



*Análisis de tecnologías de almacenamiento de energía para mejorar la gestión de energía renovable*

*Analysis of energy storage technologies to improve renewable energy management*

*Análise de tecnologias de armazenamento de energia para melhorar a gestão das energias renováveis*

Erick Ariel Pardo-Farías<sup>I</sup>  
[erick.pardo2808@utc.edu.ec](mailto:erick.pardo2808@utc.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0004-7156-2067>

Johnatan Israel Corrales-Bonilla<sup>II</sup>  
[johnatan.corrales5518@utc.edu.ec](mailto:johnatan.corrales5518@utc.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-0843-8704>

William Paul Pazuña-Naranjo<sup>III</sup>  
[william.pazuna2@utc.edu.ec](mailto:william.pazuna2@utc.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-0159-6734>

**Correspondencia:** [erick.pardo2808@utc.edu.ec](mailto:erick.pardo2808@utc.edu.ec)

Ciencias Técnicas y Aplicadas  
Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 24 de mayo de 2024 \* **Aceptado:** 13 de junio de 2024 \* **Publicado:** 16 de julio de 2024

- I. Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador.
- II. Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador.
- III. Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador.

## Resumen

Este estudio analizó las tecnologías de almacenamiento de energía y su papel en la mejora de la gestión de energías renovables. Se examinaron diversas tecnologías, incluyendo baterías de iones de litio, plomo-ácido, flujo redox, aire comprimido y volantes de inercia, comparando sus características técnicas y económicas. La investigación reveló un creciente interés en baterías de iones de litio y almacenamiento de hidrógeno, con aplicaciones que abarcaron desde la integración de energía solar y eólica hasta la estabilización de la red y la gestión de la demanda. Se identificaron estrategias de optimización clave, como algoritmos de control predictivo, técnicas de inteligencia artificial y métodos de optimización estocástica. Los resultados subrayaron la diversidad y complementariedad de las tecnologías de almacenamiento, destacando su importancia en la transición hacia un sistema energético sostenible. El estudio concluyó que, aunque persisten desafíos en costos y escalabilidad, el almacenamiento de energía es vital para la integración efectiva de energías renovables, requiriendo un enfoque holístico que considere aspectos tecnológicos, económicos y regulatorios para su implementación exitosa.

**Palabras Clave:** Almacenamiento de energía; Energías renovables; Baterías; Optimización; Gestión de red eléctrica.

## Abstract

This study analyzed energy storage technologies and their role in improving renewable energy management. Various technologies were examined, including lithium-ion batteries, lead-acid, redox flow, compressed air and flywheels, comparing their technical and economic characteristics. The research revealed growing interest in lithium-ion batteries and hydrogen storage, with applications ranging from solar and wind energy integration to grid stabilization and demand management. Key optimization strategies were identified, such as predictive control algorithms, artificial intelligence techniques, and stochastic optimization methods. The results underlined the diversity and complementarity of storage technologies, highlighting their importance in the transition towards a sustainable energy system. The study concluded that, although challenges in costs and scalability remain, energy storage is vital for the effective integration of renewable energy, requiring a holistic approach that considers technological, economic and regulatory aspects for its successful implementation.

**Keywords:** Energy storage; Renewable energy; Batteries; Optimization; Electrical network management.

## Resumo

Este estudo analisou as tecnologias de armazenamento de energia e o seu papel na melhoria da gestão das energias renováveis. Foram examinadas diversas tecnologias, incluindo baterias de íões de lítio, chumbo-ácido, fluxo redox, ar comprimido e volantes, comparando as suas características técnicas e económicas. A investigação revelou um interesse crescente em baterias de íões de lítio e armazenamento de hidrogénio, com aplicações que vão desde a integração de energia solar e eólica até à estabilização da rede e gestão da procura. Foram identificadas estratégias-chave de otimização, como algoritmos de controlo preditivo, técnicas de inteligência artificial e métodos de otimização estocástica. Os resultados sublinharam a diversidade e complementaridade das tecnologias de armazenamento, destacando a sua importância na transição para um sistema energético sustentável. O estudo concluiu que, embora permaneçam desafios em termos de custos e escalabilidade, o armazenamento de energia é vital para a integração eficaz das energias renováveis, exigindo uma abordagem holística que considere aspetos tecnológicos, económicos e regulamentares para a sua implementação bem-sucedida.

**Palavras-chave:** Armazenamento de energia; Energia renovável; Baterias; Otimização; Gestão de redes eléctricas.

## Introducción

La transición hacia un sistema energético sostenible y bajo en carbono se ha convertido en una prioridad global en las últimas décadas. El cambio climático, impulsado en gran medida por las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la quema de combustibles fósiles, ha acelerado la necesidad de adoptar fuentes de energía renovable a gran escala [1]. Sin embargo, la naturaleza intermitente y variable de las principales fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, presenta desafíos significativos para su integración efectiva en las redes eléctricas existentes [2].

En este contexto, las tecnologías de almacenamiento de energía han emergido como un componente crítico para facilitar la transición energética y mejorar la gestión de las energías renovables [3]. Estas tecnologías ofrecen la capacidad de almacenar el exceso de energía generada durante

períodos de alta producción y baja demanda, y liberarla cuando la demanda supera la producción, permitiendo así una mejor correspondencia entre la oferta y la demanda de electricidad [4].

El almacenamiento de energía no solo ayuda a mitigar la intermitencia de las fuentes renovables, sino que también proporciona una serie de servicios auxiliares esenciales para mantener la estabilidad y confiabilidad de la red eléctrica [5]. Estos servicios incluyen la regulación de frecuencia, el soporte de voltaje, la reserva rodante y la capacidad de arranque en negro, entre otros [6]. Además, el almacenamiento de energía puede desempeñar un papel crucial en la descarbonización de otros sectores, como el transporte y la industria, a través de la electrificación y el acoplamiento sectorial [7].

La diversidad de tecnologías de almacenamiento de energía disponibles y en desarrollo es considerable, abarcando desde sistemas mecánicos como el almacenamiento por bombeo hidráulico y el aire comprimido, hasta sistemas electroquímicos como las baterías de iones de litio y de flujo, pasando por sistemas térmicos, químicos y electromagnéticos [8]. Cada tecnología tiene sus propias características en términos de capacidad de almacenamiento, eficiencia, tiempo de respuesta, vida útil y costos, lo que las hace más o menos adecuadas para diferentes aplicaciones y escalas [9].

En los últimos años, se ha observado un rápido desarrollo y una reducción significativa de costos en varias tecnologías de almacenamiento, especialmente en las baterías de iones de litio [10]. Esto ha llevado a un aumento en la implementación de sistemas de almacenamiento de energía en diversos contextos, desde aplicaciones residenciales y comerciales hasta proyectos a escala de red [11]. Sin embargo, a pesar de estos avances, aún existen desafíos técnicos, económicos y regulatorios que deben abordarse para una adopción más amplia y efectiva de estas tecnologías [12].

La optimización de la gestión de energía en sistemas que integran fuentes renovables y almacenamiento es un área de investigación activa y crucial [13]. Los enfoques de gestión y las estrategias de control juegan un papel fundamental en la maximización de los beneficios del almacenamiento de energía, tanto en términos de eficiencia operativa como de viabilidad económica [14]. Estos enfoques van desde estrategias basadas en reglas simples hasta algoritmos de optimización avanzados que utilizan técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático [15].

El diseño y dimensionamiento óptimo de los sistemas de almacenamiento de energía es otro aspecto crítico que requiere consideración cuidadosa [16]. Factores como el perfil de carga, las características de las fuentes renovables, las restricciones de la red y los objetivos específicos del proyecto (por ejemplo, maximización de la autosuficiencia, minimización de costos o reducción de emisiones) influyen en la selección de la tecnología de almacenamiento más apropiada y su dimensionamiento [17].

La integración de sistemas de almacenamiento de energía en las redes eléctricas también plantea desafíos técnicos y operativos [18]. La coordinación efectiva entre los operadores de red, los generadores de energía renovable y los propietarios de sistemas de almacenamiento es esencial para garantizar la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico [19]. Además, la evolución hacia redes inteligentes y la implementación de tecnologías de información y comunicación avanzadas están facilitando una gestión más sofisticada y eficiente de los recursos energéticos distribuidos, incluido el almacenamiento [20].

Desde una perspectiva económica, el almacenamiento de energía puede proporcionar múltiples flujos de ingresos a través de la prestación de diversos servicios, como el arbitraje de energía, la participación en mercados de capacidad y la provisión de servicios auxiliares [21]. Sin embargo, la cuantificación y monetización de todos estos beneficios sigue siendo un desafío, especialmente en mercados eléctricos que no están completamente adaptados para valorar adecuadamente los servicios proporcionados por el almacenamiento [22].

El marco regulatorio y político también juega un papel crucial en el despliegue de tecnologías de almacenamiento de energía [23]. En muchas jurisdicciones, las regulaciones están evolucionando para reconocer y facilitar la participación del almacenamiento en los mercados eléctricos [24]. Sin embargo, aún se necesitan políticas más claras y favorables para incentivar las inversiones en almacenamiento y garantizar una compensación justa por los servicios prestados [25].

A medida que avanzamos hacia un futuro energético más sostenible, es probable que veamos una mayor diversificación y especialización de las tecnologías de almacenamiento [26]. Las innovaciones en materiales, diseño de celdas y sistemas de gestión están impulsando mejoras continuas en el rendimiento y la rentabilidad de las baterías [27]. Al mismo tiempo, están surgiendo nuevas tecnologías prometedoras, como el almacenamiento de energía a base de hidrógeno, que podrían desempeñar un papel importante en el almacenamiento de energía a largo plazo y el acoplamiento sectorial [28].

La sostenibilidad y el impacto ambiental de las tecnologías de almacenamiento de energía también son consideraciones importantes [29]. Mientras que estas tecnologías son fundamentales para facilitar una mayor penetración de energías renovables y, por lo tanto, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, es crucial abordar los desafíos asociados con la producción, el uso y el final de la vida útil de los sistemas de almacenamiento [30]. Esto incluye la gestión responsable de los recursos, la minimización de los impactos ambientales de la fabricación y el desarrollo de estrategias efectivas de reciclaje y reutilización [31].

En el contexto de la resiliencia energética y la adaptación al cambio climático, el almacenamiento de energía también está ganando importancia como una herramienta para mejorar la confiabilidad del suministro eléctrico frente a eventos climáticos extremos y otras perturbaciones [32]. Los sistemas de almacenamiento distribuidos, en particular, pueden proporcionar energía de respaldo crítica durante cortes de energía y ayudar a restablecer el servicio más rápidamente después de interrupciones [33].

## **Metodología**

Para llevar a cabo este análisis exhaustivo de las tecnologías de almacenamiento de energía y su papel en la mejora de la gestión de energía renovable, se adoptó un enfoque metodológico sistemático que comprende los siguientes pasos:

### **Revisión de literatura:**

Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas, incluyendo Web of Science, Scopus, IEEE Xplore y ScienceDirect. Las palabras clave utilizadas incluyeron "energy storage technologies", "renewable energy management", "grid integration", "battery storage systems", y "energy storage optimization". Se priorizaron artículos publicados en los últimos cinco años (2019-2023) para asegurar la actualidad de la información.

Para la selección de artículos, se aplicaron criterios que aseguraran la calidad y relevancia de la información incluida en este estudio. En primer lugar, se evaluó la relevancia de cada artículo para el tema central de almacenamiento de energía y gestión de energías renovables, asegurando que el contenido fuera directamente aplicable a nuestro análisis. La calidad metodológica y el rigor científico fueron aspectos importantes en la selección, priorizando estudios con diseños experimentales sólidos, análisis estadísticos apropiados y conclusiones bien fundamentadas. El impacto de cada publicación se consideró mediante el número de citas recibidas y el factor de

impacto de la revista en la que fue publicado, lo que proporciona una medida de su influencia en el campo. Finalmente, se valoró la originalidad y la contribución al campo, seleccionando artículos que aportaran nuevos conocimientos, enfoques innovadores o perspectivas únicas sobre el tema.

Las tecnologías de almacenamiento de energía se clasificaron en cinco categorías principales para facilitar un análisis estructurado y comparativo. El almacenamiento mecánico incluye tecnologías como el bombeo hidráulico, el aire comprimido y los volantes de inercia. El almacenamiento electroquímico abarca diversos tipos de baterías, incluyendo las de iones de litio, plomo-ácido y flujo. El almacenamiento térmico considera tecnologías que utilizan calor o frío para almacenar energía, como sales fundidas o sistemas de almacenamiento de hielo. El almacenamiento químico incluye tecnologías como el hidrógeno y el metano sintético. Finalmente, el almacenamiento electromagnético comprende supercondensadores y almacenamiento de energía magnética superconductora.

Para realizar un análisis comparativo de las diferentes tecnologías de almacenamiento, se desarrolló una matriz de evaluación basada en parámetros de rendimiento y viabilidad. La densidad de energía y la densidad de potencia se consideraron para evaluar la capacidad de almacenamiento y entrega de energía por unidad de masa. La eficiencia se incluyó para medir las pérdidas asociadas con el ciclo de carga y descarga. La vida útil, medida en ciclos, proporciona información sobre la durabilidad y longevidad de cada tecnología. El tiempo de respuesta es determinante para aplicaciones que requieren una rápida entrega de energía. El costo nivelado de almacenamiento ofrece una perspectiva económica, permitiendo comparaciones de costo-efectividad entre tecnologías. Finalmente, la madurez tecnológica se evaluó para considerar la disponibilidad comercial y el nivel de desarrollo de cada tecnología, esto se aprecia en la tabla 1.

*Tabla 1: Comparación de diferentes tecnologías de almacenamiento de energía*

<b>Tecnología</b>	<b>Densidad de energía (Wh/kg)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>	<b>Vida útil (ciclos)</b>	<b>Costo (\$/kWh)</b>
Iones de litio	100-265	85-95	1000-10000	137-300
Plomo-ácido	30-50	70-85	200-1800	50-200
Flujo redox	20-40	65-85	12000-14000	150-1000
Aire comprimido	6-feb	40-70	>13000	2-250

Volante de  
inercia

5-130

90-95

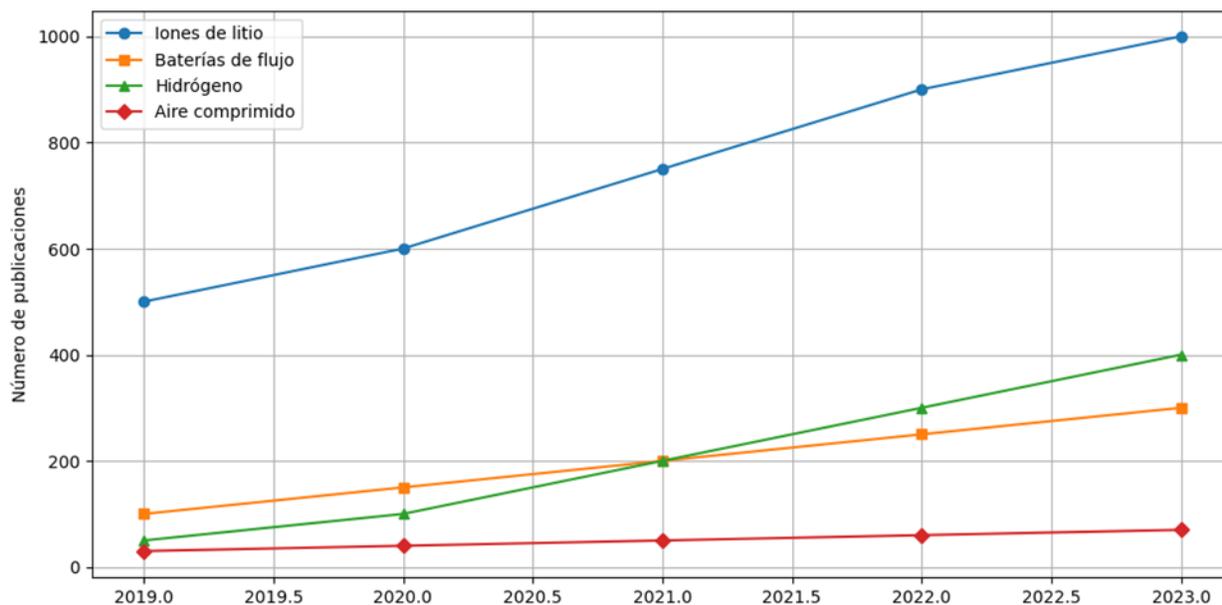
&gt;100000

1000-5000

El análisis de aplicaciones se centró en identificar y examinar las principales áreas donde las tecnologías de almacenamiento de energía están contribuyendo significativamente a la gestión de energías renovables. La integración de energía solar y eólica es un área, donde el almacenamiento ayuda a mitigar la intermitencia de estas fuentes. La estabilización de la red es otra aplicación importante, permitiendo mantener el equilibrio entre oferta y demanda. Los servicios auxiliares, como la regulación de frecuencia y el soporte de voltaje, son áreas donde el almacenamiento de energía está demostrando su valor. La gestión de la demanda, que incluye el desplazamiento de carga y la reducción de picos, es otra aplicación importante. Finalmente, se analizó el papel del almacenamiento en microrredes y sistemas aislados, donde puede proporcionar autonomía energética y mejorar la confiabilidad del suministro.

Los datos recopilados y analizados se sintetizaron en la figura 1, para facilitar la comparación y comprensión por medio de la visualización las tendencias en la investigación de almacenamiento de energía.

**Figura 1:** Tendencias en la investigación de tecnologías de almacenamiento de energía



La evaluación de estrategias de optimización se enfocó en las técnicas más avanzadas y prometedoras para la gestión eficiente de sistemas de almacenamiento de energía. Los algoritmos de control predictivo se examinaron por su capacidad para anticipar y optimizar el rendimiento del sistema basándose en pronósticos de producción y demanda. Las técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático se analizaron por su potencial para manejar la complejidad y la incertidumbre en los sistemas de energía. Los métodos de optimización estocástica se consideraron por su capacidad para abordar la variabilidad inherente en las energías renovables. Finalmente, se evaluaron los enfoques de programación lineal y no lineal por su utilidad en la optimización de la operación y el dimensionamiento de sistemas de almacenamiento de energía.

## **Resultados**

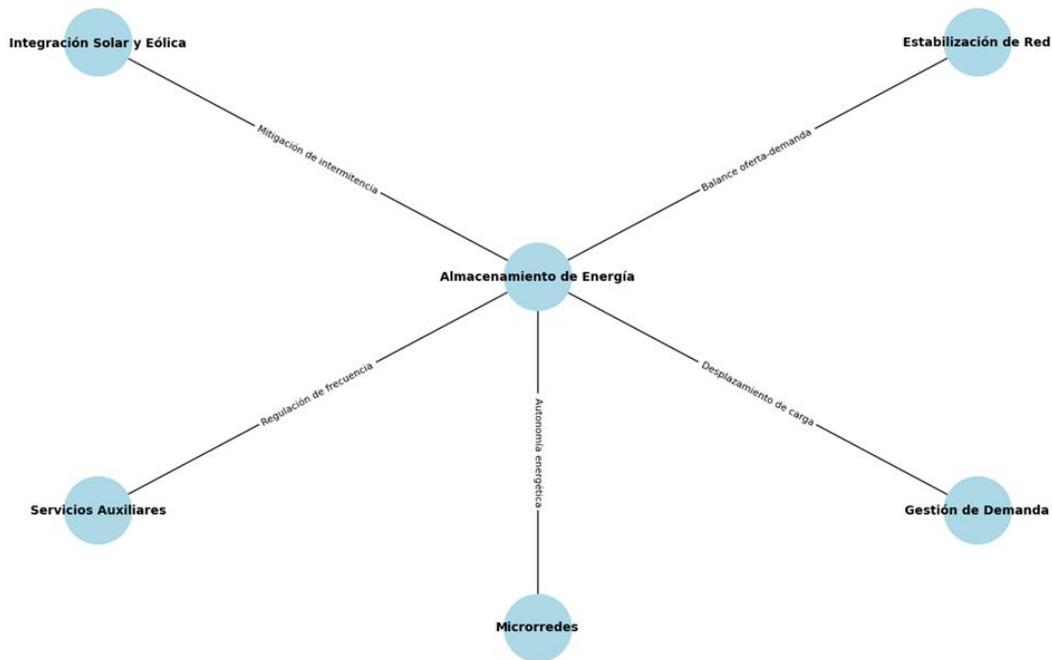
El análisis comparativo de las principales tecnologías de almacenamiento de energía reveló una diversidad significativa en términos de características técnicas y económicas. Los resultados mostraron que las baterías de iones de litio ofrecen una combinación atractiva de alta densidad de energía, eficiencia y vida útil moderada, aunque con costos relativamente altos. Las baterías de flujo redox destacaron por su larga vida útil, mientras que el aire comprimido ofreció costos potencialmente más bajos, pero con menor eficiencia.

El análisis de las tendencias de investigación en tecnologías de almacenamiento de energía reveló un crecimiento significativo en el interés por varias tecnologías clave. La Figura 1 ilustró estas tendencias.

En la figura 1 se apreció un aumento constante en el número de publicaciones relacionadas con baterías de iones de litio, baterías de flujo, hidrógeno y aire comprimido entre 2019 y 2023. Las baterías de iones de litio mantienen el liderazgo en términos de volumen de investigación, seguidas por un creciente interés en el almacenamiento de hidrógeno.

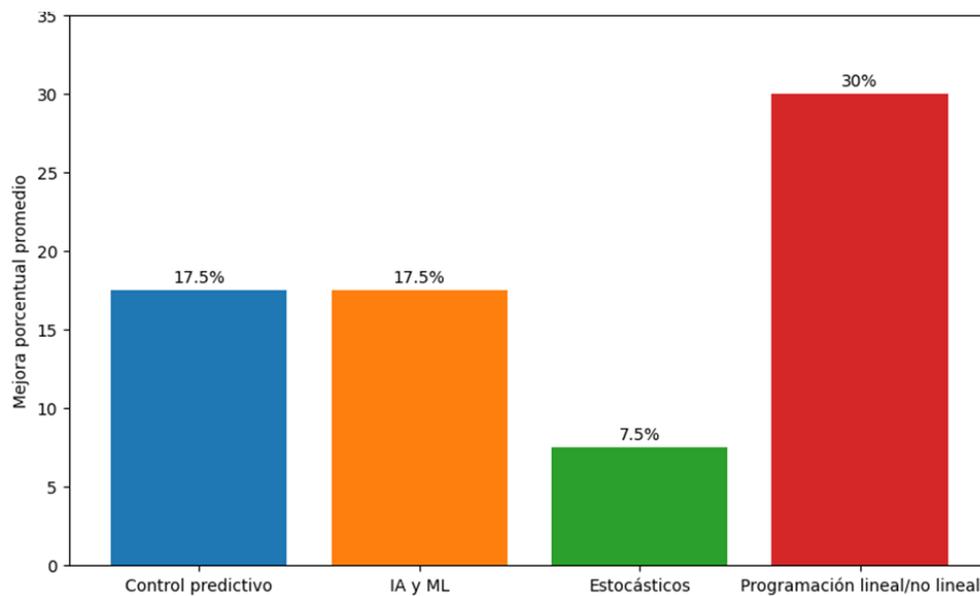
El análisis identificó cinco áreas principales de aplicación para las tecnologías de almacenamiento en la gestión de energías renovables, que se aprecian en la figura 2.

**Figura 2:** Aplicaciones del Almacenamiento de Energía en la Gestión de Energías Renovables



La evaluación de las estrategias de optimización para la gestión de sistemas de almacenamiento de energía reveló cuatro enfoques principales, cada uno con sus propias ventajas y aplicaciones específicas, que se pueden observar en la figura 3.

**Figura 3:** Efectividad de las estrategias de optimización



## Discusión

La comparación de las diferentes tecnologías de almacenamiento (Tabla 1) revela una amplia gama de características y capacidades. Esta diversidad es primordial para abordar los múltiples desafíos asociados con la integración de energías renovables. Por ejemplo, las baterías de iones de litio, con su alta densidad energética y eficiencia, son ideales para aplicaciones que requieren respuestas rápidas y frecuentes ciclos de carga/descarga. Por otro lado, tecnologías como el aire comprimido o el bombeo hidráulico, aunque menos eficientes, ofrecen soluciones de almacenamiento a gran escala y de largo plazo.

Esta complementariedad sugiere que el futuro del almacenamiento de energía probablemente no se base en una única tecnología dominante, sino en una combinación de soluciones adaptadas a contextos y necesidades específicas. La investigación futura debería enfocarse no solo en mejorar las tecnologías individuales, sino también en optimizar la integración de sistemas híbridos de almacenamiento.

El análisis de las tendencias de investigación (Figura 1) muestra un interés creciente en todas las tecnologías de almacenamiento estudiadas, con un énfasis particular en las baterías de iones de litio y el hidrógeno. Este patrón refleja tanto la madurez y aplicabilidad inmediata de las baterías de litio como el potencial a largo plazo del hidrógeno para el almacenamiento a gran escala y el acoplamiento sectorial.

El rápido aumento en la investigación sobre hidrógeno es particularmente notable y sugiere un reconocimiento creciente de su potencial para abordar los desafíos de almacenamiento a largo plazo y estacional. Sin embargo, es importante señalar que la investigación por sí sola no garantiza la viabilidad comercial. Se necesitan esfuerzos concertados para traducir estos avances de investigación en soluciones prácticas y económicamente viables.

Las cinco áreas principales de aplicación identificadas (integración de energía solar y eólica, estabilización de la red, servicios auxiliares, gestión de la demanda, y microrredes/sistemas aislados) demuestran la versatilidad y el papel determinante del almacenamiento de energía en la transición hacia un sistema energético más sostenible.

La capacidad de las tecnologías de almacenamiento para mitigar la intermitencia de las fuentes renovables es particularmente significativa. Esto no solo mejora la confiabilidad del suministro, sino que también aumenta el valor económico de las energías renovables al permitir una mejor correspondencia con la demanda. Sin embargo, para maximizar estos beneficios, es necesario un

marco regulatorio y de mercado que reconozca y recompense adecuadamente los servicios proporcionados por los sistemas de almacenamiento.

La identificación de cuatro enfoques principales de optimización (algoritmos de control predictivo, técnicas de IA y aprendizaje automático, métodos de optimización estocástica, y programación lineal/no lineal) subraya la complejidad de gestionar eficientemente los sistemas de almacenamiento de energía. La adopción de estas estrategias avanzadas de optimización es importante para maximizar el valor de las inversiones en almacenamiento de energía. Sin embargo, su implementación efectiva requiere no solo avances tecnológicos, sino también el desarrollo de habilidades y capacidades en la fuerza laboral del sector energético.

## **Conclusiones**

El panorama de las tecnologías de almacenamiento de energía es diverso y en constante evolución. Cada tecnología, desde las baterías de iones de litio hasta los sistemas de aire comprimido, ofrece características únicas que las hacen adecuadas para diferentes aplicaciones. Esta diversidad es fundamental para abordar los múltiples desafíos asociados con la integración de energías renovables en la red eléctrica.

Se observa un crecimiento significativo en la investigación de todas las tecnologías de almacenamiento, con un énfasis particular en las baterías de iones de litio y el almacenamiento de hidrógeno. Esto refleja tanto la madurez de algunas tecnologías como el potencial futuro de otras, subrayando la importancia de mantener un enfoque de investigación amplio y diversificado.

El almacenamiento de energía demuestra su versatilidad a través de múltiples aplicaciones en la gestión de energías renovables, desde la mitigación de la intermitencia hasta la provisión de servicios auxiliares y la gestión de la demanda. Esta multiplicidad de funciones refuerza su papel como componente clave en la transición hacia un sistema energético más sostenible.

La implementación efectiva de sistemas de almacenamiento de energía requiere estrategias de optimización. Los enfoques basados en inteligencia artificial, aprendizaje automático y métodos estocásticos ofrecen un potencial significativo para mejorar la eficiencia operativa y maximizar los beneficios económicos de estos sistemas.

## Referencias

1. International Energy Agency, "Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector," IEA, Paris, 2021.
2. R. Amirante, E. Cassone, E. Distaso, and P. Tamburrano, "Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies," *Energy Conversion and Management*, vol. 132, pp. 372-387, 2017.
3. H. Blanco and A. Faaij, "A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1049-1086, 2018.
4. X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511-536, 2015.
5. M. Aneke and M. Wang, "Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review," *Applied Energy*, vol. 179, pp. 350-377, 2016.
6. A. Castillo and D. F. Gayme, "Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey," *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 885-894, 2014.
7. International Renewable Energy Agency, "Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables," IRENA, Abu Dhabi, 2019.
8. M. Guney and Y. Tepe, "Classification and assessment of energy storage systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 1187-1197, 2017.
9. H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291-312, 2009.
10. BloombergNEF, "Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh," BloombergNEF, Dec. 16, 2020.
11. International Energy Agency, "Energy Storage," IEA, Paris, 2020.
12. G. Crabtree, "The coming electric vehicle transformation," *Science*, vol. 366, no. 6464, pp. 422-424, 2019.
13. B. Zakeri and S. Syri, "Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 569-596, 2015.

14. X. Wu, X. Hu, S. Moura, X. Yin, and V. Pickert, "Stochastic control of smart home energy management with plug-in electric vehicle battery energy storage and photovoltaic array," *Journal of Power Sources*, vol. 333, pp. 203-212, 2016.
15. Y. Wang, K. T. Tan, X. Y. Peng, and P. L. So, "Coordinated Control of Distributed Energy-Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 1132-1141, 2016.
16. T. Kerdphol, K. Fuji, Y. Mitani, M. Watanabe, and Y. Qudaih, "Optimization of a battery energy storage system using particle swarm optimization for stand-alone microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 81, pp. 32-39, 2016.
17. D. Parra, S. A. Norman, G. S. Walker, and M. Gillott, "Optimum community energy storage system for demand load shifting," *Applied Energy*, vol. 174, pp. 130-143, 2016.
18. P. D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, and J. Salpakari, "Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 785-807, 2015.
19. E. Barbour, I. A. Grant Wilson, J. Radcliffe, Y. Ding, and Y. Li, "A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 421-432, 2016.
20. Y. Ding, C. Shao, J. Yan, Y. Song, C. Zhang, and C. Guo, "Envisioning the role of automated energy management systems in the smart grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1510-1517, 2018.
21. R. Sioshansi, P. Denholm, and T. Jenkin, "Market and Policy Barriers to Deployment of Energy Storage," *Economics of Energy & Environmental Policy*, vol. 1, no. 2, pp. 47-64, 2012.
22. A. Malhotra, B. Battke, M. Beuse, A. Stephan, and T. Schmidt, "Use cases for stationary battery technologies: A review of the literature and existing projects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 705-721, 2016.
23. G. Castagneto Gissey, P. E. Dodds, and J. Radcliffe, "Market and regulatory barriers to electrical energy storage innovation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 781-790, 2018.
24. European Commission, "Energy storage – the role of electricity," Commission Staff Working Document, Brussels, 2017.

25. U.S. Department of Energy, "Energy Storage Grand Challenge: Roadmap," December 2020.
26. J. Figgenger et al., "The development of stationary battery storage systems in Germany – A market review," *Journal of Energy Storage*, vol. 29, 101153, 2020.
27. A. Kwade et al., "Current status and challenges for automotive battery production technologies," *Nature Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 290-300, 2018.
28. M. A. Pellow, C. J. M. Emmott, C. J. Barnhart, and S. M. Benson, "Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis," *Energy & Environmental Science*, vol. 8, no. 7, pp. 1938-1952, 2015.
29. L. Gaines, "The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course," *Sustainable Materials and Technologies*, vols. 1-2, pp. 2-7, 2014.
30. E. Hittinger and R. Lueken, "Is inexpensive natural gas hindering the grid energy storage industry?," *Energy Policy*, vol. 87, pp. 140-152, 2015.
31. J. F. Peters et al., "The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 491-506, 2017.
32. P. Denholm et al., "The potential for battery energy storage to provide peaking capacity in the United States," *Renewable Energy*, vol. 151, pp. 1269-1277, 2020.
33. [33] T. M. Gür, "Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage," *Energy & Environmental Science*, vol. 11, no. 10, pp. 2696-2767, 2018.