



TRABAJO TEÓRICO EXPERIMENTAL

Modelado y simulación de una microrred autónoma

Modeling and simulation of an autonomous microgrid

Diandra Hernández Aróstegui ¹, Fernando Miguel Herrera Venta ², Miriam Vilaragut Llanes ^{3, *}, Vladimir Sousa Santos ⁴

¹ Empresa de Ingeniería y Proyectos de la Electricidad (INEL). La Habana, Cuba.

² Empresa de Servicios Ingenieros Especializados (ESINES). La Habana, Cuba.

³ Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE). La Habana, Cuba.

⁴ Universidad de la Costa. Barranquilla, Colombia.

*Autor de correspondencia: miriamv@electronica.cujae.edu.cu

Recibido: 4 de enero de 2021

Aprobado: 30 de abril de 2021

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional



RESUMEN/ABSTRACT

En este trabajo se modela y simula una microrred eléctrica cuyo esquema de generación cuenta con un sistema fotovoltaico y un grupo electrógeno que permite determinada autonomía en caso de desconexión con la red eléctrica, en diferentes modos de operación, conectado a la red o aislada de ella, así como la desconexión de la microrred del SEN y entrada de un grupo electrógeno. Se utilizó el programa MatLab R2017b, a través de su herramienta SimPower System. Se analizó en cada caso el comportamiento de la microrred en la búsqueda de confiabilidad y continuidad en el servicio de energía eléctrica. La carga se simula a partir de la curva de demanda durante 24 horas. Con el objetivo de analizar su comportamiento, inicialmente se comprobó el funcionamiento de cada uno de los componentes que conforman el sistema en las condiciones de trabajo establecidas, lográndose en cada caso un comportamiento adecuado.

Palabras clave: Generación distribuida (GD); microrred (MR); sistema fotovoltaico (SFV); grupo electrógeno (GE).

In this work, an electrical microgrid is modeled and simulated. Its generation scheme has a photovoltaic system and a generator that allows some autonomy in the event of disconnection from the electricity grid. Different operating modes were analyzed: microgrid connected to or isolated from the electrical network, as well as the disconnection of the microgrid from the SEN and the input of a generator set. The MatLab R2017b program was used, through its SimPower System tool. In each case, the behavior of the microgrid was analyzed in search of reliability and continuity in the electric power service. The load is simulated from the demand curve for 24 hours. To analyze its behavior, the operation of each of the components that make up the system was verified under the established working conditions, achieving adequate behavior in each case.

Key words: Distributed generation (GD); micro-grid (MR); photovoltaic system (SFV); generator set (GE).

INTRODUCCIÓN

La sociedad ha alcanzado un desarrollo donde la energía eléctrica es un componente esencial, se convive cada día con dispositivos y electrodomésticos capaces de ayudar a las personas en múltiples tareas. De ahí, que sea imposible imaginar el mundo sin un suministro eléctrico que ilumine los hogares o haga funcionar las fábricas [1]. Cada día que pasa, el consumo eléctrico crece en la misma medida en que lo hacen las necesidades de las personas, unas necesidades que se adecuan al ritmo con que evolucionan las nuevas tecnologías. Evidentemente, no son iguales las necesidades eléctricas en la actualidad frente a las que se tenían hace cincuenta años, sin ir más lejos.

Cómo citar este artículo:

Diandra Hernández Aróstegui y otros. Modelado y simulación de una microrred autónoma
2021, vol. 42, n. 2, mayo/agosto. ISSN:1815-5901.

Sitio de la revista: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>

El aumento del consumo eléctrico conlleva una mayor necesidad de generación eléctrica, obtenida aún en la mayoría de los casos a partir de combustibles fósiles que, por un lado, se encuentran en el planeta de forma limitada y, por otro, generan grandes emisiones de gases nocivos para el medio ambiente [2]. Esos esquemas de generación de electricidad han comenzado a dar muestras de sus limitaciones, por lo que actualmente están siendo sometidos a un profundo proceso de reforma en muchos países, lo que marca pautas para su evolución hacia esquemas alternativos de generación y suministro de electricidad, como la introducción de la Generación Distribuida, GD, y donde las fuentes renovables de energía, FRE, en el marco de este concepto está adquiriendo un papel relevante [3].

Entre los cambios tecnológicos que se han producido en los sistemas eléctricos de potencia (SEP), bajo el concepto de la GD, se encuentran las microrredes eléctricas, las cuales no solo han sido solución para llevar el servicio eléctrico a sitios aislados, alejados de las redes eléctricas y económicamente inviables para que las mismas llegaran allí, sino también han cambiado las estructuras de las redes, sin perder su objetivo esencial con una mayor confiabilidad en el servicio que se presta disminuyendo las pérdidas, al acercar los esquemas de generación a las cargas. Las microrredes se presentan entonces, como una solución viable para dar respuesta a los problemas del gigantismo y pérdidas técnicas en las redes eléctricas, al abrir la posibilidad de integrar varias fuentes de energía, tanto renovables como convencionales, en un pequeño sistema próximo a los consumidores y que permitan el empleo de los recursos energéticos locales de cada comunidad, posibilitando el suministro de energía a las poblaciones apartadas, y en el caso de Cuba, donde los fenómenos meteorológicos severos producen graves afectaciones al sistema eléctrico, las microrredes representan una alternativa, pues permiten la operación aislada del sistema principal ofreciendo continuidad en el servicio eléctrico [2].

Con el fin de analizar el comportamiento de una microrred a la que, teniendo ya un grupo electrógeno en su composición, se le integran fuentes renovables de energía, y considerando la decisión del Gobierno cubano de introducir masivamente este tipo de fuente alternativa como vía para alcanzar la independencia energética, disminuir el consumo de combustible fósil y dar una contribución a la disminución de la contaminación al medio ambiente, sobre la base de los objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas [4], se presenta la modelación y simulación de microrredes utilizando la herramienta Simulink del MatLab R2017b, cuyo uso se realiza bajo la licencia de la Universidad de la Costa, Colombia.

Microrred

Según puede verse en [5], existen varias definiciones sobre microrredes; una definición muy citada la plantea como un grupo de cargas interconectadas y recursos energéticos distribuidos claramente, con límites eléctricos definidos y que actúan como una entidad única controlable con respecto a la red, pudiendo conectarse y desconectarse de ella para permitir que funcione en modo conectado o modo isla de forma independiente [6]. Otros autores plantean que es un sistema integrado de energía que consta de generación distribuida y múltiples cargas eléctricas, que en ocasiones incorporan elementos almacenadores de energía, y pueden operar en paralelo con la red a través de inversores, garantizando un flujo de potencia adecuado en su carga local.

Pueden estar compuestas por múltiples generadores eléctricos no convencionales, como las celdas fotovoltaicas, micro-turbinas, generadores eólicos, almacenadores de energía, entre otros; estos desempeñan una función importante para el futuro de los sistemas eléctricos, reduciendo sustancialmente las emisiones generadas por el empleo de combustibles fósiles, combinando así la tendencia a la expansión y desarrollo de los sistemas de distribución [7, 8, 9].

MATERIALES Y MÉTODOS

El esquema de la microrred modelada y simulada se muestra en la figura 1. En ella se incluyen los paneles solares, un convertidor elevador unidireccional DC/DC, un circuito intermedio de DC y un inversor DC/AC que permite obtener la corriente alterna necesaria para suministrar energía a los consumidores. La conexión de dicho parque se realiza a través de un transformador que permite elevar su tensión a la de la microrred. Por otro lado, se encuentran el grupo electrógeno y el sistema eléctrico de potencia, el primero está formado por un generador sincrónico, y el segundo, por una fuente trifásica, ambos conectados a la microrred a través de un transformador para adaptar sus tensiones a 480V [2, 10, 11, 12].

La carga de la microrred puede recibir alimentación por cualquiera de las fuentes generadoras de electricidad incluidas: el parque fotovoltaico y el grupo electrógeno y, cuando la demanda de los consumidores es mayor que la energía que pueden aportar estas fuentes, también puede ser alimentada por la red eléctrica.

El análisis fundamental del comportamiento de la microrred es en estado estable, donde las constantes de tiempo que predominan en el sistema son grandes, por consiguiente, la configuración óptima del “powergui” sería en modo “phasor”. Sin embargo, para modelar la microrred es necesario hacer uso de la electrónica de potencia en la simulación de los convertidores e inversores, en los cuales es preciso emplear elementos de la biblioteca de MatLab que no son compatibles con el modo “phasor”.

La solución encontrada en este trabajo para lograr la integración de los elementos de la electrónica de potencia con el resto de la microrred fue utilizar el “powergui” en modo discreto, esto representó un nuevo reto para la simulación realizada pues los elementos generadores tienen un mejor desempeño en modo “phasor”, por lo que fue necesario adaptar éstos al nuevo modo del powergui. Se estableció un tiempo de muestreo lo suficientemente pequeño para lograr un comportamiento prácticamente continuo de la microrred a pesar de ralentizar la corrida.

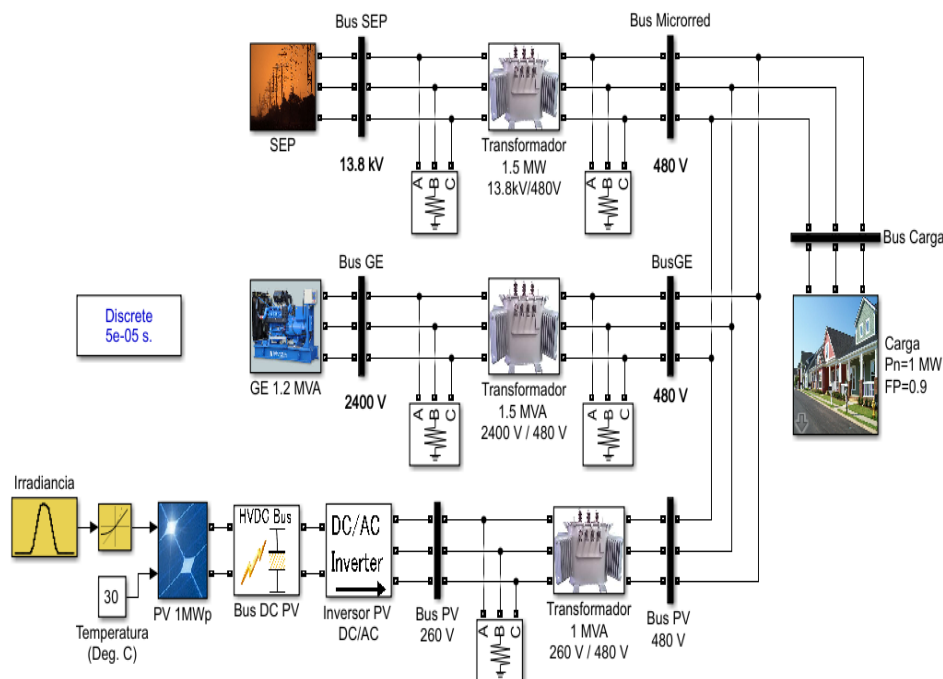


Fig. 1 Esquema de conexión de la microrred.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS y(o) DISCUSIÓN

La microrred funciona como un prototipo experimental alimentando únicamente la carga propuesta con una demanda máxima de 1 MW. Esta puede estar o no conectada al sistema eléctrico de potencia a una tensión de 13,8 kV a 60 Hz, a través de un transformador reductor de 1.5 MVA 13.8/0.48 kV con conexión Y- Δ -1.

Cuenta, además, con otras fuentes generadoras como un grupo electrógeno de 1.2 MVA con tensión de salida de 2400V conectándose a la microrred a través de un transformador de 1,5 MVA 2400/480 V con conexión Y-Δ-1 y un parque fotovoltaico con generación pico de 1 MW.

Caso de estudio 1: Microrred conectada al SEN

En esta configuración la microrred recibe alimentación a través del sistema eléctrico de potencia y del parque fotovoltaico, el grupo electrógeno se encuentra fuera de servicio. La tensión y la frecuencia son establecidas por el sistema eléctrico en el punto de conexión.

En la figura 2, se observan las curvas de potencia demandada por los consumidores y la potencia generada por las unidades generadoras durante un periodo de 24 horas. La carga recibe energía desde el sistema eléctrico en todo momento, exceptuando el horario comprendido entre las 9:30 am hasta las 12:30 pm donde se invierte el sentido del flujo de potencia debido a que la generación del parque fotovoltaico genera un excedente de potencia con relación a la demanda, el cual es consumido por otras cargas del sistema eléctrico. Este escenario es uno de los peores desde el punto de vista ecológico en que pudiera operar la microrred, pues se recibe energía desde el sistema eléctrico, lo que conlleva a una mayor quema de combustibles fósiles para la generación convencional.

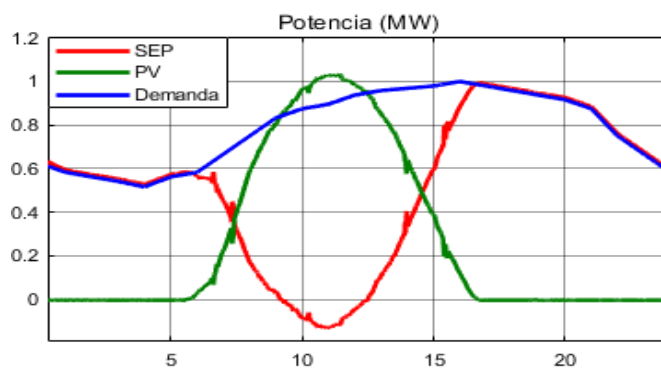


Fig. 2. Potencia demandada y generada en la microrred.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3, se muestra cómo la generación total de potencia sigue a la demandada durante todo el tiempo, asegurando así, el suministro de energía necesaria hacia la carga. Toda la generación de reactivo proviene del sistema eléctrico debido a que el parque fotovoltaico está configurado para trabajar a factor de potencia unitario, es decir, entregando potencia activa máxima.

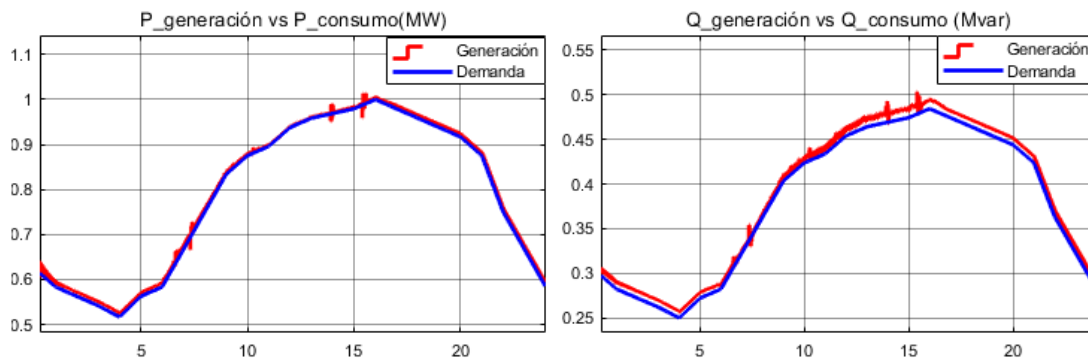


Fig.3. Curvas de generación y demanda.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4, se observan los porcentajes de generación de las fuentes con respecto a la generación total, donde la solar logra cubrir el 100% de la demanda de potencia activa durante el horario desde las 9:30 am hasta las 12:30 pm. En este horario el sistema consume el 17% de exceso de potencia generada por el parque fotovoltaico.

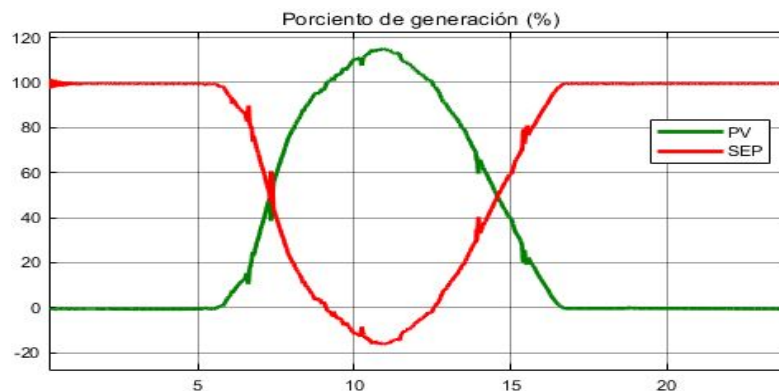


Fig. 4. Porcentajes de generación que representa cada fuente con relación a la total.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5, se muestra el comportamiento sinusoidal de la tensión y la corriente en tres de las barras de la microrred (Bus Carga, Bus SEP, Bus PV 480 V) de la figura 1. Como es de esperar, la amplitud de las corrientes varía en dependencia de los cambios en la generación y la demanda. En la imagen de la derecha se aprecia una vista ampliada de las formas de ondas.

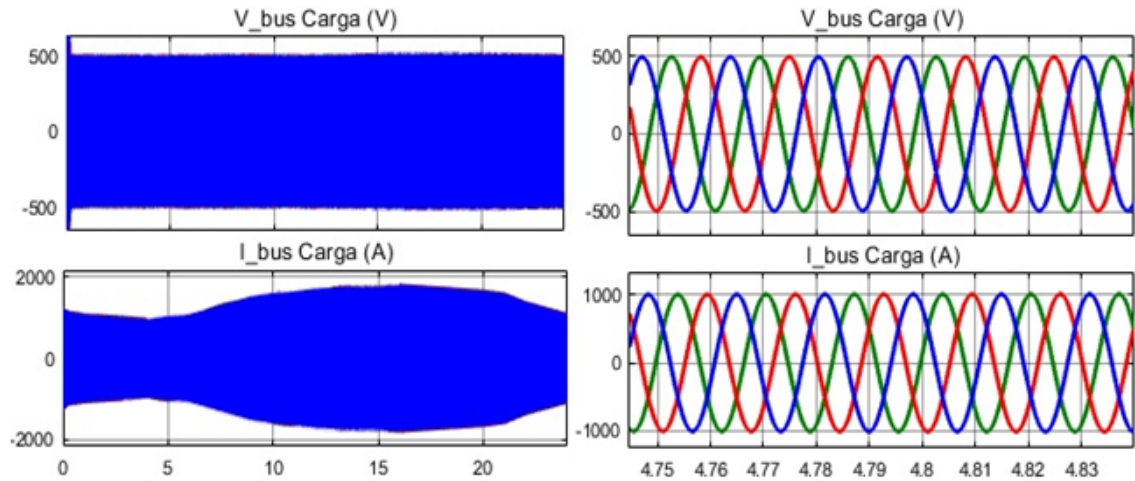


Fig. 5a. Formas de onda de la tensión y la corriente en el Bus Carga de la microrred.
Fuente: Elaboración propia.

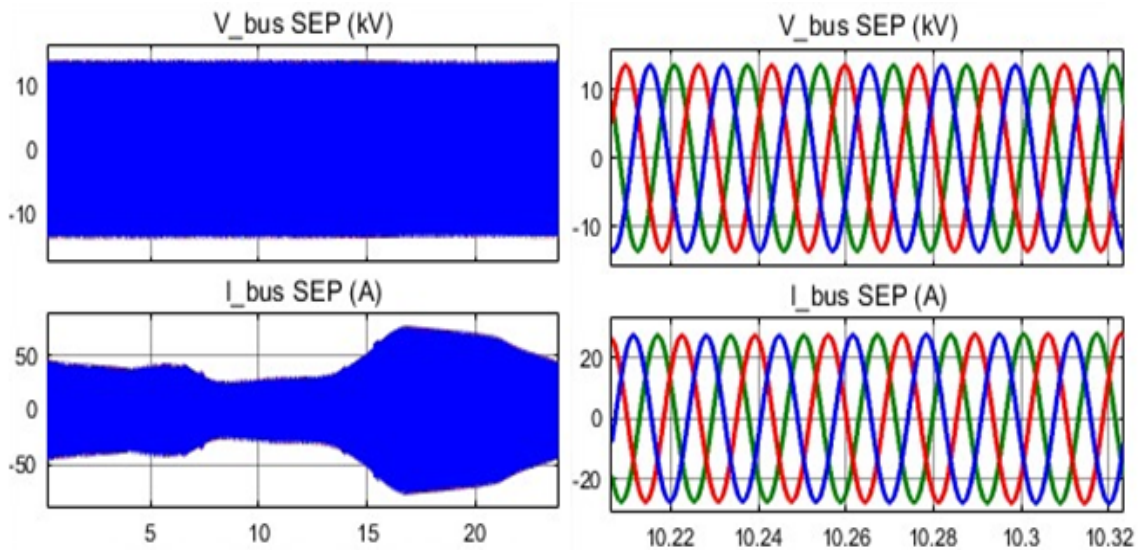


Fig. 5b. Formas de onda de la tensión y la corriente en el Bus SEP de la microrred.
Fuente: Elaboración propia.

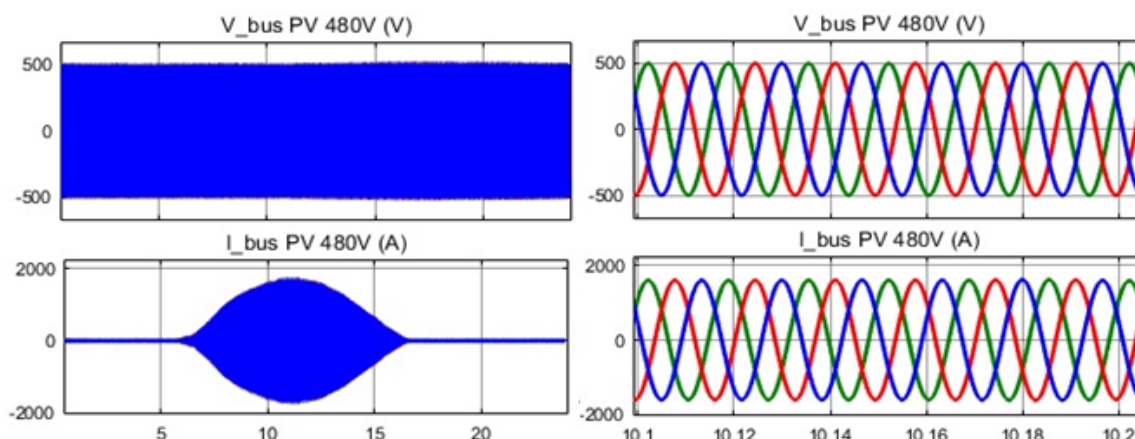


Fig. 5c. Formas de onda de la tensión y la corriente en el Bus PV 480V de la microrred.
Fuente: Elaboración propia.

Caso de estudio 2: Microrred aislada del SEN

En caso de que las condiciones de operación del sistema eléctrico no sean aceptables, la microrred debe ser capaz de aislarse de este y funcionar de forma autónoma. Esto puede ocurrir en eventos provocados por el hombre (mantenimiento en el sistema), caídas de tensión, cortocircuitos, perturbaciones, o en desastres naturales.

Existen varios modos de trabajo que permiten el funcionamiento aislado de la microrred, entre los que se encuentra el modo en que la carga recibe alimentación a través del parque fotovoltaico y del grupo electrógeno de emergencia, encargado de controlar la tensión y la frecuencia de la red. Las curvas de potencia demandada por los consumidores y la potencia generada por las unidades generadoras durante un periodo de 24 horas se observan a la izquierda en la figura 6. El grupo electrógeno genera la potencia necesaria en las horas donde el parque no recibe la radiación suficiente para cubrir la demanda de la carga. Como el grupo no debe trabajar por debajo del 20% de su capacidad nominal, para evitar la desconexión de este y perder el dinamismo del sistema fue necesario, en el horario de 8:00 am a 2:00 pm, limitar la potencia entregada por el PV, limitando la transferencia de potencia por el inversor. En esta configuración la demanda de reactivo de la carga es entregada por el grupo electrógeno.

En la figura 6, a la derecha, se observan las curvas de generación de reactivo del grupo electrógeno, el parque fotovoltaico y la curva de demanda de reactivo.

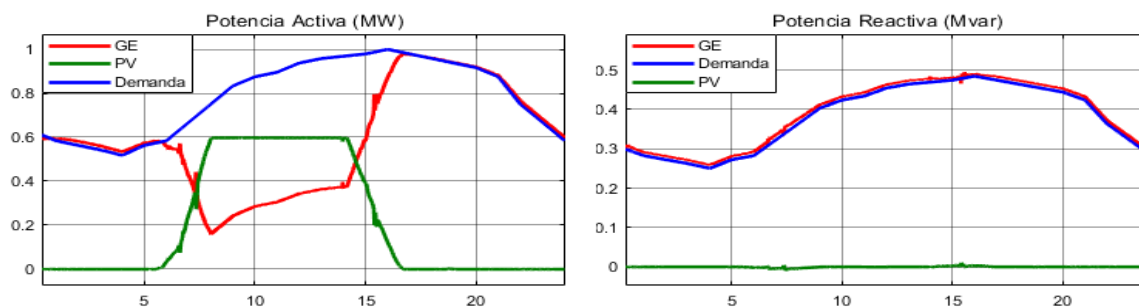


Fig. 6. Potencias activa y reactivas demandadas y generada en la microrred.
Fuente: Elaboración propia.

La generación total de potencia cubre a la demanda durante todo el tiempo, como se muestra en la figura 7, asegurando así, el suministro de energía necesaria hacia la carga.

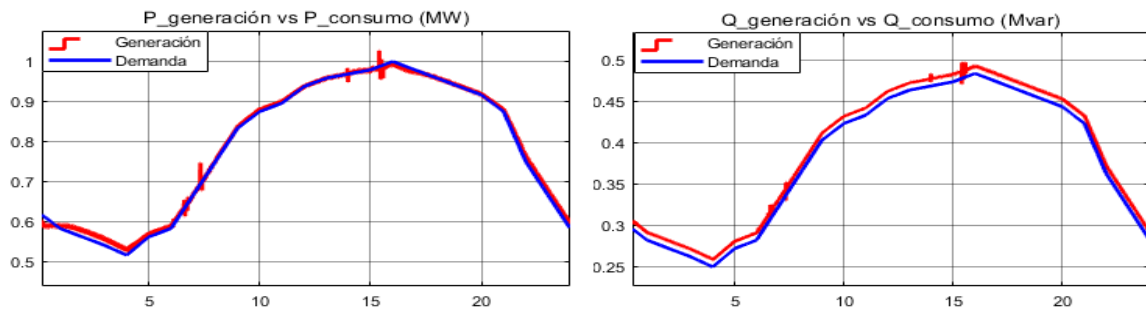


Fig. 7. Curvas de generación y demanda.
Fuente: Elaboración propia.

Los porcentajes de generación de las fuentes con respecto a la generación total se observan en la figura 8, donde la solar es limitada para cubrir un máximo de 80% de la demanda de potencia durante el horario desde las 9:30 am hasta las 12:30 pm, para evitar la desconexión del grupo. En la figura 9, se muestra el comportamiento sinusoidal de la corriente y la tensión en las barras de la microrred (Bus Carga, Bus GE, Bus PV 480 V) de la figura 1. En las gráficas de tensión se aprecia una distorsión en sus valores debido al transitorio provocado por la conexión y desconexión del grupo electrógeno. A la derecha se aprecia una vista ampliada de las formas de ondas.

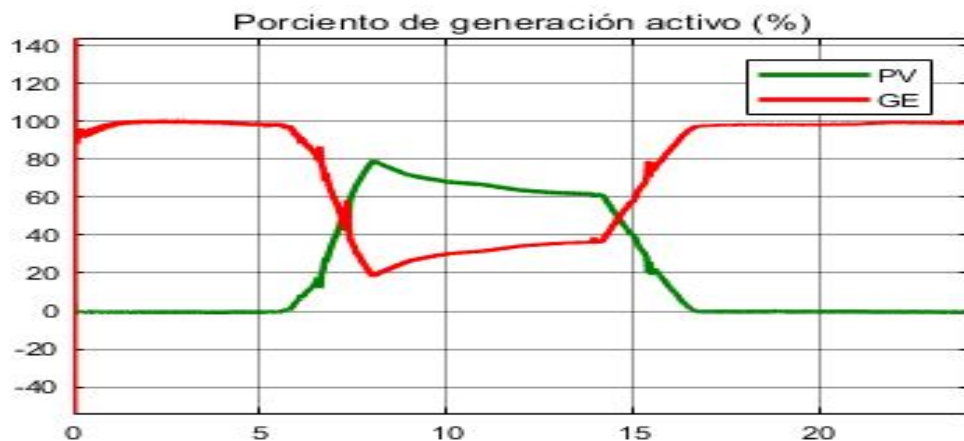


Fig. 8. Porcentajes de generación que representa cada fuente con relación a la total.
Fuente: Elaboración propia.

Caso de estudio 3: Desconexión de la microrred del SEN y entrada del grupo.

En este caso la microrred recibe alimentación a través del sistema eléctrico de potencia y del parque fotovoltaico mientras esta se encuentra conectada a la red. Luego, al aislarse del sistema eléctrico a través del interruptor SEP, el grupo electrógeno se encarga de entregar la energía demandada en la microrred que no puede ser suplida por el parque fotovoltaico. La frecuencia y la tensión en la microrred son establecidas por el sistema eléctrico o el grupo en el punto de conexión común dependiendo de cual esté en operación. En la figura 10, de muestran las potencias aportadas por las fuentes generadoras y la demandada por los consumidores de la microrred.

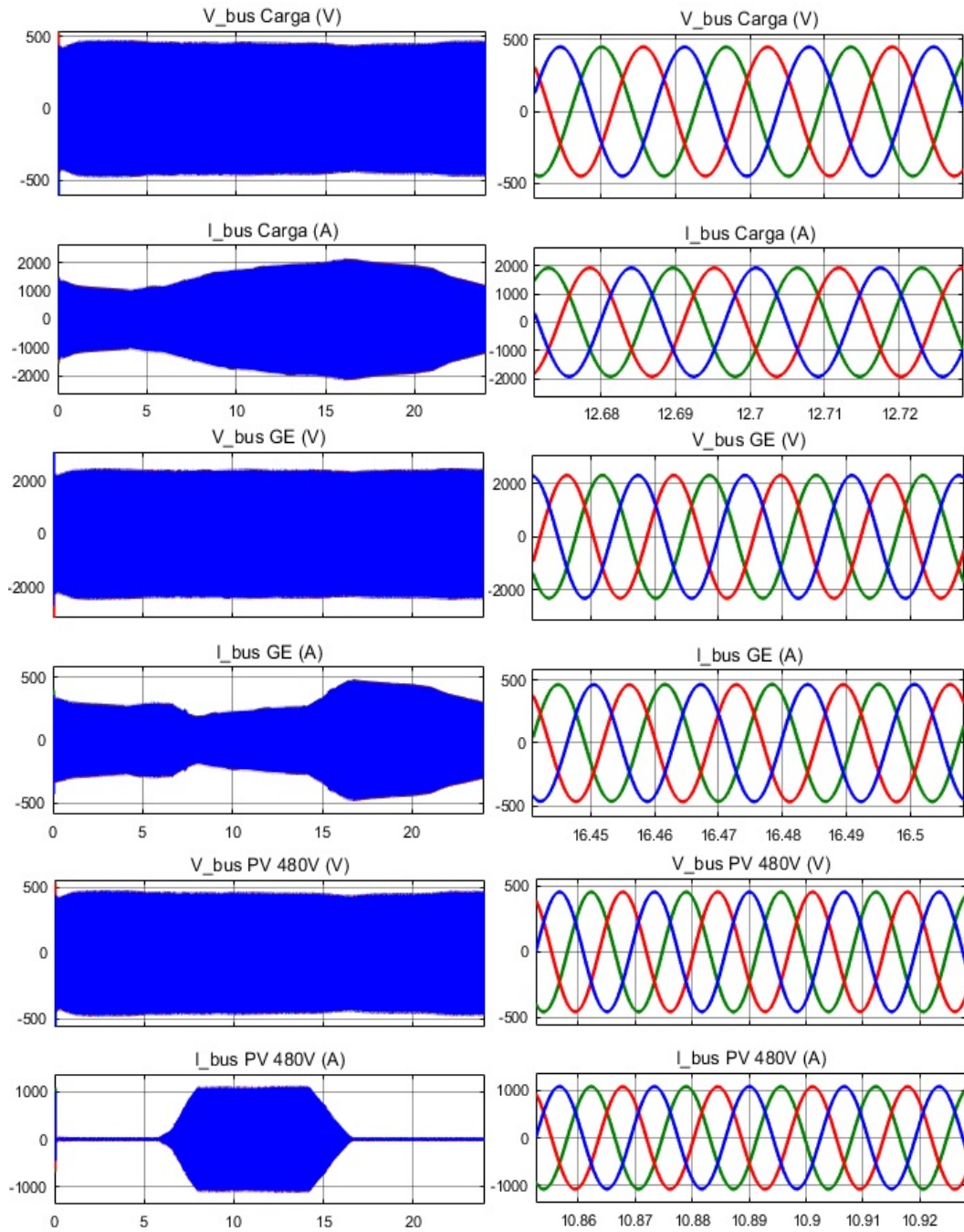


Fig. 9. Formas de onda de la tensión y la corriente en la microrred.
Fuente: Elaboración propia.

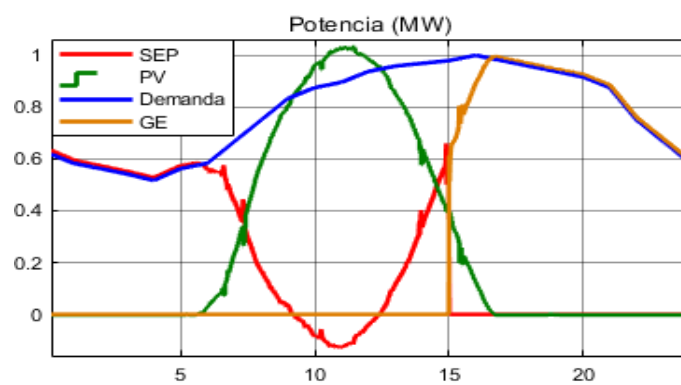


Fig. 10. Potencia activa demandada y generada en la microrred.
Fuente: Elaboración propia.

La carga recibe alimentación a través del sistema eléctrico hasta las 9:30 am, donde el flujo de potencia se invierte debido a que el parque fotovoltaico genera un excedente de potencia con relación a la demanda, este exceso fluye hacia otras cargas del sistema eléctrico hasta las 12:30 pm, donde nuevamente el sistema suministra energía hasta las 3:00 pm, horario donde ocurre la desconexión de la microrred con la red eléctrica. Luego, la demanda de potencia de los consumidores continúa siendo atendida por el grupo electrógeno. La desconexión del sistema podría ocurrir debido a que la red brinda un suministro con baja calidad de la energía, alguno de los parámetros del sistema no cumpla con las expectativas de las cargas, como respuesta a los precios de la energía o durante momentos de estrés del sistema, esto incluye horas picos, estado de alerta de la red, emergencia o recuperación del SEP. La demanda de potencia reactiva de los consumidores es aportada por la red eléctrica hasta las 3:00 pm de la tarde, y luego de la desconexión, el grupo electrógeno es el encargado de suplir esta demanda.

En la figura 11, se observan las curvas de generación de reactivo del grupo electrógeno, el parque fotovoltaico y la curva de demanda de reactivo. La generación total de potencia cubre a la demanda durante todo el tiempo, como se muestra en la figura 12, asegurando así el suministro de energía necesaria hacia la carga.

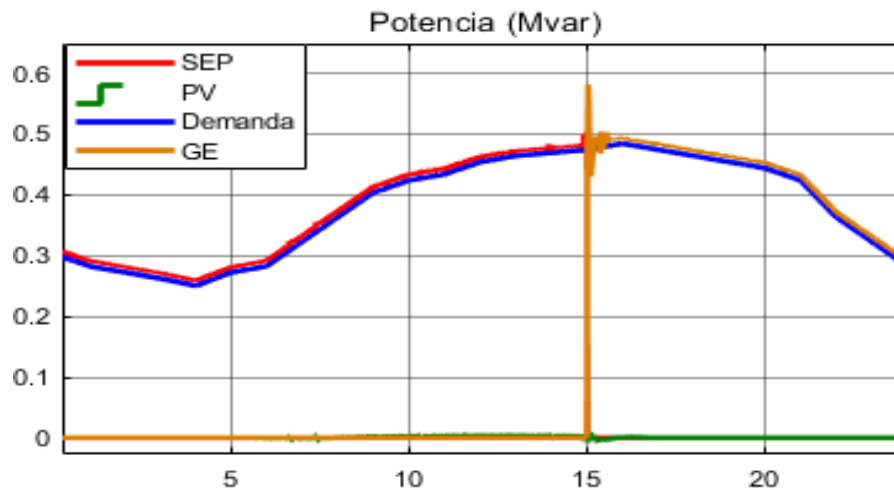


Fig. 11. Potencia reactiva demandada y generada en la microrred.
Fuente: Elaboración propia.

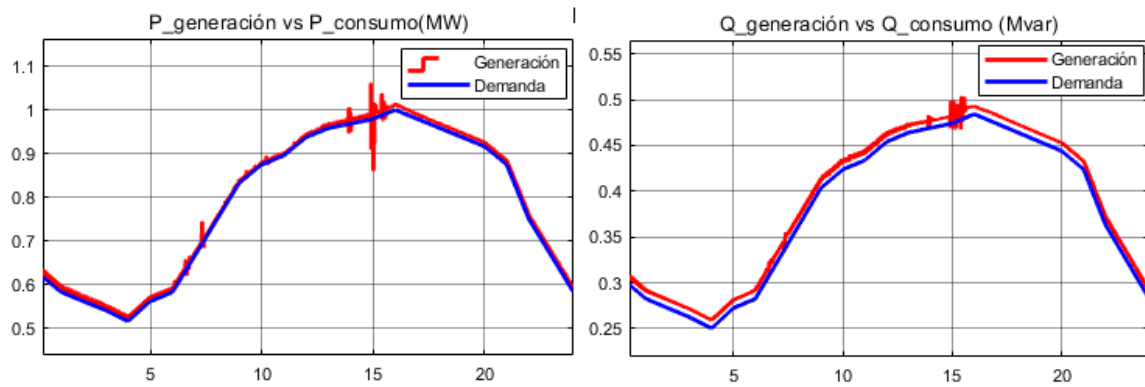


Fig. 12. Curvas de generación y demanda en la microrred.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 13, se muestra el comportamiento sinusoidal de la corriente y la tensión en las barras de la microrred (Bus Carga, Bus Microrred, Bus PV 480 V) de la figura 1. A la derecha se aprecia una vista ampliada de las formas de ondas.

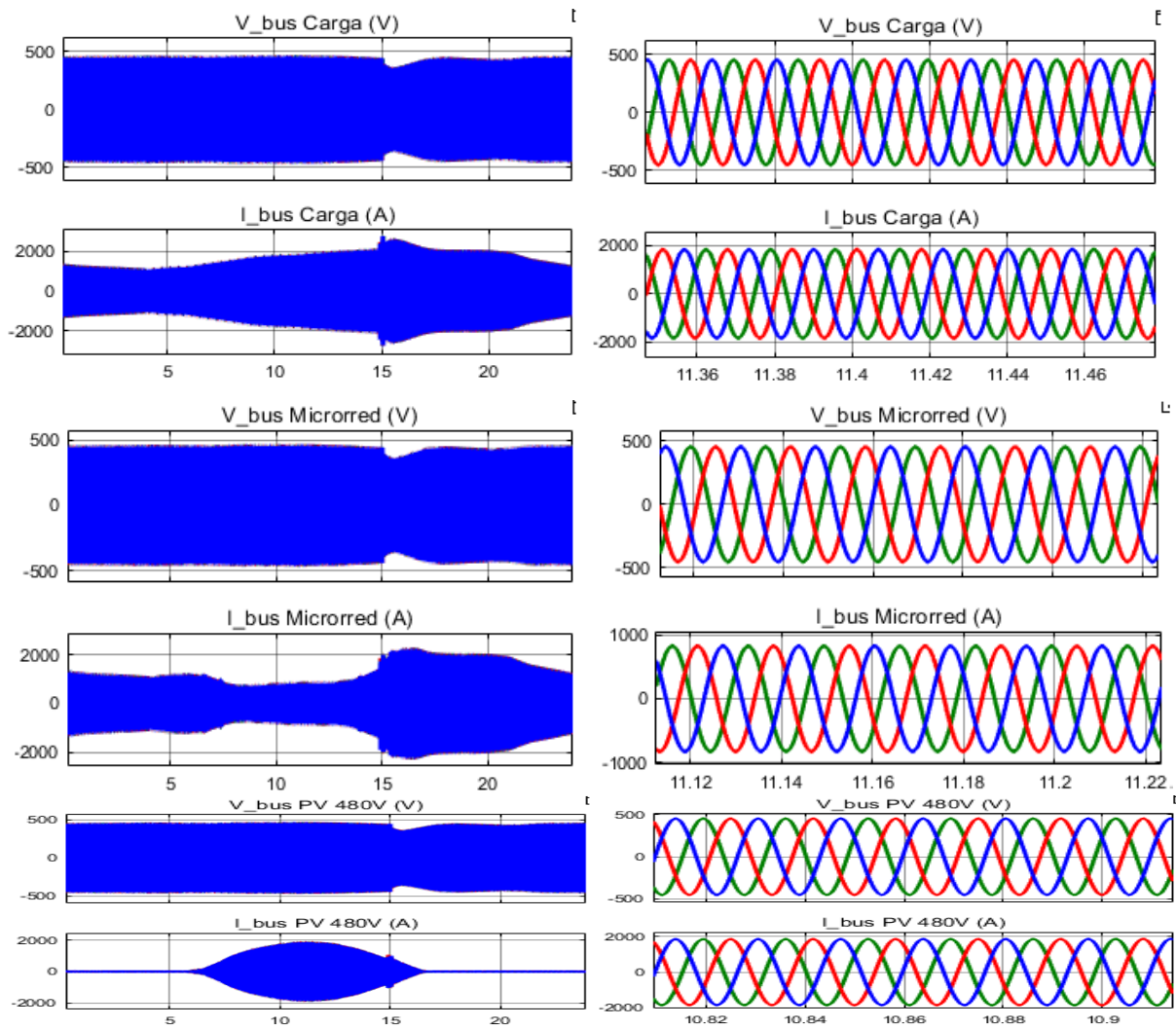


Fig. 13. Formas de onda de la tensión y la corriente en la microrred.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se logró modelar y simular satisfactoriamente diferentes condiciones de operación de una microrred conformada por un parque fotovoltaico de 1 MWp y un grupo electrógeno de 1,2 MVA para alimentar una carga con potencia nominal de 1 MW, definida por su curva de demanda diaria, ajustando las fuentes generadoras utilizadas a las condiciones de trabajo deseadas.

En todas las simulaciones realizadas se logró un correcto comportamiento de la microrred, desde el punto de vista de su operación, garantizando capacidad de autoabastecimiento con la participación activa de las fuentes renovables de energía, en este caso la energía solar y generadores de emergencia.

REFERENCIAS

- [1] BARAZARTE, Ronald Y. "La Batalla de las Corrientes: Edison, Tesla y el nacimiento del sistema de potencia". Universidad Tecnológica de Panamá. 2013, vol. 4, n. 1, p. 51-53. Disponible en: http://www.utp.ac.pa/documentos/2014/pdf/15_Batalla_de_las_corrientes.pdf
- [2] Salvador Escoda S.A. "Libro Blanco de las Energías Renovables". División de Energías Renovables, Edición 18.1, p. 50-220, 2017. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjNkpKf6-LwAhXfRTABHX8_BBUQFnoECAIQAA&url=https%3A%2F%2Fwww.salvadorescoda.com%2Ftecnico%2Fsolrar%2FLibro_Blanco_E_Renovables_Salvador_Escoda_18.1.pdf&usq=AOvVaw3zt6AjN2Z30nICieDpUzt_s
- [3] Castro, M. (2014). "Almacenamiento de energía para la regulación de frecuencia". Convención CUBAINDUSTRIA 2014. Palacio de las Convenciones de La Habana, La Habana, Cuba, junio de 2014. Disponible en: https://scholar.google.es/citations?user=pQcpkYcAAAAJ&hl=es&gmla=JsN-F4K_N8v6dCsteuhciWhC0EFjjVts6eQIVUJ4AGz5VRrqo3Yqc_qBfT7Jj9aTk1IGjVZKjYtbT2GMi77AmhN_Qd3D6bye5HULLYsYZ9ff773H4pX1s5DDG2RGY1qYRKzf493qk5z&sciund=7721072211988369205
- [4] Department of Economic and Social Affairs. "Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development". Sustainable Development Goals. Knowledge Platform. Disponible en: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>
- [5] Olivares D. E., *et al.* "Trends in microgrid control". IEEE Trans Smart Grid. 2014, vol. 5, n. 4, p. 1905–19. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/126993/Trends-in-Microgrid-Control.pdf?sequence=1>
- [6] Ton DT, Smith MA. "The US department of energy's microgrid initiative". Electro J. 2012, vol. 25, n. 8, p. 84-94. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1040619012002254>
- [7] Morales, JA. "Operación y Control de microrredes operando en modo aislado". Tesis de Diploma, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. 2015. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5472/621312M828.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8] IEEE 1547-2003 - IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. Disponible en: <https://standards.ieee.org/products-services/standards-related/pdf/electric-power-systems.html>
- [9] IEEE Standard 1547.2-2008. IEEE Application Guide for IEEE Std 1547 (TM), IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. Available at: https://standards.ieee.org/standard/1547_2-2008.html
- [10] National Instruments. "Efectos de las componentes proporcional, integral y derivativa de un algoritmo PID en la respuesta de un sistema," 26 Noviembre 2014. [En línea]. Disponible en: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/CCA38D5809BE9DF686257D9700679E22>
- [11] Task Force on Turbine-Governor Modeling. "Dynamic models for turbine-governors in power system studies". IEEE Power & Energy Society, 29 Enero 2013. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/272886545_Dynamic_Models_for_Turbine-Governors_in_Power_System_Studies
- [12] 421.5-1992-IEEE Recommended Practice for Excitation Systems Models for Power System Stability Studies, Standard 421.5-1992. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/182869>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Diandra Hernández Aróstegui: <http://orcid.org/0000-0003-3084-6341>

Participó en el diseño de la investigación, recolección de datos, modelación y simulación, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Fernando Miguel Herrera Venta: <http://orcid.org/0000-0001-9187-9038>

Participo en el diseño de la investigación, recolección de datos, modelación y simulación, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Miriam Vilaragut Llanes: <https://orcid.org/0000-0002-5453-1136>

Participo en el diseño de la investigación, recolección de datos, modelación y simulación, análisis de los resultados, revisión del borrador del artículo y en la aprobación final.

Vladimir Sousa Santos: <https://orcid.org/0000-0001-8808-1914>

Participo en la modelación y simulación, análisis de los resultados, revisión del borrador del artículo y en la aprobación final.