

Advance in Wind Energy Systems: A Bibliometric Approach

Juan Grados Ph. D¹, Eliseo Zarate-Perez, Ph. D Student², Santiago Rubiños, Ph. D³, Jessica Meza, M. Sc⁴, Yesmi Ortega-Rojas, M. Sc⁵, Herbert Grados-Espinoza, Ph. D Student⁶, Arcelia Rojas, Ph. D⁷

¹⁻⁷ Centro de Investigación en Automatización para el Desarrollo, Universidad Nacional del Callao (UNAC), Perú,
jhgradosg@unac.edu.pe, ejzaratep@unac.edu.pe, slrubiñosj@unac.edu.pe, jrmezaz@unac.edu.pe, ykortegar@unac.edu.pe,
hjgradose@unac.edu.pe, aorojass@unac.edu.pe.

Abstract– Wind energy systems (WES) play a key role in the production of renewable energy. However, these systems face balancing issues in resource adequacy, network reliability, stability, and economic efficiency. In this sense, the objective of this work is to carry out a conceptual scientific mapping analysis of the performance and its interactions of WES within the field of research. For the analysis, SciMAT has been used as an open-source software tool applied to scientific mapping analysis under a longitudinal framework. The results show that WES are related to climate change, economic impact, energy efficiency, environmental impact, renewable resources, energy policy, greenhouse gases, investments, and wind farms. Finally, offshore wind turbines face a significant high levelized cost of electricity (LCOE) challenge. However, the LCOE can be reduced based on two criteria: optimizing the total cost or improving energy production. Therefore, the solution to these challenges is related to an optimal design, under an adequate control approach.

Keywords- Wind energy systems, wind turbines, economic impact, bibliometric method, future research directions.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.29>

ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Avance en los Sistemas de Energía Eólica: Un Enfoque Bibliométrico

Eliseo Zarate-Perez, Ph. D Student¹, Juan Grados, Ph. D², Santiago Rubiños, Ph. D³, Jessica Meza, M. Sc⁴, Yesmi Ortega-Rojas, M. Sc⁵, Herbert Grados-Espinoza, Ph. D Student⁶, Arcelia Rojas, Ph. D⁷
¹⁻⁷ Centro de Investigación en Automatización para el Desarrollo, Universidad Nacional del Callao (UNAC), Perú,
ejzaratep@unac.edu.pe, jhgradosg@unac.edu.pe, slrubiñosj@unac.edu.pe, jrmezaz@unac.edu.pe, ykortegar@unac.edu.pe,
hjgradose@unac.edu.pe, aorojass@unac.edu.pe.

Resumen– Los sistemas de energía eólica (SEE) desempeñan un papel clave en la producción de energía renovable. Sin embargo, estos sistemas enfrentan problemas de equilibrio en la adecuación de los recursos, confiabilidad de la red, estabilidad y eficiencia económica. En tal sentido, el objetivo de este trabajo es realizar un análisis de mapeo científico conceptual del desempeño y sus interacciones de los SEE dentro del campo de investigación. Para el análisis, se ha utilizado SciMAT como una herramienta de software de código abierto aplicada al análisis de mapeo científico bajo un marco longitudinal. Los resultados muestran que los SEE se relacionan con el cambio climático, el impacto económico, la eficiencia energética, el impacto medioambiental, los recursos renovables, la política energética, los gases de invernadero, las inversiones y los parques eólicos. Finalmente, las turbinas eólicas marinas enfrentan un desafío importante de alto costo nivelado de la electricidad (LCOE). Sin embargo, el LCOE se puede reducir con base en dos criterios: optimizando el costo total o mejorando la producción de energía. Por lo tanto, la solución frente a estos desafíos se relaciona con un diseño óptimo, bajo un enfoque de un control adecuado.

Palabras clave- Sistemas de energía eólica, aerogeneradores, impacto económico, método bibliométrico, direcciones futuras de investigación.

I. INTRODUCCIÓN

La energía es la esencia para la supervivencia humana y para el desarrollo socioeconómico. Según las proyecciones de la Administración de Información Energética (EIA), el consumo mundial de la energía podría aumentar un 50 % entre 2018 y 2050 [1]. Además de ello, las proyecciones para el 2050 muestran que se seguirán utilizando combustibles fósiles para satisfacer la mayor parte de la demanda energética [2], como se muestra en la Fig. 1. Por lo tanto, la energía renovable es la forma de más rápido crecimiento, como una prioridad para hacer frente al problema de contaminación ambiental [3]. Sin embargo, el brote de la pandemia de COVID-19 ha aumentado los costos de producción de las instalaciones de energía renovable y socava la rentabilidad de la inversión en este sector [4].

A pesar del rápido crecimiento de la generación de electricidad con la energía solar, eólica e hidroeléctrica; no serían suficientes para cubrir todas las necesidades humanas en el 2050. Según las estimaciones de la compañía *British Petroleum (BP)*, se espera que el petróleo, el gas y el carbón se consuman por completo en 2052, 2060 y 2090, respectivamente [5]. De tal forma que, la energía eólica contribuiría con la reducción del riesgo de la inseguridad

energética, además de aportar en beneficio del medio ambiente [3]. Por lo tanto, se requiere de un análisis para explorar las tendencias, las conexiones y las brechas de manera más explícita en este campo de investigación, con la finalidad de identificar la evolución y el aporte científico en este tema.

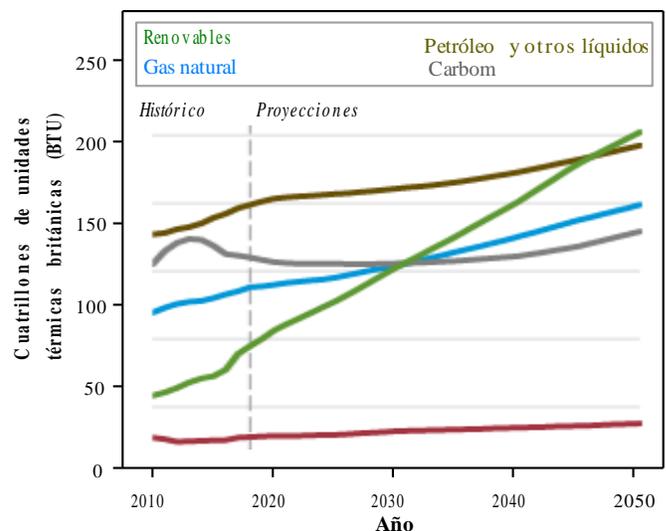


Fig. 1 Consumo de la energía primaria global para el 2010 y 2050 [1].

En muchos estudios se han utilizado la metodología bibliométrica para visualizar o mapear la estructura y evolución de la literatura. En tal sentido, el enfoque ha provocado una atención cada vez mayor para estudiar el dominio del conocimiento o visualizar redes de estructuras, con la finalidad de brindar una perspectiva amplia del tema estudiado [6]. Por ejemplo, en [7] se emplea un enfoque de análisis bibliométrico en la revisión de la evolución del precio de la energía eólica. En [8] se analizan las tendencias y los impactos del almacenamiento de batería de iones de litio (LIB) en sistemas de energía renovable; de la misma forma, en [9] se identifica la evolución temática de la literatura sobre adopción de energía renovable aplicando un enfoque bibliométrico.

Otros estudios bibliométricos se presenta en [10], donde se presenta una evaluación de la evolución global de la energía renovable y las tecnologías ambientales. En [11] se presenta un análisis bibliométrico de los tipos de energías renovables utilizando indicadores clave de rendimiento y modelos de decisión multicriterio. De la misma forma, en [12] se estudia la integración del almacenamiento de energía para lograr la

descarbonización de la red y las directrices futuras utilizando un enfoque de mapeo científico. Finalmente, en [13] se realiza una revisión de los sistemas energéticos; en [14] se estudia los diferentes tipos de financiación de las energías renovables; y, en [15] se revisa las implicaciones del desarrollo de energías renovables marinas, también aplicando el mismo enfoque.

En tal sentido, esta investigación trata de llenar el vacío en el campo de la energía eólica; teniendo como objetivo realizar una revisión bibliométrica de la literatura; examinando las tendencias de investigación existentes y futuras, sus interacciones y desempeño en el campo de investigación. La relevancia de esta investigación es aplicar un análisis bibliométrico para obtener resultados objetivos e imparciales. De tal forma, se realizará el análisis completo de los trabajos de investigación publicados entre 2007 y 2021.

II. METODOLOGÍA

A. Base de datos

Para generar los datos de análisis se estableció el procedimiento de búsqueda de los artículos para la revisión, que incluye los criterios de exclusión y los métodos de extracción de datos para sintetizar los resultados. Varios autores han implementado un procedimiento en su investigación considerando diferentes etapas con el objetivo presentar un proceso de investigación científica transparente y replicable [16]–[19]. En este trabajo, la secuencia metodológica de la extracción de datos se basa en [18].

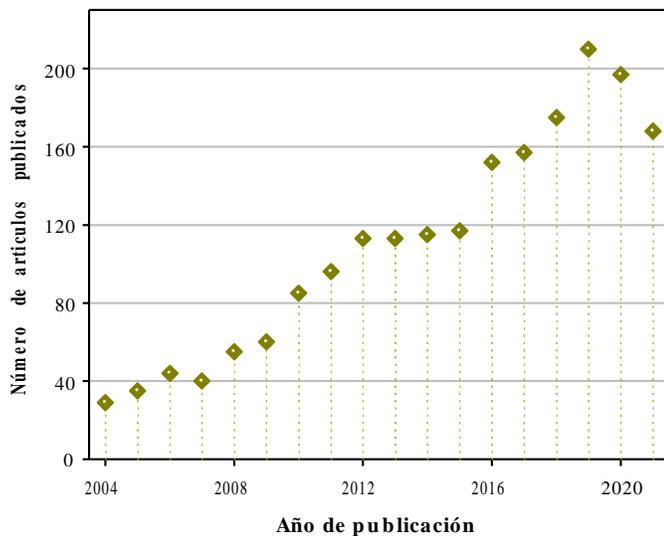


Fig. 2 Base de datos utilizado (artículos).

En tal sentido, el protocolo de búsqueda se desarrolló considerando dos bases de datos para el análisis: Web of Science (WoS) y la base de datos Scopus. De esa forma, las palabras clave fueron definidas enfocando aquellos artículos que están relacionados con el tema. En tal efecto, la búsqueda se realizó utilizando el campo “Título / Resumen / Palabra clave”, definidas por la siguiente ecuación: (“wind energy” OR

“wind power” OR “wind-generated”) AND (“assessment methods,” “assessment tools,” “assessment systems,” “environmental impact,” “social impact” and “economic impact”). Los resultados de la búsqueda se restringieron a artículos de investigación y se excluyeron libros y capítulos. De tal forma que se recopilaron 2000 artículos dentro del periodo 2004 a 2021 (octubre) tal y como se presenta en la Fig. 2.

B. Análisis bibliométrico

i) Gráfico superpuesto y mapa de evolución

Una vez que se obtuvieron los resultados de la búsqueda, se realizó el análisis bibliométrico utilizando el método de mapeo científico con el software SciMAT (*Science Mapping Analysis Software Tool*) [20], [21]. SciMAT identifica el estado de la aplicación y el desempeño de los sistemas de la energía eólica, incluida su relación con los métodos de evaluación, impacto ambiental, social y económico. El mapeo científico aplica una evaluación basada en algoritmos, lo que proporciona una visión imparcial del tema de investigación. En tal sentido, se realizó un enfoque cuantitativo para analizar los documentos publicados, aplicando métodos estadísticos para establecer una perspectiva objetiva [22].

Los métodos más comunes de análisis bibliométrico son el análisis basado en citas, coautoría y de coocurrencia de palabras clave [23]. En este estudio, se adoptó el mapeo científico basado en el análisis de coocurrencia de palabras clave, que identifica una visión del contenido de temas específicos. Seguidamente, se evaluó la cantidad de artículos en los que dos palabras clave aparecen juntas, proporcionando una medida de la fuerza de interacción entre las palabras clave dentro de un grupo analizado [24].

ii) Diagrama estratégico y red temática

SciMAT se aplica en la identificación de tendencias temáticas y visualiza los temas en el diagrama estratégico en cuatro cuadrantes [25]: temas motores, básicos, especializados y emergentes. Cada tema se caracteriza en dos dimensiones: centralidad y densidad [20]. La centralidad mide el grado de interacción de una red con otras redes temáticas en un campo evaluado, mostrando la fuerza de los vínculos externos; definida en la Ecuación 1. De la misma forma, la densidad evalúa la fuerza interna de la red temática y está definida por la Ecuación 2.

$$c=10\sum e_{uv} \quad (1)$$

Donde, u es un elemento (palabra clave) perteneciente al tema; y v es un elemento (palabra clave) perteneciente a otros temas.

$$d=100\frac{\sum e_{ij}}{n} \quad (2)$$

Donde i y j son los elementos (palabras clave) pertenecientes al tema; y n es el número de elementos (palabras clave) en el tema.

En el mapa estratégico, los temas motores (Q1) se encuentran bien desarrollados porque presentan alta centralidad y densidad, muy importantes para el campo de investigación. Los temas especializados (Q2) comprenden temas aislados debido a su alta densidad y baja centralidad. Por otro lado, los temas con redes internas y externas poco desarrolladas representan los temas emergentes (Q3) en un área de investigación determinada. Finalmente, los temas básicos (Q4) son importantes para el área de investigación porque presentan una alta centralidad y se encuentran en constante desarrollo en función a sus vínculos internos (densidad) [26]. La Fig. 3 presenta una visualización de ejemplo del diagrama estratégico.

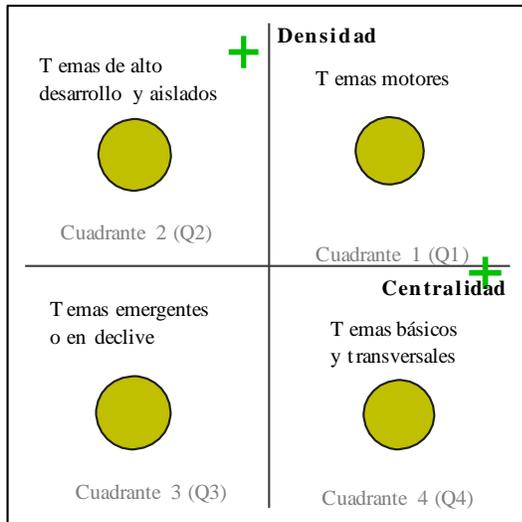


Fig. 3 Estructura del diagrama estratégico.

SciMAT identifica la red temática con la palabra clave más significativa y sus interconexiones con los otros temas por medio de las palabras clave. De tal forma que el tamaño de la esfera representaba el número de documentos en los que se identificaba una determinada palabra clave. Donde, el índice de equivalencia es proporcional al grosor de la línea entre dos esferas de palabras clave; definido en la Ecuación 3 [27].

$$e_{ij} = \frac{c_{ij}^2}{c_i * c_j} \quad (3)$$

Donde, el número de ocurrencias de la palabra clave i es C_i ; y el número de ocurrencias de la palabra clave j es C_j .

En este sentido, dos palabras clave (i, j) aparecen juntas si se usan en conjunto en la descripción de un solo documento (número de coocurrencias). Como tal, cuando dos palabras clave aparecen juntas de manera consistente, el índice de equivalencia es igual a la unidad; cuando nunca aparecen juntas, es cero [20]. En consecuencia, cuanto mayor es el porcentaje de documentos en los que se muestran dos palabras clave juntas respecto a la totalidad de documentos evaluados,

más gruesa es la línea entre esferas de la red temática [20]. La Figura 4 presenta un ejemplo de una red temática y sus palabras clave.

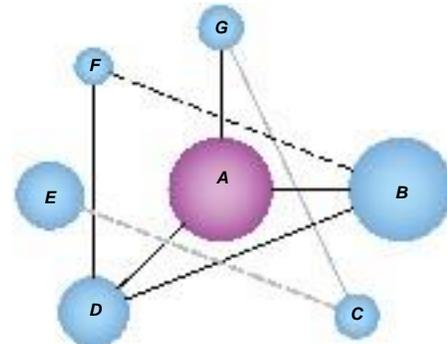


Fig. 4 Ejemplo de la estructura de la red temática.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Gráfico superpuesto y mapa de evolución

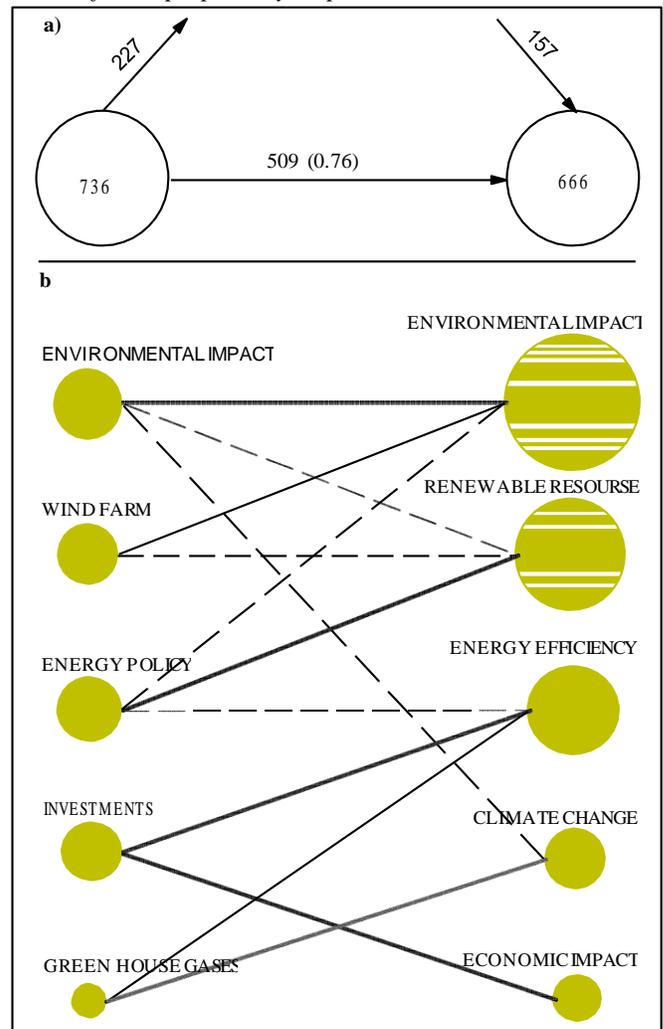


Fig. 5 Superposición y evolución de los sistemas de energía eólica.

En este apartado se presenta el análisis de mapeo científico conceptual de los sistemas de energía eólica. Los resultados muestran que los sistemas de energía eólica se relacionan con el cambio climático, el impacto económico, la eficiencia energética, el impacto medioambiental, los recursos renovables, la política energética, los gases de invernadero, las inversiones y los parques eólicos. En la Fig. 5 (a) se muestra el mapa superpuesto, mientras que en la Fig. 5 (b) se muestra el mapa de evolución. El mapa superpuesto indica que el 76% de términos se mantienen de un periodo a otro, donde el campo de investigación evaluado se está consolidando paulatinamente frente al desarrollo sostenible.

Ello se relaciona con las diferentes propuestas realizadas por medio de los investigadores, en dirección a los recursos energéticos renovables. De esa forma, la energía eólica es considerada como una forma eficiente y sostenible de producir energía que favorecen los impactos contra el cambio climático. El mapa de evolución muestra el abordaje de los temas importantes dentro del campo de investigación. Siendo los temas más relevantes el impacto medioambiental, los recursos renovables y la política energética que se relacionan con los sistemas de energía eólica.

B. Mapa estratégico

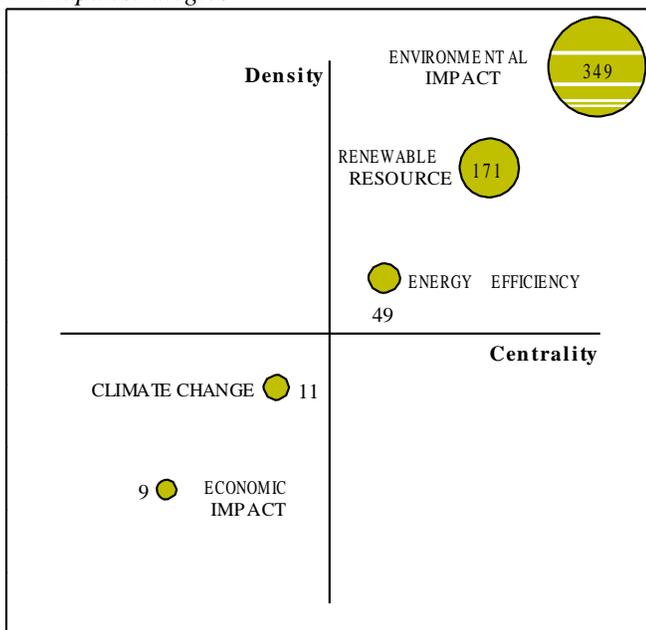


Fig. 6 Mapa estratégico para el periodo 2007 - 2015.

En la Fig. 6 se muestra el mapa estratégico para el periodo 2007 – 2015. El impacto medioambiental, los recursos renovables y la eficiencia energética están dentro del cuadrante 1. Estos tópicos representan a los temas motores y fundamentales del campo de la investigación, considerándose muy importantes para la especialidad. Mientras que el cambio climático y el impacto económico se encuentran en el tercer cuadrante, representando los temas en declive relacionados

con los sistemas de energía eólica. Por lo tanto, los temas en declive se relacionan con aquellos que cada vez están siendo menos importantes en el campo de investigación abordado.

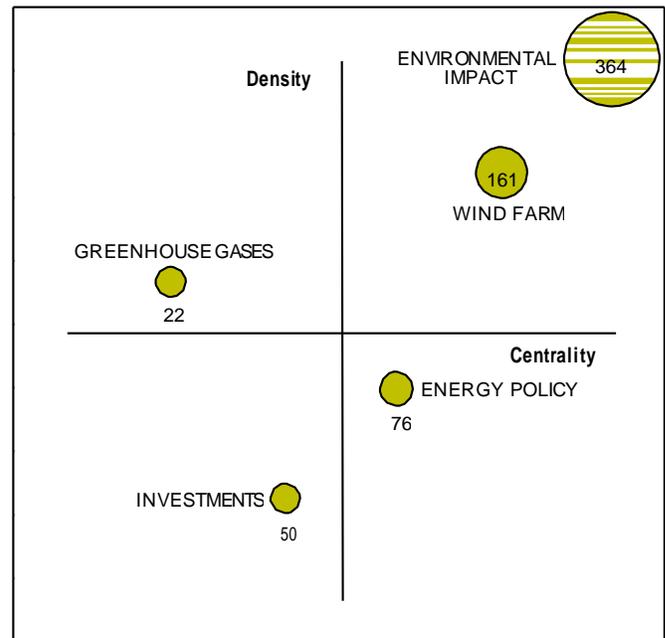


Fig. 7 Mapa estratégico para el periodo 2016 - 2021.

El mapa estratégico para el periodo 2016 – 2021 muestra 5 temas representativos relacionados con los sistemas de energía eólica (Fig. 6). El impacto medioambiental y los parques eólicos se encuentran en el primer cuadrante del mapa estratégico, siendo importantes para este campo por su alta centralidad y densidad. De la misma forma, el tema de gases de invernadero se encuentra en el segundo cuadrante del mapa estratégico, representando un tema aislado. Es decir, este tema se encuentra desarrollado internamente, formado una nueva línea de investigación. Sin embargo, el tema de inversiones se considera en declive por estar en el tercer cuadrante del mapa estratégico. Finalmente, el tema de política energética se encuentra en el cuarto cuadrante, representando un tema transversal e importante del campo de investigación.

i) Impacto medioambiental

Las múltiples ventajas de las energías renovables han sido el motor de un extenso trabajo de investigación durante las últimas dos décadas [28]. De tal forma, los resultados muestran que el tema de impacto medioambiental para el periodo (2016 – 2021) se relaciona con la generación de electricidad, combustibles fósiles, evaluación del ciclo de vida, energías renovables y turbinas eólicas; como se muestra en la Fig. 8. De tal forma que, el repentino aumento en el uso de energía y la emisión de dióxido de carbono (CO₂) es alarmante.

Se plantea que el aumento del nivel de población en las áreas urbanas es el motivo detrás de la alta demanda de la energía, mientras que también se argumenta que la producción

de bienes y servicios podría ser la causa. Independientemente de ello, la energía ha llegado para convertirse como un factor determinante del desarrollo sostenible. Por lo tanto, se ha proyectado que el uso de energía del sector industrial global aumentará a alrededor del 30% para el 2050, mientras que se prevé que el consumo de productos finales crezca y supere la cifra aproximada de 310 cuatrillones de unidades térmicas británicas (BTU) [29]. Dada la proyección, es probable que el aumento del uso de energía afecte la actividad económica, la sociedad y el medio ambiente. Por lo tanto, los gobiernos y los formuladores de políticas deben prestar atención a los lineamientos de energía más limpia para reducir las emisiones de CO₂.

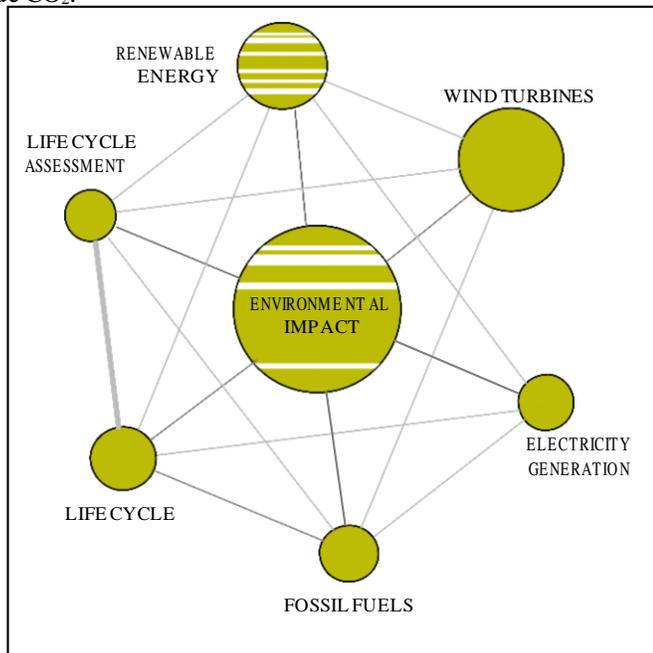


Fig. 8 Red temática de Impacto Medioambiental (periodo 2016 – 2021).

ii) Parques eólicos

La demanda global de energía renovable se está expandiendo en un intento por mitigar los impactos del cambio climático. Según la Fig. 9, los parques eólicos se relacionan con los métodos de evaluación, recursos energéticos, evaluación de impacto ambiental, estructura *offshore*, parques eólicos *offshore* (marina) y *onshore*; considerándose una temática fundamental de los sistemas de energía eólica. La energía eólica marina es, junto con otras formas de energía renovable, el núcleo de la búsqueda de la neutralidad de carbono de varios países. Según la Agencia Internacional de la Energía, la energía eólica marina podría convertirse en la principal fuente de generación de energía para 2042 [30]. En consecuencia, el interés por la energía eólica marina va en aumento. Para 2020, ya se habían instalado 25 GW en Europa y, según las últimas proyecciones de energía en Europa, se podrían implementar 450 GW para 2050 [30].

La energía eólica terrestre compete con otros tipos de uso del suelo. Si bien en el mar puede haber menos intereses y conflictos en competencia que en tierra, el despliegue de la energía eólica marina aún debe tener en cuenta los factores sociales y ecológicos, además de la viabilidad económica de la producción de energía. La optimización del diseño del parque eólico depende en gran medida de la maximización de potencia y la minimización de costes [31]. El primero se representa maximizando la producción anual de energía del parque eólico; y el segundo, suele mantenerse minimizando la relación entre el costo y la producción de energía (costo de la energía - COE) [32]. Mientras que el costo nivelado de la energía (LCOE) es la relación entre el costo de vida útil y la producción de energía durante el mismo periodo [33].

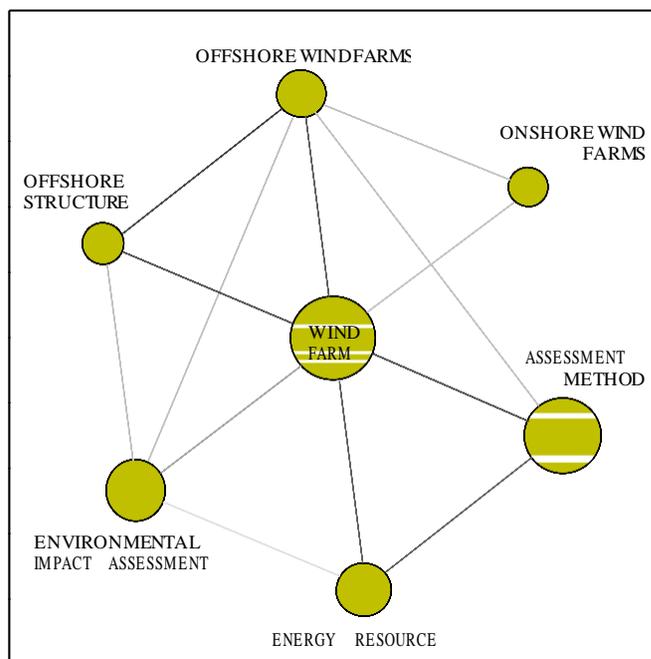


Fig. 9 Red temática de Parques Eólicos (periodo 2016 – 2021).

En [34] adoptaron el LCOE con el objetivo de optimizar el diseño con una consideración adicional del costo de capital de múltiples tipos de turbinas. La aplicación de LCOE en el tema de la optimización del diseño de parques eólicos aún es limitada y es necesario examinar su razonabilidad y desempeño en este tema. Por lo tanto, para resolver el problema de optimización del diseño del parque eólico, se requiere técnicas mucho más prácticas. Las técnicas más comúnmente utilizadas en el problema de optimización del diseño de parques eólicos son los algoritmos de optimización heurística, como los algoritmos genéticos (GA) y la optimización de enjambres de partículas (PSO) [35].

GA se utiliza para la optimización del diseño de parques eólicos con mayor frecuencia [36]. Por lo general, se basa en un diseño de cuadrícula para emplear la codificación de una solución de tipo de cadena binaria y logra resolver el problema

de optimización del diseño [37]. Por otro lado, la optimización del diseño se implementa directamente en base a las coordenadas del aerogenerador con el método PSO debido a su mecanismo de búsqueda global continua [38]. PSO tiene menos limitaciones en el rendimiento de optimización, pero menor eficiencia que GA debido a su gran trabajo computacional [39]. La eficiencia de los algoritmos de optimización aún debe mejorarse para la optimización del diseño del parque eólico.

iii) *Política energética*

En la Fig. 10 se muestra la red temática de políticas energéticas. Ella se relaciona con los temas de economía, contaminación ambiental, políticas públicas, y recursos de energías renovables. El despliegue de la política de la energía eólica tiene falta de aceptación social y resistencia local [40]. Es decir, el entrelazamiento de políticas, el despliegue de tecnología, las inversiones de mercado y la aceptación social requieren herramientas analíticas para estimar la dinámica y los cambios en la relación entre energía y sociedad [41]. En particular, examinar qué y quiénes influyen en las construcciones de las políticas de transición energética y cómo lo hacen; así como qué preocupaciones se consideran y se ignoran [42]. Ello puede hacer avanzar las exploraciones en relación con la política energética. Dicho análisis puede contribuir a describir, reformular y construir el conocimiento relevante para la formulación de políticas futuras y, como tal, permitir futuros lineamientos energéticos más justos y sostenibles.

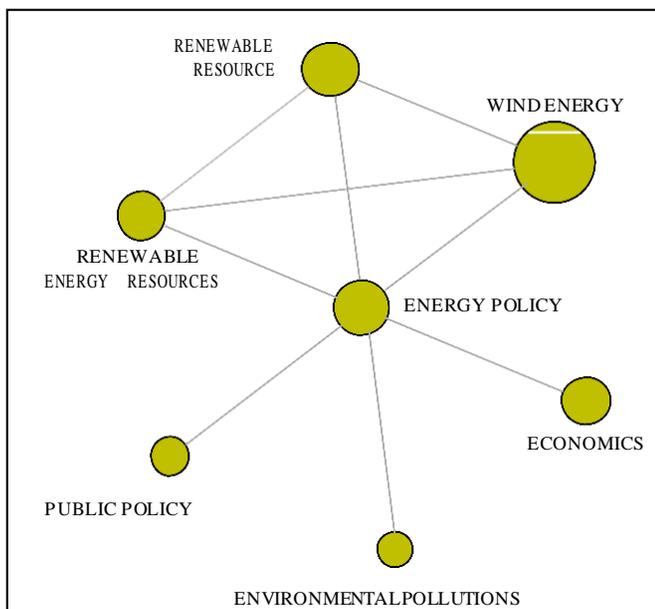


Fig. 10 Red temática de política energética (período 2016 – 2021).

B. *Desempeño de los temas de investigación*

En la Tabla 1 se presenta el análisis de desempeño del campo de investigación. Es decir, para el periodo 2016 – 2021 los temas de impacto medioambiental y parque eólico son los temas más relacionados con los sistemas de energía eólica.

Mientras que para el periodo 2007 – 2015, además de los recursos renovables, se mantiene el tema de impacto medioambiental. La calidad de la energía eólica marina es superior a la calidad de la energía eólica terrestre, porque la primera se genera de una forma más consistente y con una velocidad promedio anual más alta. La mayor parte del potencial eólico marino se distribuye en zonas de agua con una profundidad de más de 60 m, y el porcentaje de este recurso llega hasta el 80%.

TABLA I
DESEMPEÑO DEL DE LOS SISTEMAS DE ENERGÍA EÓLICA

Periodo	Grupo	Centralidad	Densidad
2016-2021	Impacto medioambiental	46.15	20.99
	Parque eólico	28.19	10.75
	La política energética	19.64	3.82
	Inversiones	16.43	3.21
	Gases de invernadero	7.25	4.5
2007-2015	Impacto medioambiental	52.46	12.35
	Recurso renovable	42.07	10.68
	Eficiencia energética	22.38	2.82
	Cambio climático	8.63	1.9
	Impacto económico	5.78	1.79

Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar turbinas eólicas marinas debido a que es más favorable que las terrestres. Además, se espera que el potencial eólico marino facilite la transición hacia recursos energéticos renovables y mantenga el aumento de la temperatura global en 1,5 C, según las recomendaciones tratadas intergubernamentalmente sobre el Cambio Climático. Finalmente, los peligros ambientales causados por los parques eólicos terrestres, como los impactos visuales y acústicos, además de la energía eólica terrestre de menor calidad pueden evitarse instalando turbinas eólicas en regiones marinas.

Sin embargo, las turbinas eólicas marinas enfrentan un desafío significativo de alto costo nivelado de la electricidad (LCOE). A diferencia de los recursos energéticos existentes, la tecnología eólica marina se encuentra en la etapa pre-comercial, por lo que todavía hay espacio para reducir el LCOE. Se sabe que el método para reducir el LCOE es reducir el costo total o mejorar la producción de energía. Por lo tanto, un diseño óptimo con un enfoque de control adecuado es la solución para abordar todos estos desafíos. Técnicamente, las turbinas eólicas marinas se pueden clasificar como turbinas eólicas marinas fijas en el fondo y turbinas eólicas marinas flotantes (FOWTs), en base al diseño de sus subestructuras.

Las turbinas eólicas fijas no se recomiendan para las turbinas eólicas que operan en el océano, porque las limitaciones económicas obstaculizan el desarrollo de una estructura de soporte fija que operan más allá de los 60 m de profundidad en el agua. Debido a que el LCOE de una turbina

REFERENCIAS

eólica marina fijada en el fondo aumenta significativamente a medida que aumenta la profundidad del agua, el FOWT se convierte en una solución óptima bajo el compromiso de costo-beneficio. Para el diseño del sistema FOWT, se cree que colocar una turbina eólica en la parte superior de una plataforma flotante es una solución factible para operar en el océano. Las partes principales de un sistema FOWT son (i) una turbina eólica para recolectar energía del viento, (ii) un soporte de plataforma flotante y (iii) líneas de amarre para proporcionar soporte a la estructura de la turbina eólica en términos de orientación y posición. Hay dos tipos de turbinas eólicas que pueden utilizarse para generar energía eólica: turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT) y turbinas eólicas de eje vertical (VAWT).

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha abordado el desempeño de los sistemas de energía eólica y las interacciones dentro de su campo. Por lo tanto, se concluye que la energía eólica desempeña un papel clave en la combinación de generación de energía renovable. Sin embargo, ellos enfrentan diferentes tipos de problemas como el equilibrio en la adecuación de los recursos, confiabilidad de la red, estabilidad y eficiencia económica. Los resultados muestran que los sistemas de energía eólica se relacionan con el cambio climático, el impacto económico, la eficiencia energética, el impacto medioambiental, los recursos renovables, la política energética, los gases de invernadero, las inversiones y los parques eólicos.

Dentro de los parques eólicos, las turbinas eólicas marinas presentan un alto costo nivelado de electricidad (LCOE). A diferencia de la generación eléctrica convencional, la tecnología eólica marina aún no se encuentra en la etapa comercial; y su industrialización podría reducir el LCOE. Ello se puede reducir en base a dos criterios: optimizando el costo total o mejorando la producción de energía. Por lo tanto, la solución frente a estos desafíos se relaciona con un diseño óptimo, bajo un enfoque de un control adecuado. La literatura existente recomienda que las turbinas eólicas marinas flotantes (FOWT) se convierten en una solución óptima en función del costo-beneficio.

Finalmente, el desempeño del campo de investigación de los métodos encontrados en las aplicaciones de sistemas de energía eólica para el periodo 2016 – 2021 comprende los temas de impacto medioambiental y parque eólico como los temas más relacionados con la energía eólica. Mientras que para el periodo 2007 – 2015, además de los recursos renovables, se mantiene el tema de impacto medioambiental como los temas más importantes de este campo de investigación por su alta centralidad y densidad.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación no recibió ninguna subvención específica de agencias de financiación en los sectores público, comercial o sin fines de lucro.

- [1] EIA, “EIA projects nearly 50% increase in world energy usage by 2050, led by growth in Asia,” Sep. 24, 2019. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41433> (accessed Jan. 24, 2022).
- [2] E. Sugawara and H. Nikaido, “EIA energy outlook 2020,” 2019.
- [3] R. Cergibozan, “Renewable energy sources as a solution for energy security risk: Empirical evidence from OECD countries,” *Renew. Energy*, vol. 183, pp. 617–626, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.RENENE.2021.11.056.
- [4] Q. Tu, J. Mo, Z. Liu, C. Gong, and Y. Fan, “Using green finance to counteract the adverse effects of COVID-19 pandemic on renewable energy investment-The case of offshore wind power in China,” *Energy Policy*, vol. 158, p. 112542, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.ENPOL.2021.112542.
- [5] E. M. Hartl, E. P. Monnelly, and R. D. Elderkin, “BP Statistical Review of World Energy June 2011,” 2011. doi: 10.1016/b978-0-12-328480-8.50010-x.
- [6] R. Zeng and A. Chini, “A review of research on embodied energy of buildings using bibliometric analysis,” *Energy Build.*, vol. 155, pp. 172–184, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2017.09.025.
- [7] C. Gao, M. Sun, Y. Geng, R. Wu, and W. Chen, “A bibliometric analysis based review on wind power price,” *Appl. Energy*, vol. 182, pp. 602–612, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.APENERGY.2016.08.144.
- [8] S. B. Wali *et al.*, “Grid-connected lithium-ion battery energy storage system: A bibliometric analysis for emerging future directions,” *J. Clean. Prod.*, vol. 334, p. 130272, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.130272.
- [9] Y. Qin, Z. Xu, X. Wang, and M. Škare, “Green energy adoption and its determinants: A bibliometric analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 153, p. 111780, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111780.
- [10] H. Tan *et al.*, “Global evolution of research on green energy and environmental technologies: A bibliometric study,” *J. Environ. Manage.*, vol. 297, p. 113382, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2021.113382.
- [11] M. Bortoluzzi, C. Correia de Souza, and M. Furlan, “Bibliometric analysis of renewable energy types using key performance indicators and multicriteria decision models,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 143, p. 110958, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.110958.
- [12] M. S. Reza *et al.*, “Energy storage integration towards achieving grid decarbonization: A bibliometric analysis and future directions,” *J. Energy Storage*, vol. 41, p. 102855, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.EST.2021.102855.
- [13] D. F. Dominković, J. M. Weinand, F. Scheller, M. D’Andrea, and R. McKenna, “Reviewing two decades of energy system analysis with bibliometrics,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 153, p. 111749, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111749.
- [14] L. Elie, C. Granier, and S. Rigot, “The different types of renewable energy finance: A Bibliometric analysis,” *Energy Econ.*, vol. 93, p. 104997, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ENERCO.2020.104997.
- [15] S. S. Kulkarni and D. J. Edwards, “A bibliometric review on the implications of renewable offshore marine energy development on marine species,” *Aquac. Fish.*, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.AAF.2021.10.005.
- [16] P. Arévalo-Cordero, D. J. Benavides, J. L. Espinoza, L. Hernández-Callejo, and F. Jurado, “Optimal energy management strategies to reduce diesel consumption for a hybrid off-grid system,” *Rev. Fac. Ing.*, no. 98, pp. 47–58, 2020, doi: 10.17533/udea.redin.20200471.
- [17] J. D. Suárez-Gómez, J. A. Polanco, and M. Escobar-Sierra, “Understanding the role of territorial factors in the large-scale hydropower business sustainability: A systematic literature review,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 3249–3266, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.05.026.
- [18] H. Abudu and R. Sai, “Examining prospects and challenges of Ghana’s petroleum industry: A systematic review,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 841–858, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.EGYR.2020.04.009.
- [19] E. Zarate-Perez, R. Sebastián, and J. Grados, “Online LACCEI Perspective Based on Bibliometric Analysis,” in *19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education Caribbean*

- Conference for Engineering and Technology: “Prospective and Trends in Technology and Skills for Sustainable Social Development”* and “*Leveraging Emerging Technologies to Con*, 2021, vol. 2021-July, doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.267.
- [20] M. J. Cobo, A. G. López-Herrera, E. Herrera-Viedma, and F. Herrera, “SciMAT: A new science mapping analysis software tool,” *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 8, pp. 1609–1630, Aug. 2012, doi: 10.1002/asi.22688.
- [21] M. J. Cobo, A. G. López-Herrera, E. Herrera-Viedma, and F. Herrera, “SciMAT: Version 1.0 User guide,” Spain, 2016.
- [22] M. J. Cobo, A. G. López-Herrera, E. Herrera-Viedma, and F. Herrera, “Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools,” *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.*, vol. 62, no. 7, pp. 1382–1402, Jul. 2011, doi: 10.1002/asi.21525.
- [23] N. J. van Eck and L. Waltman, “Visualizing Bibliometric Networks,” in *Measuring Scholarly Impact*, Springer, Cham, 2014, pp. 285–320.
- [24] H.-N. Su and P.-C. Lee, “Mapping knowledge structure by keyword co-occurrence: a first look at journal papers in Technology Foresight,” *Scientometrics*, vol. 85, no. 1, pp. 65–79, Jun. 2010, doi: 10.1007/S11192-010-0259-8.
- [25] M. Gutiérrez-Salcedo, M. Á. Martínez, J. A. Moral-Munoz, E. Herrera-Viedma, and M. J. Cobo, “Some bibliometric procedures for analyzing and evaluating research fields,” *Appl. Intell.* 2017 485, vol. 48, no. 5, pp. 1275–1287, Dec. 2017, doi: 10.1007/S10489-017-1105-Y.
- [26] R. Malik, A. Visvizi, and M. Skrzek-Lubasińska, “The Gig Economy: Current Issues, the Debate, and the New Avenues of Research,” *Sustain.* 2021, Vol. 13, Page 5023, vol. 13, no. 9, p. 5023, Apr. 2021, doi: 10.3390/SU13095023.
- [27] M. J. Cobo, A. G. López-Herrera, E. Herrera-Viedma, and F. Herrera, “An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field,” *J. Informetr.*, vol. 5, no. 1, pp. 146–166, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.joi.2010.10.002.
- [28] M. A. Abdelkareem, M. El Haj Assad, E. T. Sayed, and B. Soudan, “Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants,” *Desalination*, vol. 435, pp. 97–113, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.DESAL.2017.11.018.
- [29] A. Zakari, I. Khan, D. Tan, R. Alvarado, and V. Dagar, “Energy efficiency and sustainable development goals (SDGs),” *Energy*, p. 122365, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.122365.
- [30] E. A. Virtanen *et al.*, “Balancing profitability of energy production, societal impacts and biodiversity in offshore wind farm design,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 158, p. 112087, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2022.112087.
- [31] A. Cansiz, C. Faydaci, M. T. Qureshi, O. Usta, and D. T. McGuinness, “Integration of a SMES–Battery-Based Hybrid Energy Storage System into Microgrids,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 31, no. 5, pp. 1449–1457, 2018, doi: 10.1007/s10948-017-4338-4.
- [32] P. P. Kumar and R. P. Saini, “Optimization of an off-grid integrated hybrid renewable energy system with different battery technologies for rural electrification in India,” *J. Energy Storage*, vol. 32, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101912.
- [33] J. R. López-Robles, M. J. Cobo, N. K. Gamboa-Rosales, and E. Herrera-Viedma, “Mapping the intellectual structure of the international journal of computers communications and control: A content analysis from 2015 to 2019,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1243 AISC, pp. 296–303, doi: 10.1007/978-3-030-53651-0_25.
- [34] J. R. López-Robles, J. R. Otegi-Olaso, I. Porto-Gomez, H. Gamboa-Rosales, and N. K. Gamboa-Rosales, “Understanding the intellectual structure and evolution of Competitive Intelligence: a bibliometric analysis from 1984 to 2017,” *Technol. Anal. Strateg. Manag.*, vol. 32, no. 5, pp. 604–619, May 2020, doi: 10.1080/09537325.2019.1686136.
- [35] J. Faria, J. Pombo, M. do Rosário Calado, and S. Mariano, “Power management control strategy based on artificial neural networks for standalone PV applications with a hybrid energy storage system,” *Energies*, vol. 12, no. 5, 2019, doi: 10.3390/en12050902.
- [36] P. Arévalo, M. Tostado-Véliz, and F. Jurado, “A novel methodology for comprehensive planning of battery storage systems,” *J. Energy Storage*, vol. 37, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102456.
- [37] V. N. Coelho *et al.*, “Multi-objective energy storage power dispatching using plug-in vehicles in a smart-microgrid,” *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 730–742, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.11.084.
- [38] Q. Gong and J. Lei, “Design of a bidirectional energy storage system for a vanadium redox flow battery in a microgrid with SOC estimation,” *Sustain.*, vol. 9, no. 3, 2017, doi: 10.3390/su9030441.
- [39] S. Dhundhara, Y. P. Verma, and A. Williams, “Techno-economic analysis of the lithium-ion and lead-acid battery in microgrid systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 177, pp. 122–142, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.09.030.
- [40] J. Carroquino, C. Escriche-Martínez, L. Valiño, and R. Dufo-López, “Comparison of economic performance of lead-acid and li-ion batteries in standalone photovoltaic energy systems,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 8, 2021, doi: 10.3390/app11083587.
- [41] N. Sifákis, S. Konidakis, and T. Tsoutsos, “Hybrid renewable energy system optimum design and smart dispatch for nearly Zero Energy Ports,” *J. Clean. Prod.*, vol. 310, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127397.
- [42] M. Torkashvand, A. Khodadadi, M. B. Sanjareh, and M. H. Nazary, “A Life Cycle-Cost Analysis of Li-ion and Lead-Acid BESSs and Their Actively Hybridized ESSs with Supercapacitors for Islanded Microgrid Applications,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 153215–153225, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3017458.