

Electrificación por microrredes en zonas rurales de la provincia del Azuay, Ecuador

Electrification by microgrids in rural areas of the Azuay province, Ecuador

Eletrificação por microrredes em áreas rurais da província de Azuay, Equador.

Diego Ochoa Ochoa¹, Christopher Ochoa Malhaber², Sergio Ochoa Ochoa³

Recibido: Mayo 2022

Aceptado: Noviembre 2022

Resumen. - La electrificación de zonas rurales es un tema cada vez más relevante, debido a que en ciertos casos no se dispone de la red eléctrica tradicional. Es por ello, que es motivo de estudio el uso de microrredes de energías renovables aplicadas a estas zonas. Es importante considerar el recurso energético disponible para así poder dimensionar adecuadamente el sistema de microrred, ya que ciertos sistemas no pueden ser viables. En este estudio, se proponen dos sistemas de microrredes de generación de energías renovables: el primero es un sistema eólico/fotovoltaico que trabaja con la radiación indirecta del sol [$\text{kWh/m}^2/\text{día}$] y la velocidad promedio del viento [m/s]; el segundo es un sistema netamente fotovoltaico que utiliza la radiación indirecta y la temperatura del sol, ambos sistemas son aislados y cuentan con un banco de almacenamiento energético (baterías), además tienen como carga a un consumidor rural residencial de 160 kWh/mes. Los sistemas son simulados y modelados en el software HOMER Pro. Los resultados indican que el sistema de microrred fotovoltaico es el más viable, ya que el lugar cuenta con bajas velocidades de viento y por lo tanto un sistema eólico no es viable.

Palabras clave: microrredes; comunidades rurales; generación eléctrica; energías renovables; HOMER Pro.

Summary. - *The electrification of rural areas is an increasingly relevant issue, since in some cases they do not have access to the traditional electricity grid. For this reason, the use of renewable energy microgrids applied to these areas is being studied. It is important to consider the available energy resource in order to adequately size the microgrid system, since certain systems may not be viable. In this study, two renewable energy generation microgrid systems are proposed: the first is a wind/photovoltaic system that works with the indirect radiation of the sun [$\text{kWh/m}^2/\text{day}$] and the average wind speed [m/s]; the second is a purely photovoltaic system that uses the indirect radiation and the temperature of the sun, both systems are isolated and have an*

¹ Ingeniero Eléctrico. Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador), dochoao@est.ups.edu.ec, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2188-8657>

² Ingeniero Eléctrico. Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador), cochoam2@est.ups.edu.ec, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7326-8273>

³ Ingeniero Mecánico Automotriz. Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador), sochoao@est.ups.edu.ec, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3970-553X>

energy storage system (battery bank), also have as load a rural residential consumer of 160 kWh/month. The systems are simulated and modeled in HOMER Pro software. The results indicate that the photovoltaic microgrid system is the most viable, since the site has low wind speeds and therefore a wind system is not viable.

Keywords: *microgrids; rural communities; electricity generation; renewable energies; HOMER Pro.*

Resumo. - *A eletrificação das zonas rurais é um tema cada vez mais relevante, pelo facto de em certos casos a rede elétrica tradicional não estar disponível. É por isso que o uso de microrredes de energia renovável aplicadas a essas áreas é motivo de estudo. É importante considerar o recurso energético disponível para dimensionar adequadamente o sistema de microrrede, uma vez que determinados sistemas podem não ser viáveis. Neste estudo são propostos dois sistemas de microrrede de geração de energia renovável: o primeiro é um sistema eólico/fotovoltaico que trabalha com a radiação indireta do sol [kWh/m²/dia] e a velocidade média do vento [m/s]; o segundo é um sistema puramente fotovoltaico que utiliza a radiação indireta e a temperatura do sol, ambos os sistemas são isolados e possuem banco de armazenamento de energia (baterias), também cobram de um consumidor rural residencial 160 kWh/mês. Os sistemas são simulados e modelados no software HOMER Pro. Os resultados indicam que o sistema de microrrede fotovoltaica é o mais viável, pois o local possui baixas velocidades de vento e portanto um sistema eólico não é viável.*

Palavras-chave: *microrredes; comunidades rurais; geração da eletricidade; energia renovável; HOMER Pro.*

1. Introducción. - El progreso tecnológico promueve la creación de nuevas técnicas para la generación de electricidad enfocadas al desarrollo sostenible con cero consumos de combustibles fósiles. Estas técnicas innovadoras proporcionan energía limpia y sustentable, siempre con la finalidad de operar a favor del ecosistema sin emisión de contaminantes [1]. Uno de los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) promueve el acceso a una energía asequible, segura y moderna, que según [2] una de cada 5 personas carece de este servicio moderno. La distribución eléctrica no siempre puede llegar abastecer a aquellos lugares de difícil acceso que por condiciones geográficas son una desventaja para el consumidor final [3]. Las microrredes son una alternativa viable en cuanto a servicio eléctrico en zonas aisladas; el montaje e instalación de equipos no requiere de una gran inversión como la que necesitaría un proyecto de gran escala [4].

Una microrred se enfoca en cubrir la demanda residencial individual o comunitaria de un determinado lugar, proporcionando electricidad a cualquier tipo de vivienda en general [5].

Un sistema Off-Grid ofrece distintas funcionalidades, como suministrar energía en lugares remotos en donde no cuenten con la red eléctrica tradicional, o para iluminar sitios pocos accesibles con iluminación tradicional u ornamental [6]. Un país en proceso de desarrollo como es el Ecuador, cuenta con un gran potencial de recursos derivados de aquellas fuentes de energía con origen renovable. Su zona geográfica compuesta por cordilleras, valles, islas, entre otros, permite aprovechar el flujo de aire y la irradiación solar como una solución práctica y sostenible para el país. Con este panorama se evidencia que la aplicación de las microrredes no es un reto cuando se trata de generación distribuida [7].

En la última década planificaron y construyeron importantes proyectos como la Central Eólica Villonaco y la Central Solar Isabela, situadas en las provincias de Loja y Galápagos, respectivamente, siendo Galápagos la que tiene un gran reto en la gestión del complejo sistema eléctrico, debido a que son islas remotas con una biodiversidad única en el mundo y donde los suministros tradicionales de energía son limitados, porque la mayor parte de esta zona está protegida [8]. Por ello, el actual gobierno ratifica el compromiso que tiene el país de apostar por nuevos métodos de generación renovable, al dar luz verde al proyecto eólico Minas de Huascachaca, provincia de Loja, Ecuador. Estudio realizado y gestionado en dos fases por la empresa ELECAUSTRO, la fase UNO se centra en la obra civil de carreteras y puentes; y la fase DOS se subdivide en A y B. La fase DOS A se enfoca en la construcción y puesta en marcha de la subestación Uchucay, mientras que la fase DOS B se ocupa del montaje de los aerogeneradores [9].

2. Desarrollo. – Esta sección describe el procedimiento utilizado para el desarrollo del estudio, comienza por la determinación de la zona (parroquia Checa.), la demanda existente, los recursos disponibles y las propuestas de microrredes. Es importante mencionar que las redes que electrifican a la parroquia, son propiedad de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur (EERCS). Sin embargo, para la dotación de servicios nuevos, dentro del área de concesión de la Empresa, La Jefatura Técnica analiza la factibilidad de una extensión de red. En ocasiones no se procede por que el usuario tiene la necesidad de optar por otra fuente de energía, diferente a la convencional.

2.1. Ubicación satelital de la provincia del Azuay. – Para iniciar la simulación, se marca el punto de referencia en el mapa, que proporciona la información geográfica correspondiente al lugar. El análisis se realiza en la parroquia Checa, situada en dirección norte del cantón Cuenca, que es una de las 15 parroquias rurales que posee la ciudad, en la provincia del Azuay. Ecuador.

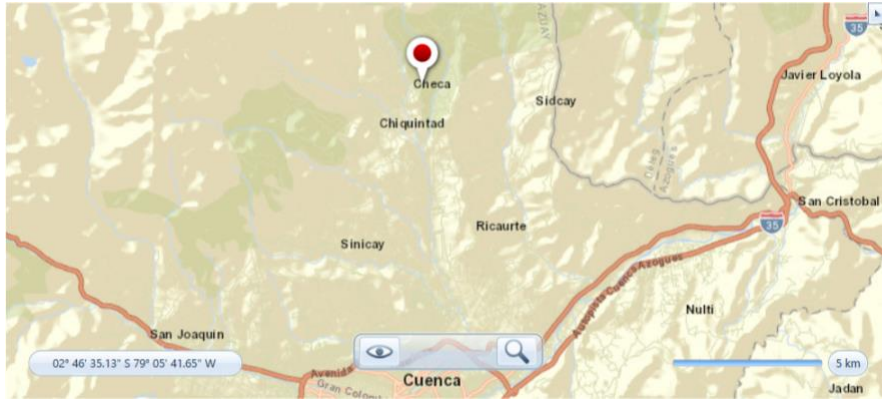


Figura I.- Ubicación satelital de la zona de estudio

2.2. Perfil de carga de la parroquia Checa. – En esta parroquia habitan alrededor de unas tres mil personas y se espera que para el año 2025 esta cifra aumente en un 6%, lo que indica que el perfil de carga este en constante crecimiento. La Figura II muestra el comportamiento de la demanda eléctrica residencial diaria, en la madrugada el consumo es mínimo porque las familias duermen. Pasada las 6:00 el consumo aumenta ligeramente hasta las 8:00 porque las familias se preparan para realizar sus actividades cotidianas fuera del hogar. Durante la jornada vespertina, la demanda se mantiene casi constate y a partir de las 18:00 se produce un pico máximo de la demanda [9].

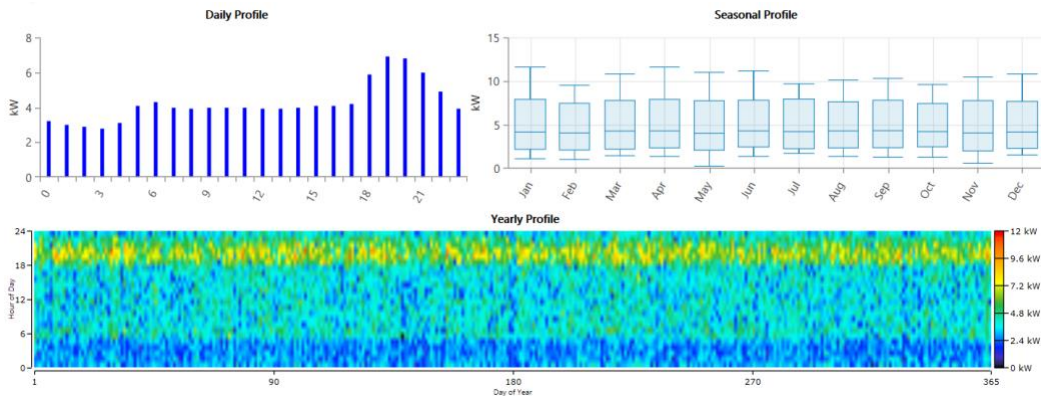


Figura II.- Perfil de carga residencial diario, mensual y anual de la zona de emplazamiento

2.3. Registro meteorológico de la parroquia Checa. – La plataforma NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resource) permite al usuario acceder a la base de datos meteorológicos de la parroquia y vincularlos internamente con el simulador. La Figura III muestra una radiación superior a los 4 kWh/m² por día para todos los meses y la Figura IV muestra una velocidad media de viento inferior a 6 m/s en los meses de julio y agosto, a pesar de ser catalogados como los meses de mayor afluencia.

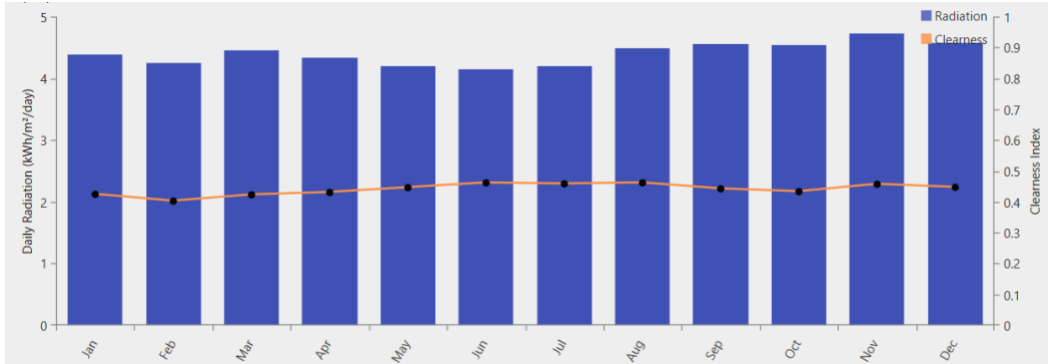


Figura III.- Radiación diaria [kWh/m²/día] de la zona de emplazamiento

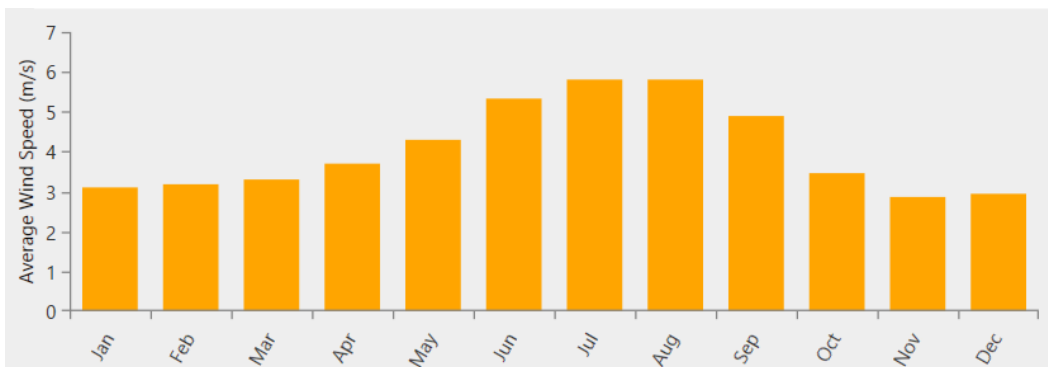


Figura IV.- Velocidad del viento promedio [m/s] de la zona de emplazamiento

2.4. Configuración microrred Eólico/FV. – Para el diseño se eligió un sistema híbrido formado por un micro aerogenerador de 1 kW y un arreglo de módulos FV de la misma potencia que la máquina eólica. También cuenta con un convertidor regulador que transforma y regula la tensión que entra en un conjunto baterías para el almacenamiento y transformación de la corriente para el suministro de energía, es decir cargar las baterías cuando existe generación y utilizar la energía almacenada cuando no la hay. Con este diseño, el sistema híbrido podrá llegar a abastecer una demanda de 11,27 kWh/día.

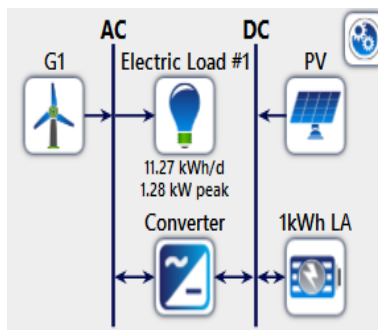


Figura V.- Configuración del sistema de microrred Eólico/FV

2.5. Configuración microrred FV. – En este segundo escenario se emplea un arreglo de módulos FV de 1 kW, un convertidor regulador y un banco de baterías de plomo ácido encargadas del almacenamiento de energía.

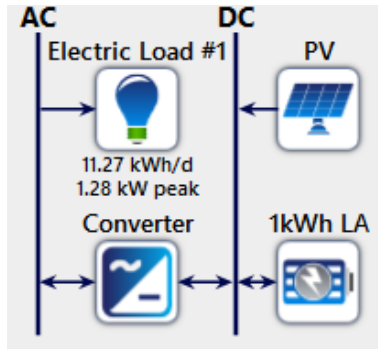


Figura VI. - Configuración del sistema de microrred FV

3. Resultados. – Considerando las restricciones de los recursos energéticos en la región, los resultados de las simulaciones de los sistemas de microrredes se muestran en tres puntos, el primero muestra las respuestas que obtuvo el sistema de microrred Eólico/FV, el segundo muestra la respuesta del sistema de microrred FV, y el tercero una comparativa de resultados entre los dos sistemas.

3.1. Microrred Eólico/FV. – En la Tabla I se presentan los costos por componente para el sistema de microrred Eólico/FV.

Componente	Costo de Capital	Costo de Reemplazo	Costo de O&M por año
Aerogenerador	\$ 5.000,00	\$ 4.500,00	\$ 1.000,00
Baterías	\$ 9.000,00	\$ 7.950,94	\$ 900,00
Paneles FV	\$ 9.628,59	\$ 9.310,00	\$ 962,80
Sistema Convertidor	\$ 354,25	\$ 354,25	\$ 35,43

Tabla I.- Costos para el sistema de microrred Eólico/FV

La Figura VII muestra la producción de energía mensual por sistema de generación en [MWh], en donde se aprecia que la mayor producción es por el sistema de generación fotovoltaico, esto se debe a que en la irradiación solar se mantiene más o menos constante a lo largo del año y la generación de energía no tiene una gran variación. En cambio, para el sistema de generación eólico, se presentan irregularidades en las velocidades del viento, lo que se traduce como menores producciones de energía; es en los meses de mayo hasta septiembre en donde se ve una leve generación.

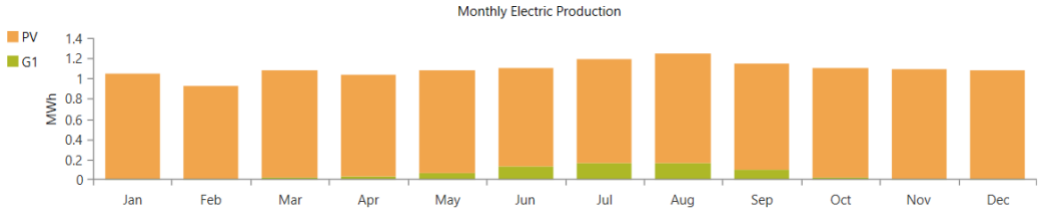


Figura VII.- Producción de energía [MWh] mensual por sistema, microrred Eólico/FV

La Figura VIII muestra la producción de energía anual por sistema de generación, por paneles fotovoltaicos y por turbina eólica, en donde se aprecia que la producción no solo es mayor (en valor medio) sino que también tiene menos variabilidad intra-diaria y en el período completo de simulación.

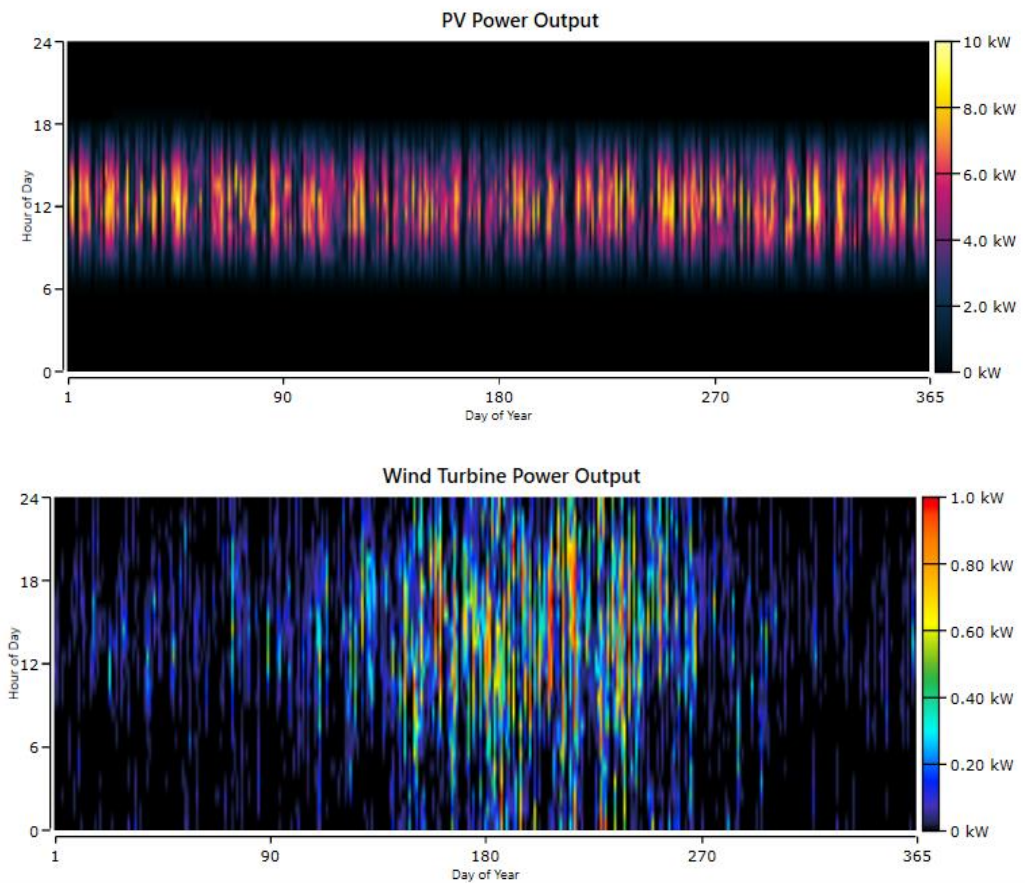


Figura VIII.- Producción anual por paneles fotovoltaicos y por turbina eólica, microrred Eólico/FV

La Figura IX muestra el estado de carga anual del conjunto de baterías, se aprecia que cambia considerablemente durante cada día. Debido a que las baterías deben de trabajar en los límites más altos durante mucho tiempo, porque tienen que recargarse con el sistema de microrred y durante la noche tienen que suministrar la energía a las cargas.



Figura IX.- Carga del conjunto de baterías, microrred Eólico/FV

3.2. Microrred Eólico/FV. – En la Tabla II se presentan los costos por componente para el sistema de microrred FV.

Componente	Costo de Capital	Costo de Reemplazo	Costo de O&M por año
Baterías	\$ 9.000,00	\$ 8.647,16	\$ 900,00
Paneles FV	\$ 10.838,77	\$ 9.650,00	\$ 1.083,88
Sistema Convertidor	\$ 391,12	\$ 391,12	\$ 39,11

Tabla II.- Costos para el sistema de microrred FV

La Figura X muestra la producción de energía mensual [MWh] por el sistema de generación fotovoltaico, la irradiación solar se mantiene más o menos constante a lo largo del año y la generación de energía no tiene una gran variación. El sistema funciona adecuadamente y puede suministrar de energía al consumidor e inclusive presenta excesos de producción.

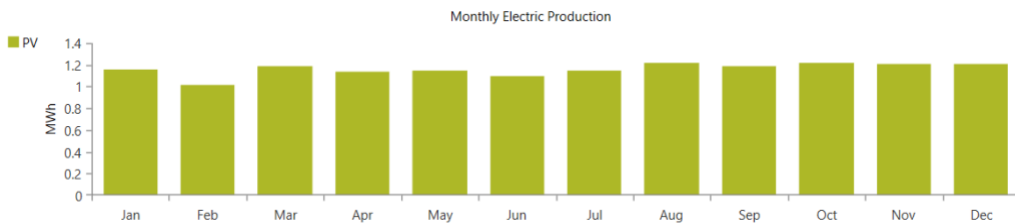


Figura X.- Producción de energía [MWh] mensual por sistema, microrred FV

La Figura XI muestra la producción de energía anual por paneles fotovoltaicos, en donde comparando con el sistema anterior, se ve una semejanza en cuanto a producción de energía.

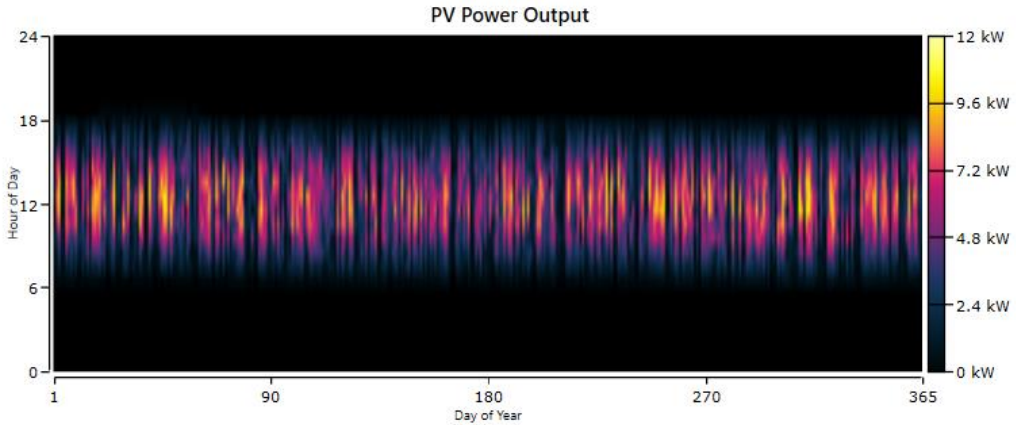


Figura XI.- Producción anual por paneles fotovoltaicos, microrred FV

La Figura XII muestra el estado de carga anual del conjunto de baterías, se aprecia un estado de carga similar al conjunto anterior. En donde las baterías deben trabajar en el estado de carga más alto posible, afectando la vida útil de las mismas y produciendo desgastes en la cargabilidad, al estar continuamente cargándose y descargándose para poder suministrar de energía al usuario consumidor. Una forma de mitigar este impacto es mantener las baterías entre el 20 y el 80% de carga, así no soportan mucho estrés ni desgaste.

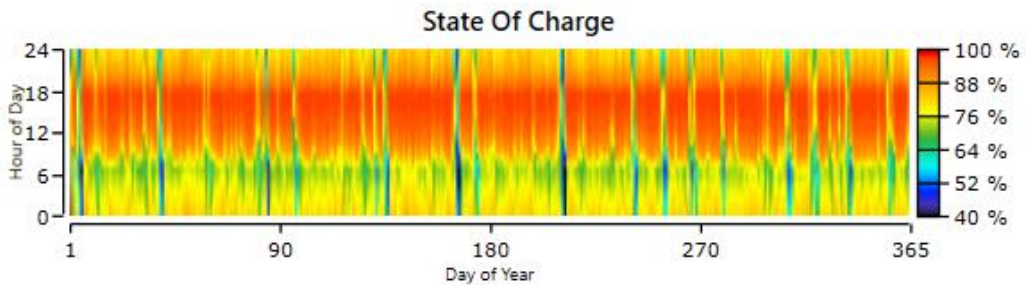


Figura XII.- Carga del conjunto de baterías, microrred FV

3.3. Comparación de los dos sistemas de microrredes. – En la Tabla III se presenta los resultados de los dos sistemas de microrredes, el Eólico/FV y el solo FV. Se muestran los valores de NPC [M\$], que es el coste actual neto o coste del ciclo de vida de un componente y es el valor actual de todos los costes de instalación y funcionamiento del componente a lo largo de la vida del proyecto, menos el valor actual de todos los ingresos que obtiene a lo largo de la vida del proyecto. HOMER calcula el NPC de cada componente del sistema y del sistema en su conjunto. Además del COE [\$/kWh], que es el coste nivelado de la energía, HOMER lo define como el coste medio por kWh de energía eléctrica útil producida por el sistema. Por último, se muestra los valores de costo de capital de los sistemas en miles de dólares [k\$], la producción por paneles fotovoltaicos [kW] y por el aerogenerador [kW] y la capacidad de almacenamiento del conjunto de baterías [kWh].

Caso	Eólico/FV	FV
NPC [M\$]	0.06	0.04
COE [\$/kWh]	1.18	0.89
Costo Capital [k\$]	23.98	20.23
Paneles FV [kW]	9.63	10.8
Aerogenerador [kW]	1	0
Baterías [kWh]	30	30

Tabla III.- Resultados de los sistemas de microrredes Eólico/FV y FV

4. Conclusiones. - Este estudio presentó el modelado de dos sistemas de microrred de energías renovables en el software HOMER Pro: uno híbrido, eólico/fotovoltaico (Eólico/FV) y otro únicamente fotovoltaico (FV), como solución práctica para la electrificación de zonas rurales de la provincia del Azuay, Ecuador. En cada escenario se evalúa el alcance del proyecto en términos de producción, almacenamiento y coste de inversión del proyecto. Los resultados revelan un NPC de 0.06 M\$ y un COE de 1.18 \$/kWh para la configuración de microrred Eólico/FV, un NPC de 0.04 k\$ y un COE de 0.89 \$/kWh para la configuración de microrred FV. Por lo tanto, en términos de coste, el sistema de microrred más conveniente será el de configuración de microrred FV.

Al tratarse de proyectos de energías renovables, están limitados a las condiciones meteorológicas del lugar y las mismas pueden variar dependiendo de la época del año, lo que provoca variaciones en la generación, por lo que se consideró optar por un almacenamiento en baterías para almacenar la energía disponible y que esté lista para su empleabilidad. Se utilizó el software HOMER Pro para ajustar los sistemas, creando escenarios de modos de funcionamiento que analizan la producción y el almacenamiento de energía. A la hora de evaluar este tipo de proyectos, se analiza que tanto capital se necesita (y que tanto tiempo también) para integrar una carga pequeña a una red de distribución tradicional, depende del punto más cercano disponible y viable técnicamente para la conexión. Hay otros factores en juego, que no son considerados aquí pero que también son importantes como, por ejemplo: La tarifa de energía eléctrica que se le reconoce al distribuidor y la calidad de servicio técnico y de producto técnico que le aplica en la región. El balance de estos factores hace inviable la alimentación desde una red convencional, en función de la cercanía/lejanía del punto de conexión viable más cercano de la red. Por último, las microrredes se adaptan con facilidad a distintos entornos geográficos, facilitando el despacho de energía a las comunidades rurales de la provincia del Azuay.

5. Referencias

- [1] M. S. R. Molina, D. X. O. Ochoa and F. A. Q. Palomeque, "Comparative analysis of wind and solar micro-generation for an Off Grid system in the city of Cuenca-Ecuador," 2021 IEEE URUCON, 2021, pp. 122-126, doi: 10.1109/URUCON53396.2021.9647295.
- [2] ARCONEL. *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2019*, 2019.
- [3] D. Ochoa and M. Ronquillo, "Análisis y reacondicionamiento del sistema de generación híbrido (eólico-fotovoltaico) aislado de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca" 2021. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21283>.
- [4] J. Clairand, H. Chinchero-Villacís, X. Serrano-Guerrero and A. Gonzalez-Zumba, "Microgrids as Electrification Alternatives for the Amazon Region in Ecuador," 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2019, pp. 4286-4291, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881594.
- [5] C. Anzures, J. Posada, K. Osorio, J. R. Vidal Medina, V. M. Sanchez and Y. U. Lopez, "Operación de Sistemas de Generación y Suministro de Energía Eléctrica en Zonas no Interconectadas de Colombia," 2018 IEEE ANDESCON, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564585.
- [6] Serrano-Guerrero, X., Ochoa-Malhaber, C., & Ortega-Romero, I. Procedure of the design of photovoltaic systems applied to ornamental lighting. (2022). *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 20, 393-398. <https://doi.org/10.24084/repqj20.320>
- [7] R. M. Schierloh, J. L. Godoy, F. M. Vincitorio and J. R. Vega, "Simulación y Análisis de Fallas Eléctricas en una Microrred Aislada con Integración de Generación Fotovoltaica y Almacenamiento en Baterías [Not available in English]," 2021 IEEE URUCON, 2021, pp. 138-142, doi: 10.1109/URUCON53396.2021.9647183.
- [8] C. Ochoa-Malhaber, D. Ochoa-Ochoa, X. Serrano-Guerrero and A. Barragán-Escandón, "Technical-economic comparison of microgrids for rural communities in the island region of Galapagos, Ecuador: Isabela Island case," 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/ARGENCON55245.2022.9939813.
- [9] "Proyecto Eólico Minas de Huascachaca (PEMH)" 2022. <https://www.elecaustro.gob.ec/proyectos/proyecto-eolico-minas-de-huascachaca/> (accessed May. 10, 2022).
- [10] P. D. Robles Lovato, *Optimización y planificación de sistemas eléctricos*. Cuenca, 2020.

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

JOO ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

COM ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

SOO ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.