

Sustainability Analysis of the Electrical Microgrids Projects in Peru

Juan Carlos Quispe ¹, Angel E. Obispo ², and Francisco Javier Alcántara ³

^{1,3}Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú

C21675@utp.edu.pe

Abstract– Due to the impacts of climate change, one of the most promising strategies is to promote the intelligent use of technology based on renewable energy sources. One such strategy is the development of small-scale electrical systems, known as microgrids, which have the capability to utilize these clean energy sources. This paper analyzes 37 case studies from remote locations in Peru to determine the optimal design of microgrids (MG) and their environmental impact, while taking into consideration associated costs, geographic location, and demand characteristics. To achieve this goal, an optimization process is carried out using the HOMER Pro software, which aims to size the microgrid to the minimum net present value. This analysis considers five scenarios: demand connected only to the grid, MG connected to the grid without energy sale price, MG connected to the grid with energy sale price, isolated MG system, and isolated demand with a diesel generator. Subsequently, a calculation process is conducted using MATLAB software to map, calculate, and compare the emissions of each case.

Keywords– Microgrid, Environment, Renewable energy sources, Sustainable.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Análisis de sostenibilidad de los proyectos de microrredes eléctricas en Perú

Juan Carlos Quispe ¹, Angel E. Obispo ², and Francisco Javier Alcántara ³

^{1,3}Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú

C21675@utp.edu.pe

Resumen—Debido a los impactos del cambio climático, una de las estrategias más prometedoras es el uso inteligente de tecnologías basada en fuentes de energía renovables. Una de estas estrategias es el desarrollo de sistemas eléctricos a pequeña escala, conocidos como microrredes, que tienen la capacidad de utilizar estas fuentes de energía limpia. Este trabajo analiza 37 casos de estudio de localidades remotas de Perú para determinar el diseño óptimo de microrredes (MG) y su impacto ambiental, teniendo en cuenta los costos asociados, la ubicación geográfica y las características de la demanda. Para lograr este objetivo, se lleva a cabo un proceso de optimización utilizando el software HOMER Pro, cuyo fin es dimensionar la microrred al mínimo valor actual neto. Este análisis considera cinco escenarios: demanda conectada únicamente a la red, MG conectada a la red sin precio de venta de energía, MG conectada a la red con precio de venta de energía, sistema MG aislado, y demanda aislada con un generador Diesel. Posteriormente, se lleva a cabo un proceso de cálculo utilizando el software MATLAB para mapear, calcular y comparar las emisiones de gases contaminantes en cada caso.

Palabras clave—Microrred, Medio ambiente, Fuentes de energía renovables, Sostenible.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las tecnologías de generación de electricidad basadas en fuentes de energía renovables (FERs) se han destacado como una alternativa de solución contra el cambio climático. Además, a diferencia de las fuentes de energía basado en combustibles fósiles, las FERs pueden aprovechar el recurso energético mediante un costo cero, por lo que representa el futuro de la matriz energética de las redes eléctricas. Sin embargo, para un aprovechamiento eficiente de esta tecnología, se requiere un sistema integrado y coordinado inteligente [1]. Además, que incursione con las nuevas tecnologías de información y comunicación [2]. Un modelo representativo de este sistema eléctrico es la denominada microrred o microgrid (MG) en inglés. La MG se define como un conjunto de fuentes híbridas de generación, almacenamiento y sistemas de carga que se conectan eléctricamente y se gestionan como una única unidad, y son capaces de operar también de manera aislada [3], [4]. Su implementación ha aumentado significativamente, especialmente en zonas remotas que no tienen conexión directa a la red eléctrica, presentan largos periodos de interrupción del suministro o una mala calidad del servicio eléctrico. Además, la MG requiere que estas zonas tengan potencial para la explotación de recursos naturales

renovables con el fin de preservar el medio ambiente [5], [6]. Esto provoca el uso excesivo de fuentes que generen altos niveles de contaminación ambiental.

Para obtener la configuración óptima de los sistemas energéticos híbridos, es necesario utilizar herramientas de optimización para evaluar diferentes escenarios. En este sentido, existen métodos para dimensionar los componentes del sistema, como Hybrid Optimization of Multi-Energy Resources (HOMER) [7]. Por lo que gracias a este análisis es posible determinar la reducción del impacto ambiental. En [8] se simuló una MG para dos zonas costeras de Bangladesh y se realizó un análisis de sensibilidad variando la demanda de carga; el resultado representó una reducción de las emisiones de dióxido de carbono con 6.666,47 kg/año. Además, en Hainan se ha implementado una MG cuyo diseño proporciona grandes beneficios económicos y medioambientales en comparación con el modelo tradicional [9]. Otro estudio reveló que el sistema fotovoltaico (FV) - eólico (WT) - diésel (DS) puede reducir las emisiones de CO₂ en un 70% con respecto a los generadores diésel [10]. En un análisis similar centrado en la región de Malasia, se concluyó que la configuración óptima obtenida del sistema híbrido eólico, Diesel y baterías (BBS), en comparación con el sistema sólo Diesel, reduce las emisiones de CO₂ en 2.861,113 kg/año [11].

En general, las configuraciones híbridas para una MG están formadas por sistemas de baterías, fotovoltaicos y aerogeneradores desde un punto de vista económico y medioambiental. Además, el comportamiento particular de la demanda, tasa de descuento, precio de la energía, irradiancia solar y entre otros, son parámetros que varían y afectan el diseño de las MG. En ese sentido, en este trabajo se realiza el diseño óptimo de MGs, mediante el uso del Homer pro, para diferentes zonas remotas del Perú con electrificación precaria y en base a ello determinar la reducción de emisiones, luego se determina el mapeo los casos de estudio destacando la localización más efectiva para la inversión y menor contaminación de las MG. Para este análisis se comparan diferentes escenarios: Un sistema eléctrico convencional conectada a la red, un sistema de MG conectado a la red, un sistema MG aislado y el sistema eléctrico aislado.

II. CARACTERÍSTICAS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Se han seleccionado 37 casos de estudio en lugares representativos del Perú. Las coordenadas geoespaciales de cada caso se muestran en la Figura 1. Además, para identificar

las características de las zonas peruanas, se identifican ciertas divisiones geográficas como costa, Andes y Amazonía. La costa se caracteriza por pertenecer a territorios muy cercanos al litoral marítimo. Los Andes se caracterizan por pertenecer a la cordillera, con lugares a gran altitud sobre el nivel del mar. Por último, la Amazonia corresponde a la selva tropical y abarca la mayor parte de la cuenca del río Amazonas. Esta caracterización de las zonas es muy importante, ya que permite identificar similitudes en las condiciones climáticas, las actividades económicas e incluso los hábitos de vida.



Fig. 1 Distribución geográfica de los estudios de caso en el mapa de Perú.

A. Potencial de generación solar

Esta información se obtiene de la NASA [12]. En base a la información extraída, la costa sur y los Andes de Perú tienen un alto potencial de energía solar. En contraste, la magnitud de la irradiación de toda la zona amazónica tiene menores niveles.

B. Estimación de la demanda

Los perfiles de carga pueden clasificarse según los tipos de usuarios. Este trabajo se centra principalmente en las demandas residenciales porque representan el mayor porcentaje de la demanda en las zonas remotas y su factibilidad en la implementación de las MG. En este sentido, estas cargas pueden ser categorizadas de acuerdo al tipo de usuarios descritos en la guía para la formulación de proyectos de electrificación rural desarrollada por el Ministerio de Economía y Finanzas [13] y resumidos en la Tabla 1.

TABLA I
VALORES REFERENCIALES DEL CONSUMO ENERGÉTICO RESIDENCIAL

Región geográfica	Tipo 1: Consumo de energía (kWh/mes)	Tipo 2: Consumo de energía (kWh/mes)
Costa	19 – 30	10 – 18
Andes	17 – 25	08 – 16
Amazonia	20 – 35	12 – 20

1) Estimación del perfil diario de demanda:

A partir del rango de magnitudes de consumo eléctrico para cada región y tipo de carga, se determinan los perfiles de demanda típicos de un grupo de usuarios residenciales en las zonas de estudio. En este sentido, surgen 6 características, para las cuales se determina la potencia activa aleatoria dentro del rango definido por la Tabla 1. Con estos datos, se obtiene el comportamiento de la demanda para todos los casos de estudio, tal y como se muestra en la Figura 2.

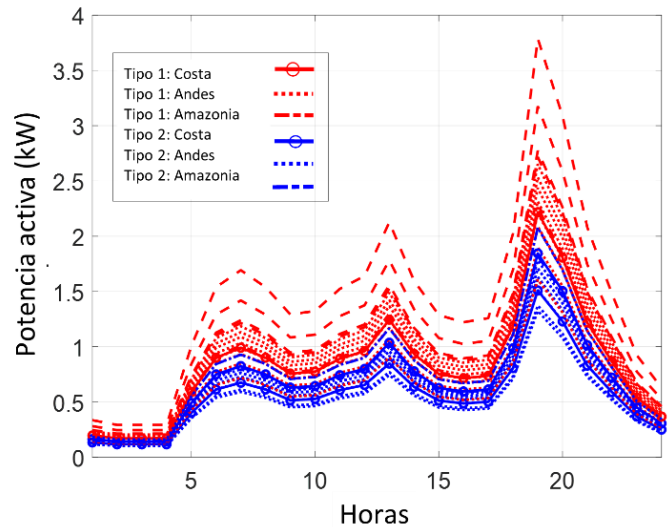


Fig. 2 Perfil diario de la demanda de zonas residenciales rurales.

III. MÉTODOS

Para el desarrollo de simulaciones de optimización de recursos de una MG, se utiliza el software especializado HOMER Pro, el cual es una herramienta de aplicación producida por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables para realizar estudios de viabilidad técnico-económica, análisis de sensibilidad y optimización [6]. El proceso comienza con la formulación del problema de optimización, que implica la identificación de la función objetivo y las restricciones. La función objetivo consiste en el coste actual neto total (CPNT), que es la suma de los siguientes costos: capital, remplazo, operación y mantenimiento, y combustible. En cuanto a las restricciones, se considera el balance de potencia, la carga o descarga de la batería, la restricción de límite inferior y superior para los sistemas de generador y batería.

A. Análisis de simulación

El funcionamiento de un sistema MG se simula utilizando estimaciones de balances energéticos horarios para cada año.

Además, la evaluación se realiza considerando ciertos factores como: los costos asociados, tipo de interés, tasa de inflación, entre otros. Las entradas al simulador son: distribución horaria de la carga, recursos renovables, coste de la energía, sistema de almacenamiento, especificaciones técnicas de la generación y especificaciones técnicas del convertidor AC/DC. El software HOMER Pro genera una lista de configuraciones viables basadas en el espacio de búsqueda especificado por el usuario. Calcula las emisiones de los seis contaminantes siguientes: Dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (UHC), partículas en suspensión (PM), dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NOX). Además, las emisiones de estos contaminantes son el resultado de la producción de electricidad por los generadores, la producción de energía térmica por una caldera y el consumo de electricidad de la red. El modelo de las emisiones de los generadores y de la caldera son de forma similar, ya que ambos consumen combustible de propiedades conocidas.

1) Generadores y caldera

Se determina las emisiones (kg de contaminante emitido por unidad de combustible consumido) de cada contaminante antes de simular el sistema eléctrico. Tras la simulación, calcula las emisiones anuales de ese contaminante multiplicando el factor de emisión por el consumo anual total de combustible.

Se especifican los factores de emisión de cuatro de los seis contaminantes: CO, UHC, PM y NOX. A partir de estos valores y del contenido de carbono y azufre del combustible, se determina los factores de emisión de los dos contaminantes restantes (CO₂ y SO₂). Se utiliza tres hipótesis principales: todo el carbono del combustible que no se emite como monóxido de carbono o hidrocarburos no quemados se emite como dióxido de carbono, la fracción de carbono de las emisiones de hidrocarburos no quemados es la misma que la del combustible, todo el azufre del combustible quemado que no se emite como partículas se emite como dióxido de azufre.

2) Red.

Para calcular las emisiones de un sistema conectado a la red de cada contaminante, se multiplica las compras netas a la red (en kWh) por el factor de emisión (en g/kWh) de cada contaminante. Si el sistema vende más energía a la red de la que le compra a lo largo del año, las compras netas a la red son negativas y también lo son las emisiones de cada contaminante relacionadas con la red.

B. Metodología

La producción de energía y el costo de la energía se extraen de la simulación mediante el Homer; a continuación, se determina la emisión para cada caso en el sistema conectado a la red (on-grid) y fuera de la red (off-grid). El mismo análisis se lleva a cabo considerando el precio de venta a la red como variable de sensibilidad. Por lo tanto, el impacto ambiental de cada escenario se desarrolla comparándolo con el sistema base, el cual consiste en un sistema alimentado únicamente por la red

y un sistema alimentado únicamente por un generador diésel. Este proceso se muestra en la Figura 3 y se consideran los siguientes escenarios:

- Escenario 1: Demanda sólo conectada a la red.
- Escenario 2: MG conectada a la red sin precio de retorno a la red.
- Escenario 3: MG conectada a la red con precio de retorno a la red.
- Escenario 4: Sistema MG sin conexión a la red.
- Escenario 5: Carga fuera de la red sólo con generador diésel.

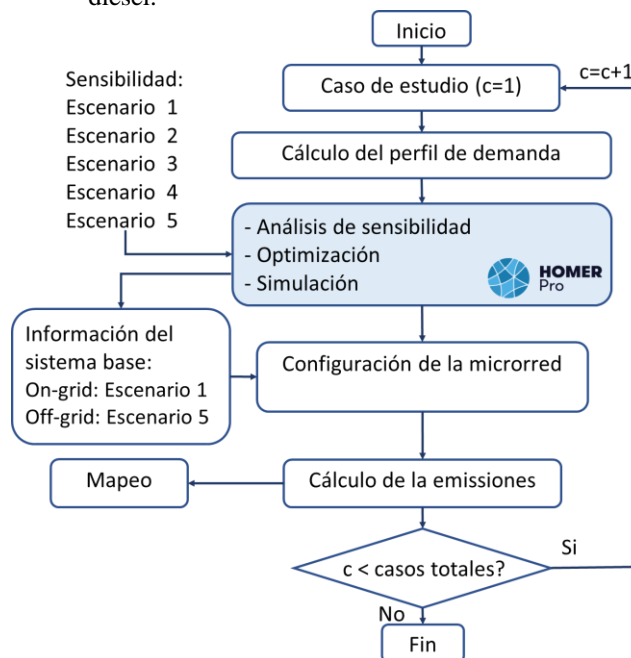


Fig. 3 Proceso de cálculo de las emisiones en todos los casos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se analizan los resultados de los 37 casos de estudio. Para ello, se consideran los siguientes valores de entrada y se utilizan las mismas características del sistema MG en todos los estudios de casos:

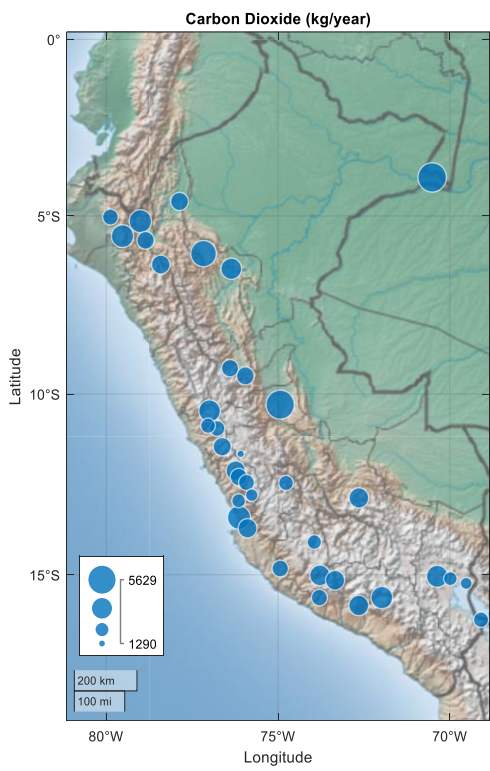
- La vida útil del sistema MG propuesto: 25 años.
- El tipo de interés: 8%.
- Tasa de inflación: 2%.
- Los recursos solares medios de las ubicaciones seleccionadas: Banco de datos de meteorología y energía solar de la NASA.
- Perfil de la demanda de los casos prácticos
- Coste energético de los casos prácticos: Carga energética de 0,106 \$USD/kWh.
- Precio del combustible (USD\$/L): 1,18

Según las simulaciones de todos los casos prácticos, los valores de TNPC para todas las configuraciones se extraen en orden ascendente. Los resultados muestran que las principales configuraciones de sistemas híbridos en modo conectado a la

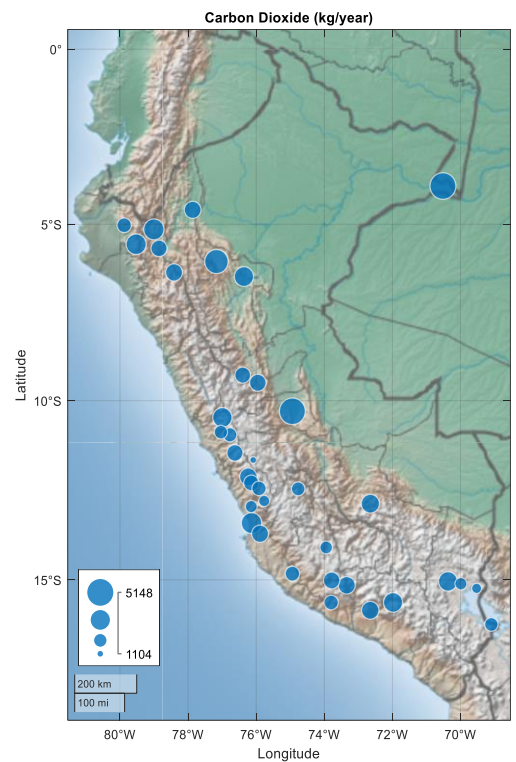
red son: PV-Red, PV-BBS-Red, PV-WT-Red y PV-BBS-WT-Red, y la configuración óptima en modo aislado de la red es PV-BBS-DS.

A. Resultados del impacto ambiental

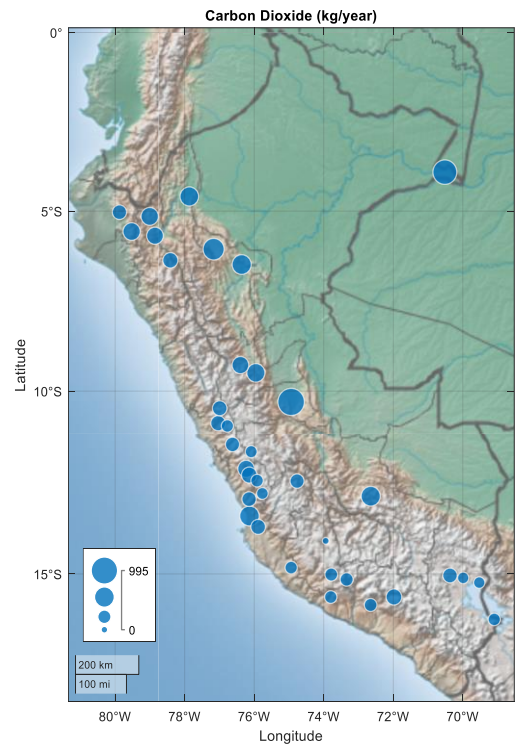
Este análisis incluye las emisiones de dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. Las emisiones del sistema se obtienen a partir del resultado de la simulación del software HOMER Pro para conocer la cantidad de cada tipo de contaminante producido anualmente por el sistema eléctrico en kg/año. La Figura 4 muestra las cantidades de emisiones de dióxido de carbono para todos los casos mapeados en Perú. Se puede identificar que las proporciones más altas se encuentran en las zonas amazónicas, mientras que las proporciones más bajas se encuentran en las zonas de los Andes y el sur del Perú. Además, se puede observar que el escenario 5 tiene altas cantidades de emisiones debido a la alta participación del generador diesel.



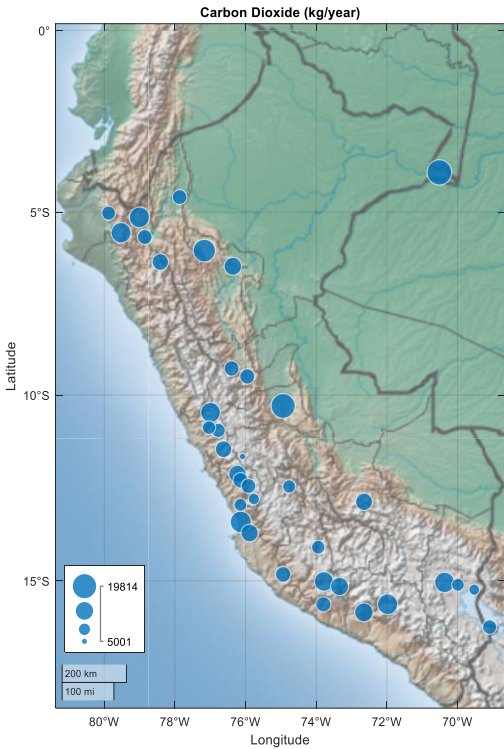
(a) Escenario 2



(b) Escenario 3



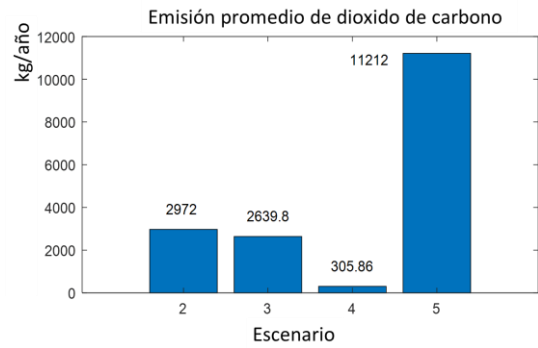
(c) Escenario 4



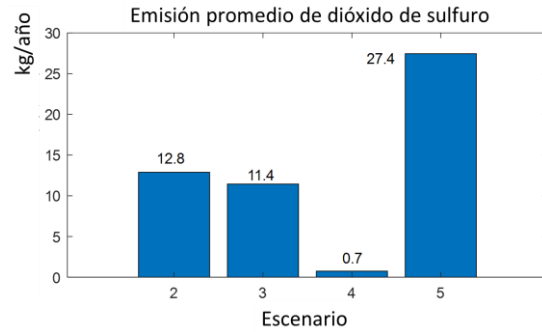
(d) Escenario 5

Fig. 4 Emisiones de dióxido de carbono para todos los casos prácticos

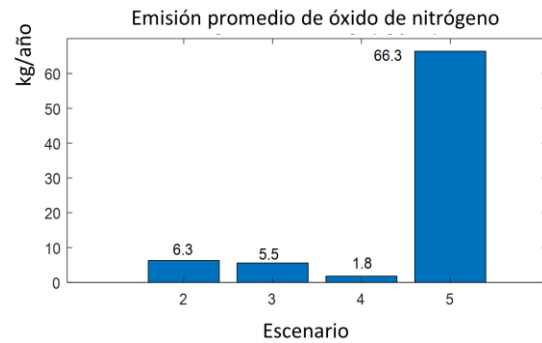
La Figura 5 muestra el resultado de las emisiones totales para todos los casos. En este sentido, los escenarios que incluyen el sistema MG (escenarios 2, 3 y 4) se comparan con el peor escenario (escenario 5), que considera únicamente los generadores diésel. En ese sentido, la reducción media de dióxido de carbono en el escenario 2 es del 73,49%, en el escenario 3 es del 76,45% y en el escenario 4 es del 97,2%. La reducción media de dióxido de azufre en el escenario 2 es del 53,28%, en el escenario 3 es del 58,39% y en el escenario 4 es del 97,44%. La reducción media de óxidos de nitrógeno en el escenario 2 es del 90,49%, en el escenario 3 es del 91,70% y en el escenario 4 es del 97,28%. La reducción media de monóxido de carbono en los escenarios 2 y 3 es del 100%, en el escenario 4 es del 97,28%. La reducción media de hidrocarburos no quemados en los escenarios 2 y 3 es del 100%, en el escenario 4 es del 97,27%. Por último, la reducción media de partículas en los escenarios 2 y 3 es del 100%, y en el escenario 4 es del 97,19%. En particular, en el escenario 2, la reducción máxima es de 75,54% y corresponde a la zona sur del Perú, y la reducción mínima es de 70,88%, que corresponde a la Amazonía. Efecto similar ocurre en el escenario 3, la reducción máxima es de 75,54% y la mínima de 72,54%. En el escenario 4, la reducción máxima es de 100% y corresponde a la región andina del Perú, la reducción mínima es de 94,75% y corresponde a la región amazónica.



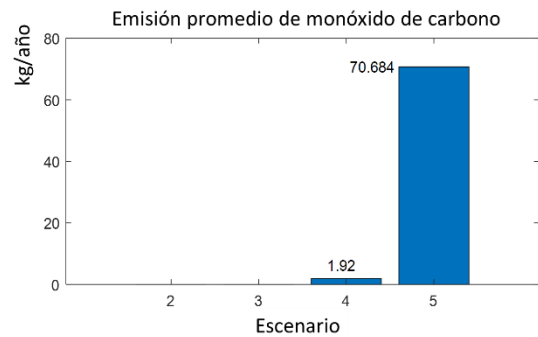
(a) Dióxido de carbono (kg/año)



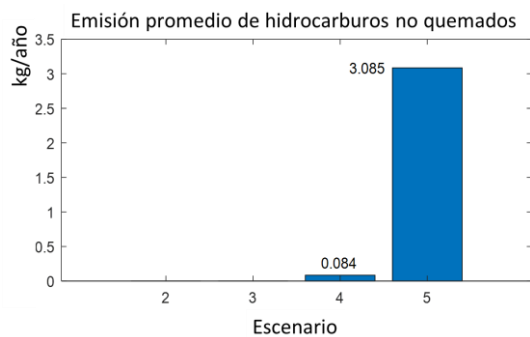
(b) Dióxido de sulfuro (kg/año)



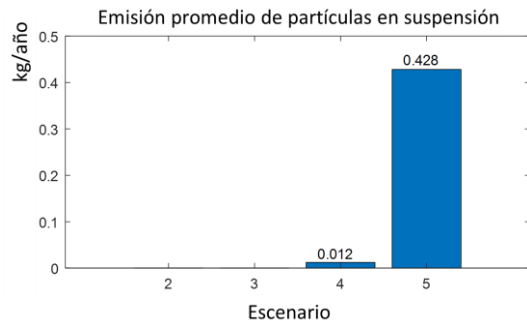
(c) Óxidos de nitrógeno (kg/año)



(d) Monóxido de carbono (kg/año)



(e) Hidrocarburos no quemados (kg/año)



(f) Partículas en suspensión (kg/año)

Fig. 5 Emisiones promedio de todos los casos de estudio y los escenarios de análisis

CONCLUSIÓN

Este trabajo determina la configuración óptima de una MG para varias zonas remotas de Perú utilizando el programa HOMER pro. El estudio considera las características de los costos asociados, la ubicación geográfica y el perfil de carga, e incluye también los posibles escenarios de una carga conectada a la red o aislada. Basándose en este análisis, se calculan las cantidades de emisiones contaminantes, donde los resultados obtenidos muestran que los beneficios medioambientales anuales del uso de MG son evidentes para todos los casos en comparación con un sistema fuera de la red que utiliza un generador Diesel.

El impacto ambiental en todos los casos ha mostrado una reducción considerable en comparación con un sistema con sólo generadores Diesel, los resultados revelan que la reducción media oscila entre [73,49% - 97,2%] para el dióxido de carbono, [53,28% - 97,4%] para el dióxido de azufre, [90,49% - 97,28%] para los óxidos de nitrógeno y [97,28% - 100%] para el monóxido de carbono de automóviles como principales fuentes contaminantes, lo que hace que estos proyectos sean muy útiles. Además, se identifican las regiones del área de estudio con menor impacto en el efecto de las emisiones, donde se observa que las regiones de los Andes y la costa del Perú tienen menores impactos con respecto a la región amazónica.

Finalmente, se presentó una herramienta que permite mapear las emisiones de un proyecto de MG en un área de estudio específica; por lo tanto, esta puede ser utilizada para verificar potenciales ubicaciones para la instalación de estas en

cualquier área geográfica. Como resultado, este trabajo podría ser considerado como modelos de referencia para el desarrollo e implementación de futuros proyectos de MG.

REFERENCIAS

- [1] D. Wang *et al.*, "A demand response and battery storage coordination algorithm for providing microgrid Tie-Line smoothing services," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 476–486, 2014, doi: 10.1109/TSTE.2013.2293772.
- [2] G. W. Arnold, "Challenges and opportunities in smart grid: A position article," in *Proceedings of the IEEE*, 2011, vol. 99, no. 6, pp. 922–927, doi: 10.1109/JPROC.2011.2125930.
- [3] R. H. Lasseter, "Smart distribution: Coupled microgrids," in *Proceedings of the IEEE*, 2011, vol. 99, no. 6, pp. 1074–1082, doi: 10.1109/JPROC.2011.2114630.
- [4] Luis Hernandez, *Microrredes eléctricas: Integración de generación renovable distribuida, almacenamiento distribuido e inteligencia*, vol. 558 pages. 2019.
- [5] S. K. Jha, P. Stoa, and K. Uhlen, "Green and hybrid microgrid for rural electrification," Apr. 2017, doi: 10.1109/R10-HTC.2016.7906841.
- [6] J. C. Quispe, A. E. Obispo, and F. J. Alcántara, "Economic feasibility assessment of microgrids with renewable energy sources in Peruvian rural areas," *Clean Technol. Environ. Policy* 2023, pp. 1–24, Jan. 2023, doi: 10.1007/S10098-023-02463-W.
- [7] Homer, "HOMER pro," 2022. <https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/index.html>.
- [8] M. A. A. Rafi *et al.*, "Renewable Energy-based Hybrid Microgrid for Economically Effective Coastal Electrification," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 31, no. 8, Nov. 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3089118.
- [9] J. Zhao, "Research on Optimized Configuration of Microgrid with Distributed Energy in Commercial Users in Hainan Province," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 461, no. 1, Apr. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/461/1/012057.
- [10] A. Ajlan, C. W. Tan, and A. M. Abdilahi, "Assessment of environmental and economic perspectives for renewable-based hybrid power system in Yemen," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, pp. 559–570, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.11.024.
- [11] M. Hossain, S. Mekhilef, and L. Olatomiwa, "Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 28, pp. 358–366, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.SCS.2016.10.008.