inclusión de la biomasa como una de las fuentes que integran dicha MG. Así mismo, se hizo la descripción de las ecuaciones que modelan el EMS, resaltando que se busca la operación óptima del sistema, para lo cual se describe una función objetivo que incluye los costos de generación de energía del sistema y las variables de decisión que representan las potencias de cada una de las fuentes y almacenamiento.

La generación de electricidad a partir de la biomasa se abordó mediante estudios reportados en la literatura donde se pudo evidenciar que efectivamente esta fuente se puede utilizar para la generación de electricidad, pero que se deben tener en cuenta ciertas variables que pueden afectar la generación de energía eléctrica. En este trabajo se reportan resultados de simulaciones realizadas con el desarrollo actual del EMS, en los cuales se pudo apreciar que el sistema de gestión es capaz de distribuir adecuadamente cada una de las fuentes y el almacenamiento para el suministro de potencia a la carga.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto “Transformación estratégica para el sector energético colombiano en el horizonte 2030” adjudicado por la convocatoria 788 de MinCiencias (Programa de Ecosistemas Científicos). Número de contrato FP44842-210-2018.

8. Referencias

- Azzam, Sarah Mostafa, Tallal Elshabrawy, and Mohamed Ashour. 2022. "A Bi-Level Framework for Supply and Demand Side Energy Management in an Islanded Microgrid." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 3203(c):1–12.
- Centeno, Felipe. 2010. "Avaliação Do Desempenho de Um Sistema Integrado Motor Ciclo Otto/Gaseificador Co-Corrente Utilizando Modelagem Matemática." Universidade Federal de Itajubá.
- Centeno, Felipe, Khamid Mahkamov, Electo E. Silva Lora, and Rubenildo V. Andrade. 2012. "Theoretical and Experimental Investigations of a Downdraft Biomass Gasifier-Spark Ignition Engine Power System." *Renewable Energy* 37(1):97–108.
- Eghbali, Nazanin, Seyed Mehdi Hakimi, Arezoo Hasankhani, Ghasem Derakhshan, and Babak Abdi. 2022. "Stochastic Energy Management for a Renewable Energy Based Microgrid Considering Battery, Hydrogen Storage, and Demand Response." *Sustainable Energy, Grids and Networks* 30:100652.
- Elsied, Moataz, Amrane Oukaour, Tarek Youssef, Hamid Gualous, and Osama Mohammed. 2016. "An Advanced Real Time Energy Management System for Microgrids." *Energy* 114:742–52.
- Gonzalez, Arnau, Jordi Roger Riba, Bernat Esteban, and Antoni Rius. 2018. "Environmental and Cost Optimal Design of a Biomass–Wind–PV Electricity Generation System." *Renewable Energy* 126:420–30.
- Harmouch, Fatima Zahra, Nissrine Krami, and Nabil Hmina. 2018. "A Multiagent Based Decentralized Energy Management System for Power Exchange Minimization in Microgrid Cluster." *Sustainable Cities and Society* 40(June 2017):416–27.
- Javanmard, Behzad, Mohammad Tabrizian, Meghdad Ansarian, and Amir Ahmarinejad. 2021. "Energy Management of Multi-Microgrids Based on Game Theory Approach in the Presence of Demand Response Programs, Energy Storage Systems and Renewable Energy Resources." *Journal of Energy Storage* 42(April):102971.
- Mao, Meiqin, Peng Jin, Nikos D. Hatziargyriou, and Liuchen Chang. 2014. "Multiagent-Based Hybrid Energy Management System for Microgrids." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 5(3):938–46.
- Marzband, Mousa, Hamed Alavi, Seyedeh Samaneh Ghazimirsaeid, Hasan Uppal, and Terrence Fernando. 2017. "Optimal Energy Management System Based on Stochastic Approach for a Home Microgrid with Integrated Responsive Load Demand and Energy Storage." *Sustainable Cities and Society* 28:256–64.
- Masum, Md Farhad Hossain, Puneet Dwivedi, and Rafael De La Torre. 2021. "Assessing Economic and Environmental Feasibility of Wood-Based Electricity Generation in South America: A Case Study from Colombia." *Forest Policy and Economics* 124(December 2020).
- Morato, Marcelo M., José D. Vergara-Dietrich, Paulo R. C. Mendes, Julio E. Normey-Rico, and Carlos Bordons. 2020. "A Two-Layer EMS for Cooperative Sugarcane-Based Microgrids." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 118(May 2019):105752.
- Raya-Armenta, Jose Maurilio, Najmeh Bazmohammadi, Juan Gabriel Avina-Cervantes, Doris Sáez, Juan C. Vasquez, and Josep M. Guerrero. 2021. "Energy Management System Optimization in Islanded Microgrids: An Overview and Future Trends." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 149(May):111327.
- Sagastume Gutiérrez, Alexis, Juan J. Cabello Eras, Luc Hens, and Carlo Vandecasteele. 2020. "The Energy Potential of Agriculture, Agroindustrial, Livestock, and Slaughterhouse Biomass Wastes through Direct Combustion and Anaerobic Digestion. The Case of Colombia." *Journal of Cleaner Production* 269.
- Saki, Reza, Ehsan Kianmehr, Esmaeel Rokrok, Meysam Doostizadeh, Rahmat Khezri, and Miadreza Shafie-khah. 2022. "Interactive Multi-Level Planning for Energy Management in Clustered Microgrids Considering Flexible Demands." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 138(September 2021):107978.
- Shen, Jingshuang, Chuanwen Jiang, Yangyang Liu, and Xu Wang. 2016. "A Microgrid Energy Management System and Risk Management under an Electricity Market Environment." *IEEE Access* 4:2349–

56.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). 2003. "Potencialidades de Cultivos Energéticos y Residuos Agrícolas En Colombia." Retrieved (http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1287).
- Zheng, Yingying, Bryan M. Jenkins, Kurt Kornbluth, Alissa Kendall, and Chresten Træholt. 2018. "Optimal Design and Operating Strategies for a Biomass-Fueled Combined Heat and Power System with Energy Storage." *Energy* 155:620–29.

Sobre los autores

- **Albert Deluque Pinto**: Ingeniero Electrónico, Magister en Ingeniería Mecánica, Estudiante de Doctorado en Ingeniería – Sistemas Energéticos. Profesor Ocasional, Universidad de La Guajira. adeluquep@uniguajira.edu.co
- **Ernesto Pérez González**: Ingeniero Electricista, Magister y Doctor en Ingeniería Eléctrica. Profesor Titular, Universidad Nacional de Colombia. eperezg@unal.edu.co
- **Gail Gutiérrez Ramirez**: Ingeniero Mecánico, Doctor en Ingeniería. Profesor Asociado, Universidad de La Guajira. galbeirog@uniguajira.edu.co

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)