

# Technical, economic, and environmental assessment of a photovoltaic-wind system for rural electrification in Canta

Eliane J. Alvarado Vásquez<sup>1</sup>; Claudia A. Laufi Ramos<sup>2</sup>; Franco Canziani Amico<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, [U202121902@upc.edu.pe](mailto:U202121902@upc.edu.pe), [U201923883@upc.edu.pe](mailto:U201923883@upc.edu.pe), [PCIGFCAN@upc.edu.pe](mailto:PCIGFCAN@upc.edu.pe)

*Abstract— Lack of access to electricity continues to be a global challenge affecting millions of people, especially in rural areas of developing countries. In Peru, approximately 14% of rural areas are not connected to the electricity grid. Power generation through renewable hybrid systems is presented as a sustainable option for decentralized electrification. This study aims to assess the technical, economic, and environmental feasibility of a hybrid photovoltaic-wind system to supply electricity to the Tambo Farm in Canta, an area that, due to its geographic location, is not connected to the electricity grid. Currently, the site relies on a home-grown system composed of solar panels for basic lighting and diesel generators to cover specific needs. However, this solution is inefficient and has a negative environmental impact due to the use of fossil fuels. Variables such as wind speed and direction, solar radiation, and the farm's electricity demand were analyzed to design an optimal configuration, considering technical, economic, and environmental criteria. The results show an average wind speed of 3.02 m/s and an average annual solar radiation of 5.42 kWh/m<sup>2</sup>/day, demonstrating high solar power. Daily electricity demand is 31.32 kWh during the peak season (April-September) and 28.25 kWh during the mid-season (October-March). The Levelized Cost of Energy (LCOE) of the proposed system is US\$0.350/kWh, assuming a projected 20-year lifespan. Furthermore, due to its emission-free operation and potential for replication, the proposed system is emerging as a sustainable alternative for rural areas without access to the electricity grid.*

**KEYWORDS-** rural electrification, hybrid microgrids, wind energy, solar energy, canta.

# Evaluación técnica, económica y ambiental de un sistema fotovoltaico-eólico para la electrificación rural en Canta

Eliane J. Alvarado Vásquez<sup>1</sup>; Claudia A. Laufi Ramos<sup>2</sup>; Franco Canziani Amico<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, [U202121902@upc.edu.pe](mailto:U202121902@upc.edu.pe), [U201923883@upc.edu.pe](mailto:U201923883@upc.edu.pe), [PCIGFCAN@upc.edu.pe](mailto:PCIGFCAN@upc.edu.pe)

**RESUMEN**— La falta de acceso a la electricidad continúa siendo un desafío global que afecta a millones de personas, especialmente en zonas rurales de países en desarrollo. En el Perú, alrededor del 14% de las áreas rurales no disponen de conexión a la red eléctrica. La generación de energía mediante sistemas híbridos renovables se presenta como una opción sostenible para la electrificación descentralizada. Este estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico para abastecer de electricidad al fundo tambo en Canta, una zona que, debido a su ubicación geográfica, no cuenta con conexión a la red eléctrica. Actualmente, el lugar depende de un sistema diseñado de manera artesanal, compuesto por paneles solares para la iluminación básica y generadores diésel para cubrir las necesidades puntuales. Sin embargo, esta solución es ineficiente y presenta un impacto negativo ambiental debido al uso de combustibles fósiles. Se analizaron variables como la velocidad y dirección del viento, la radiación solar y la demanda eléctrica del fundo, con el fin de diseñar una configuración óptima, considerando tanto criterios técnicos como económicos y ambientales. Los resultados muestran que la velocidad promedio del viento es de 3,02 m/s y que la radiación solar media anual alcanza los 5,42 kWh/m<sup>2</sup>/día, lo que evidencia un alto potencial solar. La demanda eléctrica diaria es de 31,32 kWh en la temporada alta (abril-septiembre) y 28,25 kWh en temporada media (octubre-marzo). El costo nivelado de energía (LCOE) del sistema propuesto es de 0.350 us\$/kWh, considerando una proyección de 20 años de vida útil. Además, por su operación libre de emisiones y su potencial de replicabilidad, el sistema propuesto se perfila como una alternativa sostenible para zonas rurales sin acceso a la red eléctrica.

**Palabras clave**— electrificación rural, microrredes híbridas, energía eólica, energía solar, Canta.

## I. INTRODUCCIÓN

La brecha energética sigue siendo un desafío significativo, ya que cerca del 9% de la población mundial no cuenta con acceso a electricidad. Esta situación se acentúa en zonas rurales donde la cobertura eléctrica se encuentra limitada, afectando a más de 584 millones de personas [1]. Los principales desafíos de la electrificación rural son la compleja geografía, baja densidad poblacional y bajo consumo energético, lo que hace poco atractivo a las inversiones privadas [2]. Por lo que, las comunidades emplean como fuente principal a los combustibles fósiles, creando así un ciclo de dependencia y generando una creciente preocupación por los problemas ambientales que genera [3].

La falta de acceso a energía eléctrica repercute directamente en el desarrollo de actividades económicas [4]. Las zonas aisladas dependen en gran medida de la agricultura y ganadería, actividades que se encuentran limitadas por la falta

de adopción de tecnologías que optimicen la producción y procesamiento de alimentos [5]. Por ejemplo, a nivel local, en el distrito de Canta la intermitencia eléctrica junto a la falta de acceso obstaculiza el desarrollo de actividades económicas, lo que afecta directamente los ingresos de las familias y el desarrollo social. Por lo que, surge la necesidad de buscar nuevas alternativas asequibles y seguras para la electrificación rural.

En los últimos años, los sistemas híbridos se han consolidado como alternativas viables de electrificación, los cuales promueven la generación de energía eléctrica más sostenible. Las microrredes híbridas, pueden operar conectadas a la red (*on-grid*) o de forma autónoma (*off-grid*) y se alimentan de fuentes renovables como la solar, eólica, hidráulica, y en ocasiones son complementadas con generadores diésel (Fig. 1) [6], [7], [8][9].

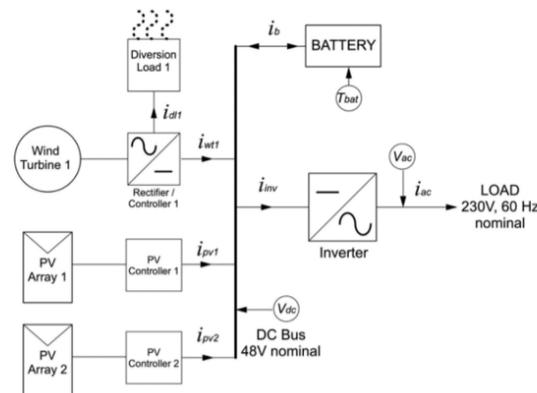


Fig. 1 Esquema de una microrred híbrida solar fotovoltaica eólica con almacenamiento.

Las microrredes tienen la capacidad de atender cargas pequeñas, medianas e incluso grandes como abastecer a grandes comunidades rurales. Uno de los sistemas más utilizados es solar-eólico, el cual genera electricidad a partir de paneles fotovoltaicos y aerogeneradores. Además de baterías como las

de ion litio que ofrecen un suministro más estable debido a su superioridad en términos de densidad energética y potencia [10][11], [12], [13].

Una de las principales ventajas de estos sistemas renovables es que son capaces de adaptarse a diversos contextos, aprovechando los recursos energéticos disponibles según cada región [4]. Por ello, la implementación requiere de un profundo análisis de los recursos de cada zona como la radiación solar, velocidad y dirección del viento, demanda eléctrica, entre otros factores [14]. A partir de las condiciones y necesidades de generación energética, se logra el dimensionamiento adecuado del sistema [15]. El sistema recién mencionado es considerado ideal en entornos rurales, donde la energía solar tiene una mayor participación durante el día, mientras que la energía eólica funciona como un respaldo complementario [16].

Diversos estudios respaldan la eficiencia de microrredes híbridas en zonas rurales. Uno de ellos demostró que una configuración óptima de sistema híbrido fotovoltaico eólico de 6 kWp puede abastecer hasta 1996 kWh energía anual [15]. Otro estudio determina que, para una configuración óptima, las baterías de iones de litio son las ideales con una eficiencia del 90 al 97 por ciento [17]. Además, se demuestra que el uso de sistemas de energía fotovoltaico-eólico reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> operativas al 100% [18]. Por otro lado, un estudio realizado en una aldea en Pakistán dedicada principalmente a la agricultura propone la implementación de un sistema compuesto por paneles solares y turbinas eólicas para satisfacer la demanda energética local [19]. Gracias a la abundancia de ambos recursos, se puede proporcionar 23 kWh con un costo nivelado de energía (LCOE, por sus siglas en inglés) de 0.267 USD/kWh [20], lo que demuestra que el sistema híbrido es óptimo en regiones con disponibilidad de viento e irradiancia media [21].

Numerosos estudios han empleado el software HOMER para llevar a cabo evaluaciones de viabilidad técnico – económica [16]. Uno de ellos permitió evaluar la producción de energía en kWh/año y junto a ello los criterios de instalación [15]. También es utilizado para optimizar el diseño del sistema mediante la combinación de distintas fuentes de energía, considerando tanto criterios económicos como ambientales [21]. Asimismo, diversos estudios lo emplean para determinar el dimensionamiento óptimo del sistema con el menor costo anual neto, así como para realizar análisis de sensibilidad que permiten evaluar la influencia de variables en el desempeño del sistema [22].

El presente estudio contribuye al campo de electrificación rural mediante un sistema híbrido que integra energía fotovoltaica, eólica y el almacenamiento en baterías para el suministro eléctrico a comunidades rurales dedicadas a la agricultura y ganadería, así como en fundos y caseríos del distrito de Canta. Además de su enfoque sostenible, busca ser un marco de referencia para la implementación en otras regiones con abundantes recursos. El objetivo es evaluar la

viabilidad técnica, económica y ambiental de un sistema híbrido fotovoltaico- eólico para satisfacer la demanda eléctrica en el Fundo Tambo, ubicado en el distrito de Canta, en Lima, Perú.

## II. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló en tres fases. En prime lugar, se realizó la recolección de datos mediante la caracterización del área de estudio, la evaluación de recursos y la estimación de la demanda eléctrica local. Seguidamente, se llevó a cabo el modelamiento matemático de los componentes y el dimensionamiento del sistema propuesto. Finalmente, en la se evaluó el sistema desde los enfoques técnico, económico, ambiental y de fiabilidad:

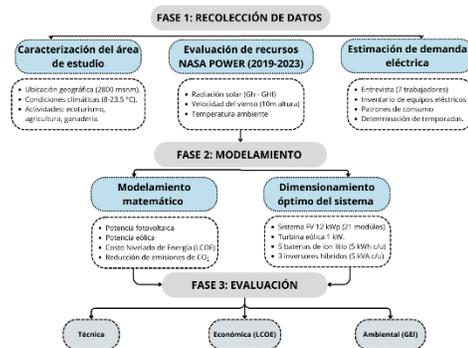


Fig. 2 Metodología de estudio

### A. Área de estudio

El estudio se desarrolla en el Fundo Tambo, ubicado en el km. 90.7 de la carretera Lima-Canta, en el distrito de Canta. Está situado a una altitud aproximada de 2800 msnm, en una región cálida, con temperaturas que oscilan entre los 8 °C y 23.5°C a lo largo del año. La zona presenta baja precipitación, concentrada principalmente en verano, lo que condiciona las actividades agrícolas; alta radiación solar y vientos débiles. Las principales actividades en el área de estudio son el ecoturismo vivencial, agricultura y la ganadería a pequeña escala.

### B. Evaluación de recursos

El estudio empleó la base de datos satelitales de la plataforma *NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (NASA POWER)*. La plataforma permite obtener información a partir de coordenadas geográficas específicas y realizar ajustes, como la altura de referencia estándar para el análisis del recurso eólico a pequeña escala. Se analizaron variables clave como la radiación solar, la velocidad y la dirección del viento durante el periodo 2019-2023. La radiación solar fue evaluada mediante los valores de Irradiancia Horizontal Global (GHI), mientras que la velocidad del viento se analizó a una altura de 10 metros.

### C. Estimación de la demanda eléctrica

Se utilizó una guía de entrevista abierta como instrumento de recolección de datos, dirigida a los trabajadores del fundo.

La guía incluyó 12 preguntas y se estructuró en cuatro secciones: actividades diarias por unidad operativa, consumo de energía eléctrica, patrones de consumo y necesidades futuras. Algunas de las preguntas que se realizaron son las siguientes:

- i) ¿Cuáles son las actividades que realiza y a qué hora suele empezar y terminar en su unidad operativa?
- ii) ¿Qué cambios semanales, mensuales o estacionales suelen haber en las actividades del fundo?
- iii) ¿Cuáles son los equipos o maquinarias que emplean en su unidad operativa? (bombas de agua, equipos de refrigeración, iluminación, etc.)
- iv) ¿Durante qué horas del día suele haber un mayor consumo de energía eléctrica en el fundo? ¿Qué actividades suelen estar asociadas a estos picos de demanda?

Las preguntas se realizaron a través de entrevistas a propietarios y trabajadores —siete personas en total, considerando un encargado y un trabajador por unidad operativa— con el fin de conocer y categorizar las actividades operativas del fundo.

Durante el recorrido de campo, acompañado por miembros del Fundo, se elaboró un inventario de los equipos y electrodomésticos existentes, registrando la cantidad, la potencia (W) y las horas promedio de uso diario (h/día) para estimar el requerimiento de energía eléctrica.

#### D. Modelamiento matemático de componentes renovables

La potencia de salida fotovoltaica es la cantidad máxima de energía eléctrica que un panel fotovoltaico puede generar bajo condiciones estándares y se puede calcular de la siguiente forma [23]:

$$P_{PV} = \eta SPV \cdot A_{PV} \cdot G_h(t) \cdot [1 - 0.005(T_{cell} - 25^\circ C)] \quad (1)$$

Donde  $\eta SPV$  es la eficiencia del panel (%),  $A_{PV}$  representa el área del panel solar ( $m^2$ ),  $G_h$  denota la irradiancia solar horaria sobre la superficie del panel y  $T_{cell}$  es la temperatura de la célula fotovoltaica ( $^\circ C$ ).

La temperatura del panel fotovoltaico, factor que afecta el rendimiento y eficiencia de los paneles, se obtiene a partir de la temperatura nominal de operación de la célula (NOCT) y la temperatura ambiente ( $T_a$ ):

$$T_{cell} = T_a + \frac{NOCT-20}{0.8} \cdot G_h(t) \quad (2)$$

De forma similar con el subsistema eólico, en el que la potencia eólica depende en gran medida de la velocidad del viento y de factores específicos del aerogenerador [24]:

$$P_W = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot s \cdot \eta_1 \cdot c_p \quad (3)$$

Donde  $P_W$  es la potencia eólica nominal en kW,  $\rho$  es la densidad del aire ( $kg/m^3$ ),  $v$  es la velocidad media del viento en

(m/s),  $s$  es el área de barrida por el rotor de la turbina y  $\eta_1$  es la eficiencia del generador eléctrico y  $c_p$  el coeficiente de potencia del rotor.

#### E. Cálculo del Costo Nivelado de Energía

El LCOE es un indicador económico para determinar la viabilidad de proyectos de generación de energía. Consiste en dividir el valor actual de los costos totales del sistema entre el valor actual de la energía generada por el sistema durante un periodo determinado [25]:

$$LCOE \text{ (USD/kWh)} = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{M_t + O_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (4)$$

Donde  $I_0$  es la inversión inicial,  $M_t$  son los gastos de inversión y mantenimiento en el año  $t$ ,  $E_t$  es la energía generada en el año  $t$ ,  $n$  los años de vida del proyecto,  $O_t$  es el son los costos operativos en el periodo  $t$  y  $r$  es la tasa de descuento real

#### G. Reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Se consideran dos alternativas convencionales de electrificación utilizadas en zonas rurales, con el propósito de comparar las emisiones generadas por fuentes convencionales y renovables:

Las emisiones de  $CO_2$  generadas por el uso de generadores eléctricos que operan con diésel se calculan mediante la siguiente ecuación que sigue las directrices del IPCC [26], [27]:

$$E_{diésel} = C_{diésel} \times F_{diésel} \quad (6)$$

Donde  $E_{diésel}$  denota las emisiones anuales de  $CO_2$  asociadas al consumo de diésel ( $kgCO_2$ ),  $C_{diésel}$  corresponde al volumen de combustible consumido (litros/año) y  $F_{diésel}$  es el factor de emisión del diésel, que ha sido estimado en 2,64  $kgCO_2$  /litro [28], [29].

Del mismo modo, las emisiones de  $CO_2$  asociadas al consumo de energía proveniente de la red eléctrica nacional se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$E_{red} = C_{energía} \times F_{red} \quad (7)$$

Donde  $E_{red}$  corresponde a las emisiones anuales de  $CO_2$  derivadas del consumo de electricidad ( $kgCO_2$ ),  $C_{energía}$  representa el consumo anual de energía eléctrica ( $kWh/año$ ) y  $F_{red}$  es el factor de emisión asociado al consumo eléctrico. Este factor de emisión ha sido estimado en estudios previos como 0,45  $kgCO_2/kWh$ . [30].

### III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se hizo uso de la plataforma NASA POWER con el propósito de recopilar información precisa sobre los recursos Energéticos durante el 2019 - 2023. La velocidad media anual del viento de 3.02 m/s, destacando los meses de agosto,

septiembre y octubre como los de mayor intensidad, con un promedio de 3.30 m/s. Aunque la velocidad no es extremadamente alta, es adecuada para la operación de turbinas eólicas de pequeña escala, como se observa en diversas aplicaciones [31].

La Fig. 2 muestra el perfil horario de radiación solar en el Fundo Tambo, el cual presenta un alto potencial solar con valores de radiación instantánea por encima de los 780 Wh/m<sup>2</sup>. La radiación total promedio diario es 6 kWh/m<sup>2</sup>/día entre los meses de julio a octubre, mientras que el promedio anual se sitúa en 5.42 kWh/m<sup>2</sup>/día, lo que evidencia un alto potencial para la generación de energía fotovoltaica.

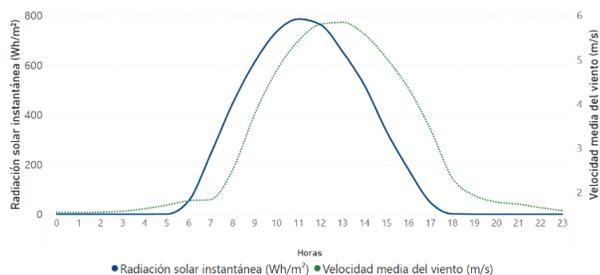


Fig. 3 Perfil diario de radiación solar y viento en el Fundo Tambo.

La irradiancia solar en el Fundo Tambo es incluso superior a la de otras regiones del país ubicadas en distintas zonas climáticas, como Loreto, Cajamarca y Cusco, donde se registran valores de 2.591, 3.145 y 2.326 kWh/m<sup>2</sup>/día, respectivamente [32]. Además, con un promedio de 5.42 kWh/m<sup>2</sup>/día, la irradiancia en el Fundo Tambo se aproxima a los niveles registrados en las zonas costeras, que alcanzan hasta 6.4 kWh/m<sup>2</sup>/día [33].

Según datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), la temperatura media mensual oscila entre 12.4°C en los meses más fríos y 13.8°C en los más cálidos, con particular estabilidad durante agosto y septiembre (Fig. 3). Estos valores moderados favorecen el rendimiento de los paneles fotovoltaicos al minimizar la pérdida de eficiencia por sobrecalentamiento [34].

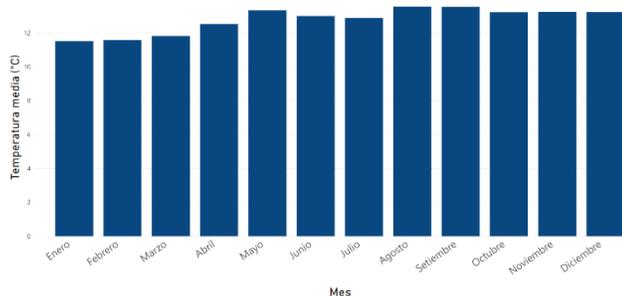


Fig. 4 Temperatura media en el Fundo Tambo.

La demanda eléctrica diaria promedio del fundo se distribuye en dos temporadas: alta (abril a septiembre) y media (octubre a marzo). Durante la temporada alta, el consumo alcanza los 31.32 kWh/día, mientras que en la temporada media se reduce a 28.25 kWh/día.

El mayor consumo de energía en ambas temporadas se observa en la unidad operativa cocina-comedor, debido al uso continuo de electrodomésticos durante 24 horas, así como al funcionamiento de reflectores para iluminación.

Seguidamente, en la unidad almacén-campo, la energía se destina principalmente a la iluminación interior, así como a la carga de equipos móviles. En las zonas de almacén y campo, la demanda está asociada al uso de reflectores externos y al funcionamiento de herramientas eléctricas (tabla I):

TABLA I  
DEMANDA ELÉCTRICA EN EL FUNDO TAMBO

Nº	Equipo	Cantidad	Potencia (W)	Uso (h/día)	Energía (kWh/día)	Potencia instalada (W)
1	Foco LED	13	1	1.5	19.5	13
2	Foco LED	4	1	5	20	4
3	Foco LED	10	3	1.5	45	30
4	Foco LED	5	3	5	75	15
5	Foco LED	1	5	5	25	5
6	Reflector	6	10	5	300	60
7	Reflector	9	30	5	1350	270
8	Reflector	1	30	1	30	30
9	Reflector	19	60	5	5700	1140
10	Reflector	4	100	1.5	600	400
11	Reflector	4	100	5	2000	400
12	TV LG 24"	1	17.1	1	17.1	17.1
13	TV Miray 32"	1	65	3	195	65
14	Decodificador	1	24	1	24	24
15	Congelador	1	220	24	5280	220
16	Exhibidor vertical	1	520.83	24	12499.92	520.83
17	Licudadora	1	550	0.16	88	550
18	Laptop	1	60	4	240	60
19	Cargador de celular	6	22.5	6	810	135
20	Amoladora angular	1	900	1.03	927	900
21	Taladro	1	500	1.03	515	500
22	Taladro	1	530	1.03	545.9	530
TOTAL					31306.42	5888.93

El dimensionamiento del sistema se realizó mediante cálculos, considerando una demanda diaria máxima de 31.29 kWh/día y una potencia pico de 3.81 kW. La configuración óptima se definió contemplando pérdidas acumuladas del 35%, distribuidas en: suciedad (8%), temperatura (8%), cableado (2%), baterías (10%), inversores (7%) y envejecimiento (5%).

La microrred está compuesta por un subsistema fotovoltaico de 12 kWp, integrado por 21 módulos monocristalinos de 575 Wp; una turbina eólica de eje horizontal de 1 kW; cinco baterías de ion-litio de 5 kWh cada una, con una profundidad de descarga del 80%, lo que proporciona una capacidad útil de 20 kWh; y tres inversores híbridos de 5 kVA cada uno, dimensionados para manejar la potencia pico.

El sistema cubre la demanda eléctrica estimada, y la inversión total asciende a US\$ 30,642, lo que representa un costo específico de US\$ 2,357 por kWp instalado. El LCOE estimado del sistema propuesto es de US\$ 0.350/kWh, valor consistente con estudios realizados en zonas rurales del Perú, donde los costos oscilan entre 0.30 y 0.45/ US\$/kWh [18].

Este costo se justifica por la inclusión de baterías, una turbina eólica, los cuales aumentan niveles de inversión inicial, pero contribuyen a mejorar la confiabilidad y continuidad del suministro eléctrico [35]. Los resultados respaldan la viabilidad técnica y económica del sistema, consolidándolo como alternativa sostenible y replicable para la electrificación descentralizada.

Respecto a las emisiones asociadas a alternativas de electrificación, se estima que el consumo eléctrico mediante la extensión de la red eléctrica generaría cerca de 4,610.18 kg CO<sub>2</sub> eq durante un año de suministro eléctrico constante. Esta estimación está basada en la matriz energética del Perú, la cual incluye un porcentaje considerable de generación por combustibles fósiles (tabla II):

TABLA II  
CÁLCULO DE EMISIONES POR CONSUMO DE RED ELÉCTRICA NACIONAL  
(kg CO<sub>2</sub>)

UNIDAD OPERATIVA	CONSUMO DIARIO (kWh)	
	T. ALTA	T. MEDIA
Cocina-comedor	21.17	20.81
Almacén-campo	4.35	3.92
Alojamiento-vivienda	5.8	3.52
Total de energía diaria	31.32	28.25
Total de energía/temporada (kWh)	5,731.56	5,141.50
Emisiones por red eléctrica (kg CO <sub>2</sub> )	2,430.18	2,180.00

En comparación, el uso de generadores diésel produciría 8,709.32 kg CO<sub>2</sub> eq, en un año de suministro eléctrico para las

tres unidades operativas (tabla III). Además, se estima un consumo de 1,719.47 litros de diésel en la temporada alta y 1,542.45 litros en la temporada media.

TABLA III  
CÁLCULO DE EMISIONES ANUALES DE CO<sub>2</sub> POR EL USO DE UN GENERADOR DIÉSEL (KG CO<sub>2</sub>/AÑO).

UNIDAD OPERATIVA	CONSUMO DIARIO (kWh)	
	T. ALTA	T. MEDIA
Cocina-comedor	21.17	20.81
Almacén-campo	4.35	3.92
Alojamiento-vivienda	5.8	3.52
Total energía/temporada (kWh)	5,731.56	5,141.50
Diésel requerido (l)	1,719.47	1,542.45
Emisiones por diésel (kg CO <sub>2</sub> )	4,590.98	4,118.34

Este hallazgo resalta el impacto ambiental considerablemente mayor de la electrificación mediante diésel en comparación con la conexión a la red eléctrica. Además, la operación de generadores en escenarios rurales suele estar limitada a horas del día. En promedio, se utilizan durante 16 horas continuas para evitar problemas como el apilamiento húmedo, causado por la combustión incompleta del combustible [36].

#### IV. CONCLUSIONES

El análisis de los recursos energéticos en el Fundo Tambo evidencia un alto potencial fotovoltaico, con una irradiancia solar promedio anual de 5.42 kWh/m<sup>2</sup>/día y picos de hasta 6.22 kWh/m<sup>2</sup>/día. Asimismo, la velocidad media del viento de 3.02 m/s resulta óptima para operar turbinas eólicas de eje horizontal a pequeña escala como lo sugieren estudios anteriores.

La demanda eléctrica diaria del Fundo Tambo fue determinada a partir de una metodología que incluyó entrevistas, encuestas e inventarios, lo que permitió caracterizar el consumo eléctrico y establecer un perfil de demanda diaria. La demanda eléctrica diaria oscila entre 28.25 kWh/día y 31.32 kWh/día por temporada alta y media, en función de las actividades y las necesidades operativas que dependen del flujo de visitantes que recibe el lugar.

El sistema de microrred propuesto se compone por un subsistema fotovoltaico de 12 kWp, un subsistema eólico de 1 kW, baterías de 5kWh y tres inversores híbridos, que permite atender la demanda solicitada en ambas temporadas, cuyo LCOE es 0.350 US\$/kWh.

La configuración híbrida del sistema para el Fundo Tambo presenta una fracción renovable del 100%. En contraste, las alternativas de electrificación convencional mediante la red eléctrica nacional generarían emisiones de 4,610.18 kg

CO<sub>2</sub>/año, mientras que el uso de generadores diésel alcanzaría hasta 8,709.32 kg CO<sub>2</sub>/año.

Es por ello, que la implementación del sistema híbrido no solo representa una solución técnica viable y ambientalmente responsable, sino que, también contribuye a fortalecer la resiliencia energética del Fundo Tambo, permitiendo un desarrollo rural más sostenible, autónomo y alineado con las políticas globales de transición energética y en aspectos del cambio climático.

#### REFERENCIAS

- [1] W. Bank, "Tracking SDG7: The energy progress report 2024," 2024. [Online]. Available: <https://trackingsdg7.esmap.org/downloads>.
- [2] A. López-González, B. Domenech, and L. Ferrer-Martí, "The gendered politics of rural electrification: Education, indigenous communities, and impacts for the Venezuelan Guajira," Dec. 01, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.erss.2020.101776.
- [3] R. García, "Pobreza energética en América Latina," 2014. Accessed: Sep. 23, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/79cc961b-7908-4fce-a7dd-133d484c1be7/content>
- [4] B. F. Silinto, C. van der Laag Yamu, C. Zuidema, and A. P. C. Faaij, "Hybrid renewable energy systems for rural electrification in developing countries: A review on energy system models and spatial explicit modelling tools," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 207, p. 114916, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2024.114916.
- [5] S. K. Saha, "Empowering rural South Asia: Off-grid solar PV, electricity accessibility, and sustainable agriculture," *Appl Energy*, vol. 377, p. 124639, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124639.
- [6] M. Schmukler and S. Garrido, "ELECTRIFICACIÓN RURAL EN ARGENTINA. ADECUACIÓN SOCIO-TÉCNICA DEL PROGRAMA PERMER EN LA PROVINCIA DE JUJUY," *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 20, pp. 65–77, 2016, Accessed: Oct. 18, 2024. [Online]. Available: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/141821>
- [7] F. A. Khan, N. Pal, and S. H. Saeed, "Optimization and sizing of SPV/Wind hybrid renewable energy system: A techno-economic and social perspective," *Energy*, vol. 233, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121114.
- [8] A. Javaid, M. Sajid, E. Uddin, A. Waqas, and Y. Ayaz, "Sustainable urban energy solutions: Forecasting energy production for hybrid solar-wind systems," *Energy Convers Manag*, vol. 302, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118120.
- [9] F. Canziani, R. Vargas, M. Castilla, and J. Miret, "Reliability and energy costs analysis of a rural hybrid microgrid using measured data and battery dynamics: A case study in the coast of Perú," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14196396.
- [10] A. Shah Irshad *et al.*, "Techno-economic evaluation and comparison of the optimal PV/Wind and grid hybrid system with horizontal and vertical axis wind turbines," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 23, p. 100638, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100638.
- [11] R. Ahmad and H. Farzaneh, "Techno-economic analysis and dynamic power simulation of a hybrid solar-wind-battery system for power supply in rural areas in Pakistan," *Cleaner Energy Systems*, vol. 8, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.cles.2024.100127.
- [12] L. Deguenon, D. Yamegueu, S. Moussa kadri, and A. Gomna, "Overcoming the challenges of integrating variable renewable energy to the grid: A comprehensive review of electrochemical battery storage systems," Oct. 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.233343.
- [13] Z. Zhang *et al.*, "A review of technologies and applications on versatile energy storage systems," Sep. 01, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2021.111263.
- [14] M. M. Kamal, I. Ashraf, and E. Fernandez, "Planning and optimization of microgrid for rural electrification with integration of renewable energy resources," *J Energy Storage*, vol. 52, p. 104782, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104782.
- [15] P. K. Sharma *et al.*, "Energy storage system based on hybrid wind and photovoltaic technologies," *Measurement: Sensors*, vol. 30, p. 100915, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.measen.2023.100915.
- [16] N. K. Bahuguna *et al.*, "Electrification and performance analysis of hybrid PV solar/wind energy system for remote and hilly area of Uttarakhand (India)," *Mater Today Proc*, vol. 73, pp. 18–21, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.033.
- [17] P. K. Behera and M. Pattnaik, "Design and real-time implementation of wind-photovoltaic driven low voltage direct current microgrid integrated with hybrid energy storage system," *J Power Sources*, vol. 595, p. 234028, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.234028.
- [18] F. Rinaldi, F. Moghaddampoor, B. Najafi, and R. Marchesi, "Economic feasibility analysis and optimization of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Peru," *Clean Technol Environ Policy*, vol. 23, no. 3, pp. 731–748, Apr. 2021, doi: 10.1007/S10098-020-01906-Y/TABLES/6.
- [19] S. Mukhtar, S. Muhammad, H. A. Alyousef, W. Khan, R. Shah, and S. A. El-Tantawy, "Enviro-economic and optimal hybrid energy system: Photovoltaic-biogas-hydro-battery system in rural areas of Pakistan,"

- Heliyon*, vol. 10, no. 16, p. e35182, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35182.
- [20] F. Canziani, R. Vargas, and J. A. Gastelo-Roque, "Hybrid Photovoltaic-Wind Microgrid With Battery Storage for Rural Electrification: A Case Study in Perú," *Front Energy Res*, vol. 8, Feb. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2020.528571.
- [21] S. Komrit and F. Zabihian, "Comparative analyses of solar photovoltaic, wind turbine, and solar photovoltaic and wind turbine hybrid systems: Case study of Thailand," *Energy Convers Manag*, vol. 293, p. 117479, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117479.
- [22] E. Mulenga, A. Kabanshi, H. Mupeta, M. Ndiaye, E. Nyirenda, and K. Mulenga, "Techno-economic analysis of off-grid PV-Diesel power generation system for rural electrification: A case study of Chilubi district in Zambia," *Renew Energy*, vol. 203, pp. 601–611, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2022.12.112.
- [23] M. Bilal, I. Alsaidan, M. Alaraj, F. M. Almasoudi, and M. Rizwan, "Techno-Economic and Environmental Analysis of Grid-Connected Electric Vehicle Charging Station Using AI-Based Algorithm," *Mathematics*, vol. 10, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/math10060924.
- [24] F. C. Emejeamara and A. S. Tomlin, "A method for estimating the potential power available to building mounted wind turbines within turbulent urban air flows," *Renew Energy*, vol. 153, pp. 787–800, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.123.
- [25] J. Emblemståg, "Rethinking the 'Levelized Cost of Energy': A critical review and evaluation of the concept," Jan. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.erss.2024.103897.
- [26] COFIDE, "Inventario de Gases de Efecto Invernadero," 2019.
- [27] E. Matsika, L. Nenge Namayanga, B. Osman-Elasha, J. D. Kalenga Saka, K. Treanton, and R. Quadrelli, "Autor colaborador 2.2 Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero."
- [28] ISA REP, "Huella de Carbono Corporativa Red Energía del Perú (REP)," 2022.
- [29] Ministerio de Energía y Minas, "RAGEI: COMBUSTIÓN ESTACIONARIA Y EMISIONES FUGITIVAS," 2023.
- [30] Ministerio de Economía y Finanzas and Dirección General de Programación Multianual de Inversiones - DGPMI, "NOTA TÉCNICA PARA EL USO DEL PRECIO SOCIAL DEL CARBONO EN LA EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS DE INVERSIÓN," 2021. Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available:
- [31] [https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv\\_publica/anexo\\_s/anexo3\\_RD006\\_2021EF6301.pdf](https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/anexo_s/anexo3_RD006_2021EF6301.pdf)
- N. Oubouch, A. Redouane, A. Makhoukh, and A. El Hasnaoui, "Optimization and design to catalyze sustainable energy in Morocco's Eastern Sahara: A hybrid energy system of PV/Wind/PHS for rural electrification," *Cleaner Energy Systems*, vol. 9, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cles.2024.100141.
- [32] F. Rinaldi, F. Moghaddampoor, B. Najafi, and R. Marchesi, "Economic feasibility analysis and optimization of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Peru," *Clean Technol Environ Policy*, vol. 23, no. 3, pp. 731–748, Apr. 2021, doi: 10.1007/s10098-020-01906-y.
- [33] F. Canziani, R. Vargas, and J. A. Gastelo-Roque, "Hybrid Photovoltaic-Wind Microgrid With Battery Storage for Rural Electrification: A Case Study in Perú," *Front Energy Res*, vol. 8, Feb. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2020.528571.
- [34] V.-S. Hudîşteanu, N.-C. Cherecheş, F.-E. Ţurcanu, I. Hudîşteanu, and C. Romila, "Impact of Temperature on the Efficiency of Monocrystalline and Polycrystalline Photovoltaic Panels: A Comprehensive Experimental Analysis for Sustainable Energy Solutions," *Sustainability*, vol. 16, no. 23, p. 10566, Dec. 2024, doi: 10.3390/su162310566.
- [35] S. Al Dawsari, F. Anayi, and M. Packianather, "Techno-economic analysis of hybrid renewable energy systems for cost reduction and reliability improvement using dwarf mongoose optimization algorithm," *Energy*, vol. 313, p. 133653, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.133653.
- [36] F. Canziani Amico, "Design and implementation of rural microgrids : Laguna Grande case study," 2022. [Online]. Available: <http://www.tdx.cat/?locale->