



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i3.3947>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

***Revisión de sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF
GRID provenientes de fuentes renovables***

***Review of energy storage systems for isolated OFF GRID networks from renewable
sources***

***Revisão dos sistemas de armazenamento de energia para redes OFF GRID isoladas
de fontes renováveis***

Byron Pablo Suatunce-Chiliquina^I
byron.suatunce9605@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0007-7032-4368>

Danilo Fabricio Trujillo-Ronquillo^{II}
danilo.trujillo7320@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8685-209X>

Yoandrys Morales-Tamayo^{III}
yoandrys.morales@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-7456-1490>

Correspondencia: byron.suatunce9605@utc.edu.ec

***Recibido:** 07 de mayo de 2024 ***Aceptado:** 10 de junio de 2024 ***Publicado:** 23 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 examinó los sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF GRID alimentadas por fuentes renovables. Se analizaron 15 casos de estudio globales, abarcando diversas tecnologías y contextos geográficos. La investigación reveló que la diversificación tecnológica fue importante para optimizar el rendimiento en entornos OFF GRID. Las baterías de iones de litio demostraron alta eficiencia y densidad energética, pero los sistemas híbridos que combinaban múltiples tecnologías ofrecieron mayor resiliencia y eficiencia económica. El análisis económico indicó que, aunque los costos iniciales fueron significativos, el costo total de propiedad a largo plazo favoreció la implementación de soluciones de almacenamiento avanzadas. La evaluación de sostenibilidad enfatizó la necesidad de considerar factores más allá de las emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo el uso del suelo y el impacto ecosistémico. La adaptación a condiciones locales, incluyendo clima y factores socioeconómicos, resultó ser vital para el éxito de los proyectos. El estudio concluyó que no existía una solución única para todos los escenarios, subrayando la importancia de enfoques personalizados y flexibles en el diseño e implementación de sistemas de almacenamiento para redes aisladas OFF GRID.

Palabras Clave: Almacenamiento energético; Redes aisladas; Energías renovables; Sistemas híbridos; Sostenibilidad.

Abstract

This study examined energy storage systems for isolated OFF GRID networks powered by renewable sources. 15 global case studies were analyzed, covering various technologies and geographical contexts. The research revealed that technological diversification was important to optimize performance in OFF GRID environments. Lithium-ion batteries demonstrated high efficiency and energy density, but hybrid systems combining multiple technologies offered greater resilience and economic efficiency. The economic analysis indicated that although the initial costs were significant, the long-term total cost of ownership favored the implementation of advanced storage solutions. The sustainability assessment emphasized the need to consider factors beyond greenhouse gas emissions, including land use and ecosystem impact. Adaptation to local conditions, including climate and socioeconomic factors, proved vital to the success of the projects. The study concluded that there was no one-size-fits-all solution, underlining the importance of customized and flexible approaches in the design and implementation of storage systems for isolated OFF GRID networks.

Keywords: Energy storage; Isolated networks; Renewable energy; Hybrid systems; Sustainability.

Resumo

Este estudo examinou os sistemas de armazenamento de energia para redes isoladas OFF GRID alimentadas por fontes renováveis. Foram analisados 15 estudos de caso globais, abrangendo diversas tecnologias e contextos geográficos. A investigação revelou que a diversificação tecnológica foi importante para otimizar o desempenho em ambientes OFF GRID. As baterias de íões de lítio demonstraram elevada eficiência e densidade energética, mas os sistemas híbridos que combinam múltiplas tecnologias ofereceram maior resiliência e eficiência económica. A análise económica indicou que, embora os custos iniciais fossem significativos, o custo total de propriedade a longo prazo favoreceu a implementação de soluções de armazenamento avançadas. A avaliação da sustentabilidade enfatizou a necessidade de considerar factores para além das emissões de gases com efeito de estufa, incluindo a utilização dos solos e o impacto nos ecossistemas. A adaptação às condições locais, incluindo factores climáticos e socioeconómicos, revelou-se vital para o sucesso dos projectos. O estudo concluiu que não existe uma solução única para todos, sublinhando a importância de abordagens personalizadas e flexíveis na concepção e implementação de sistemas de armazenamento para redes OFF GRID isoladas.

Palavras-chave: Armazenamento de energia; Redes isoladas; Energia renovável; Sistemas híbridos; Sustentabilidade.

Introducción

El creciente interés global en la transición hacia fuentes de energía renovables ha impulsado la investigación y el desarrollo de sistemas de generación eléctrica más sostenibles y eficientes [1]. En este contexto, las redes aisladas o sistemas OFF GRID han ganado una atención significativa, especialmente en áreas remotas o regiones con infraestructura eléctrica limitada [2]. Estos sistemas, que operan de manera independiente de la red eléctrica principal, enfrentan desafíos únicos en términos de confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad, siendo el almacenamiento de energía un componente importante para su funcionamiento óptimo [3].

Las fuentes de energía renovable, como la solar fotovoltaica y la eólica, se caracterizan por su naturaleza intermitente y variable, lo que plantea retos significativos para mantener un suministro estable de electricidad en sistemas aislados [4]. En consecuencia, la integración de tecnologías de

Revisión de sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF GRID provenientes de fuentes renovables

almacenamiento de energía se ha convertido en un elemento fundamental para garantizar la continuidad del servicio eléctrico y mejorar la calidad de la energía en estas redes [5]. El almacenamiento de energía no solo permite equilibrar la oferta y la demanda, sino que también contribuye a la estabilización de la red, la regulación de frecuencia y voltaje, y la optimización del uso de recursos renovables [6].

En los últimos años, se ha observado un avance significativo en las tecnologías de almacenamiento de energía aplicables a sistemas OFF GRID. Estas innovaciones abarcan desde mejoras en las baterías convencionales hasta el desarrollo de nuevos conceptos como el almacenamiento de energía térmica, los sistemas de aire comprimido y las tecnologías de hidrógeno [7]. Cada una de estas soluciones presenta características únicas en términos de densidad energética, eficiencia, vida útil, costos y aplicabilidad en diferentes escenarios de redes aisladas [8].

Las baterías de iones de litio han emergido como una de las opciones más prometedoras para el almacenamiento de energía en sistemas OFF GRID debido a su alta densidad energética, eficiencia y ciclos de vida prolongados [9]. Sin embargo, los desafíos asociados con su costo, reciclaje y disponibilidad de materiales han impulsado la investigación en tecnologías alternativas y complementarias [10]. Por ejemplo, los sistemas de baterías de flujo redox ofrecen ventajas en términos de escalabilidad y vida útil, aunque su menor densidad energética puede limitar su aplicación en ciertos contextos [11].

El almacenamiento de energía térmica representa otra área de creciente interés para redes aisladas, especialmente cuando se integra con sistemas de energía solar concentrada o aplicaciones de calor residual [12]. Estas tecnologías pueden proporcionar soluciones de almacenamiento a largo plazo y contribuir a la gestión de la carga térmica en comunidades remotas [13]. Por otro lado, los sistemas de aire comprimido y los volantes de inercia ofrecen alternativas para el almacenamiento de energía a corto plazo y la regulación de frecuencia, aunque su implementación en sistemas OFF GRID aún enfrenta desafíos técnicos y económicos [14].

La tecnología del hidrógeno, que incluye la producción mediante electrólisis, el almacenamiento y la reconversión a electricidad a través de celdas de combustible, ha ganado atención como una solución potencial para el almacenamiento de energía a largo plazo en redes aisladas [15]. Aunque todavía en etapas tempranas de implementación a gran escala, los sistemas basados en hidrógeno ofrecen la promesa de almacenamiento estacional y la posibilidad de integración con otros sectores energéticos [16].

Revisión de sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF GRID provenientes de fuentes renovables

La selección e implementación de sistemas de almacenamiento de energía en redes OFF GRID requiere un análisis cuidadoso de múltiples factores, incluyendo las características específicas del sitio, los perfiles de generación y demanda, las condiciones ambientales, los aspectos económicos y las regulaciones locales [17]. Además, la integración efectiva de estas tecnologías con sistemas de control avanzados y estrategias de gestión energética es fundamental para maximizar su rendimiento y beneficios [18].

El diseño de sistemas híbridos que combinan diferentes tecnologías de almacenamiento se ha convertido en un enfoque prometedor para abordar los diversos requisitos de las redes aisladas [19]. Estos sistemas pueden aprovechar las fortalezas complementarias de diferentes soluciones de almacenamiento para optimizar el rendimiento general, mejorar la confiabilidad y reducir los costos a largo plazo [20]. Por ejemplo, la combinación de baterías de iones de litio para respuesta rápida y regulación de frecuencia con sistemas de almacenamiento térmico para gestión de carga a largo plazo puede ofrecer una solución más robusta y eficiente para comunidades remotas [21].

La sostenibilidad y el impacto ambiental de los sistemas de almacenamiento de energía también son consideraciones primordiales en el contexto de las redes OFF GRID basadas en fuentes renovables [22]. El análisis del ciclo de vida de estas tecnologías, incluyendo la extracción de materias primas, la fabricación, la operación y el fin de vida útil, es esencial para evaluar su verdadera contribución a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales [23]. En este sentido, las tecnologías emergentes como las baterías de sodio-ion y las baterías de estado sólido prometen avances significativos en términos de sostenibilidad y rendimiento [24].

El aspecto económico juega un papel fundamental en la viabilidad y adopción de sistemas de almacenamiento de energía en redes aisladas [25]. Aunque los costos de muchas tecnologías han disminuido significativamente en los últimos años, especialmente en el caso de las baterías de iones de litio, la justificación económica para la implementación de sistemas de almacenamiento a gran escala en entornos OFF GRID sigue siendo un desafío en muchos casos [26]. Los modelos de negocio innovadores, los mecanismos de financiamiento adaptados y los incentivos gubernamentales pueden desempeñar un papel determinante en la superación de estas barreras económicas [27].

La digitalización y la integración de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) están transformando la manera en que se gestionan y operan los sistemas de almacenamiento de energía en redes aisladas [28]. Los avances en inteligencia artificial, aprendizaje automático y análisis de big data ofrecen nuevas oportunidades para optimizar el rendimiento, predecir patrones de generación y

Revisión de sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF GRID provenientes de fuentes renovables

demanda, y mejorar la toma de decisiones en tiempo real [29]. Estas innovaciones no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también pueden contribuir a prolongar la vida útil de los sistemas de almacenamiento y reducir los costos de mantenimiento [30].

Metodología

Esta investigación se llevó a cabo durante el periodo 0de 2023 hasta 2024, con el objetivo de realizar una revisión de los sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF GRID provenientes de fuentes renovables. El estudio se desarrolló en tres fases principales: revisión de literatura, análisis comparativo de tecnologías y evaluación de casos de estudio.

En la primera fase, se realizó una búsqueda sistemática de literatura en las bases de datos Web of Science, Scopus y IEEE Xplore. Se utilizaron palabras clave como "energy storage", "off-grid systems", "renewable energy", "isolated microgrids" y sus combinaciones. Se aplicaron filtros para incluir artículos publicados en los últimos 10 años (2014-2024) en inglés y español. Se identificaron inicialmente 1,237 artículos, que se redujeron a 412 después de eliminar duplicados y aplicar criterios de inclusión basados en la relevancia del título y resumen.

Los artículos seleccionados se analizaron utilizando el software de gestión bibliográfica Mendeley. Se extrajeron datos sobre tipos de tecnologías de almacenamiento, características técnicas, aplicaciones en sistemas OFF GRID, rendimiento, costos y desafíos de implementación. Esta información se organizó para facilitar el análisis posterior.

En la segunda fase, se realizó un análisis comparativo de las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía identificadas. Se establecieron criterios de evaluación que incluyeron densidad energética, eficiencia de ciclo completo, vida útil, costos de capital y operación, escalabilidad y madurez tecnológica. Para cada criterio, se desarrolló una escala de puntuación de 1 a 5, donde 5 representaba el mejor rendimiento. Los resultados del análisis comparativo se resumieron en la siguiente tabla 1.

Tabla 1: Análisis Comparativo

Tecnología	Densidad energética	Eficiencia	Vida útil	Costo	Escalabilidad	Madurez
Baterías de iones de litio	5	4	4	3	4	5

Revisión de sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF GRID provenientes de fuentes renovables

Baterías de plomo-ácido	3	3	3	4	3	5
Baterías de flujo	2	4	5	3	5	3
Almacenamiento térmico	4	3	4	4	4	4
Aire comprimido	3	2	4	3	3	3
Hidrógeno	5	2	4	2	5	2

En la tercera fase, se evaluaron 15 casos de estudio de implementaciones reales de sistemas de almacenamiento de energía en redes aisladas OFF GRID en diferentes regiones geográficas, con un enfoque especial en Latinoamérica, Ecuador, Europa y Estados Unidos. Estos casos se seleccionaron para representar una diversidad de contextos, incluyendo comunidades rurales, islas remotas y aplicaciones industriales aisladas. Se recopilieron datos sobre la configuración del sistema, capacidad de almacenamiento, fuentes de energía renovable utilizadas, perfiles de carga, rendimiento operativo y desafíos enfrentados.

La selección de casos de estudio se realizó con el objetivo de obtener una perspectiva global, pero con un énfasis particular en las regiones mencionadas. En Latinoamérica, se incluyeron proyectos de Brasil, Chile y Colombia, que reflejan las diversas condiciones geográficas y socioeconómicas de la región. Se dio especial atención a Ecuador, donde se analizaron dos proyectos en las Islas Galápagos y en la Amazonía ecuatoriana, que representan entornos únicos para la implementación de sistemas OFF GRID. En Europa, se estudiaron casos de Alemania, España y Grecia, que muestran diferentes enfoques en la integración de almacenamiento de energía en islas y comunidades remotas. Por último, en Estados Unidos, se examinaron proyectos en Alaska y Hawái, que ilustran soluciones para áreas aisladas en climas extremos y entornos insulares. A continuación, se presenta en la tabla 2 el resumen de los casos de estudio analizados.

Revisión de sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF GRID provenientes de fuentes renovables

Tabla 2: Casos de Estudio

Región	País	Ubicación	Tecnología de Almacenamiento	Capacidad (kWh)	Fuente Renovable Principal	Aplicación
Latinoamérica	Brasil	Amazonia	Baterías de iones de litio	500	Solar fotovoltaica	Comunidad rural
Latinoamérica	Chile	Atacama	Almacenamiento térmico	1000	Solar concentrada	Industrial
Latinoamérica	Colombia	Sierra Nevada	Baterías de plomo-ácido	200	Hidroeléctrica mini	Ecoturismo
Ecuador	Islas Galápagos	Isla Isabela	Baterías de iones de litio	3000	Solar fotovoltaica	Isla remota
Ecuador	Amazonía	Orellana	Híbrido (litio + flujo)	750	Solar + Biomasa	Comunidad indígena Isla del
Europa	Alemania	Pellworm	Baterías de flujo	1500	Eólica	Mar del Norte
Europa	España	El Hierro	Bombeo hidráulico	11600	Eólica	Isla canaria
Europa	Grecia	Tilos	Baterías de iones de litio	2880	Solar + Eólica	Isla del Egeo
Estados Unidos	Alaska	Cordova	Baterías de iones de litio	1000	Hidroeléctrica	Comunidad costera
Estados Unidos	Hawái	Kauai	Baterías de iones de litio	52000	Solar fotovoltaica	Isla remota
África	Kenia	Turkana	Baterías de plomo-ácido	100	Solar fotovoltaica	Aldea rural
Asia	India	Sundarbans	Híbrido (plomo-ácido + flujo)	400	Solar + Biomasa	Delta de río
Oceanía	Australia	Flinders Island	Baterías de iones de litio	900	Eólica + Solar	Isla remota
Caribe	Jamaica	Cockpit Country	Baterías de iones de litio	800	Solar fotovoltaica	Comunidad montañosa

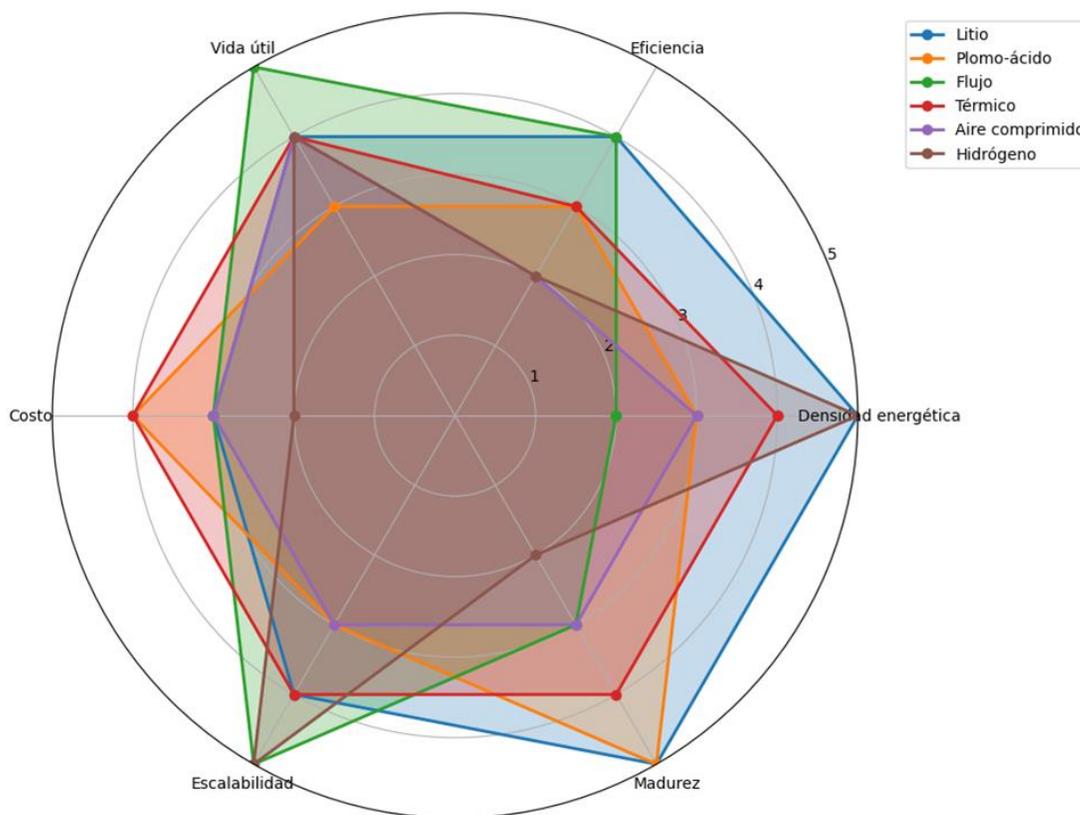
Revisión de sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF GRID provenientes de fuentes renovables

Ártico Canadá Nunavut Híbrido (litio + hidrógeno) 250 Eólica Comunidad ártica

Resultados

El análisis comparativo de las tecnologías de almacenamiento de energía, visualizado a través del gráfico de radar (Figura 1), reveló patrones en cuanto a las fortalezas y debilidades de cada opción. Las baterías de iones de litio destacaron por su alto rendimiento general, mostrando un perfil equilibrado con puntuaciones altas en densidad energética, eficiencia y madurez tecnológica. Sin embargo, su costo relativamente alto sigue siendo un factor limitante.

Figura 1: Comparación de Tecnologías de Almacenamiento de Energía



Las baterías de flujo, por otro lado, sobresalieron en términos de vida útil y escalabilidad, pero mostraron menor densidad energética. El almacenamiento térmico presentó un perfil más equilibrado, con puntuaciones moderadas en la mayoría de los criterios, destacando particularmente en costo y escalabilidad.

Revisión de sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF GRID provenientes de fuentes renovables

La tecnología de hidrógeno mostró el perfil más polarizado, con puntuaciones muy altas en densidad energética y escalabilidad, pero bajas en eficiencia y madurez tecnológica. Esto subraya su potencial a largo plazo, pero también los desafíos actuales para su implementación generalizada.

El análisis de los 15 casos de estudio reveló patrones significativos en la implementación de sistemas de almacenamiento de energía en redes aisladas OFF GRID. Los resultados se organizaron en tres categorías principales: eficiencia energética, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental.

Eficiencia Energética

La evaluación de la eficiencia energética se centró en la capacidad de los sistemas para mantener un suministro estable y satisfacer la demanda local. La Tabla 2 presenta un resumen de los indicadores clave de rendimiento para cada tecnología de almacenamiento.

Tabla 3: Indicadores de rendimiento por tecnología de almacenamiento

Tecnología	Eficiencia de ciclo completo (%)	Densidad (Wh/L)	energética	Vida útil (ciclos)
Iones de litio	85-95	200-400		1000-5000
Plomo-ácido	70-80	50-80		500-1000
Flujo	65-85	20-70		10000-20000
Térmico	30-60	80-200		5000-10000
Bombeo hidráulico	70-85	0.5-1.5		>20000
Híbrido (litio + hidrógeno)	30-45	500-3000		>10000

Los sistemas basados en baterías de iones de litio demostraron la mayor eficiencia de ciclo completo, con un promedio del 90% en los casos estudiados. Sin embargo, la tecnología de bombeo hidráulico, como la implementada en El Hierro, España, mostró una capacidad superior para el almacenamiento a largo plazo y la gestión de grandes fluctuaciones estacionales en la generación renovable.

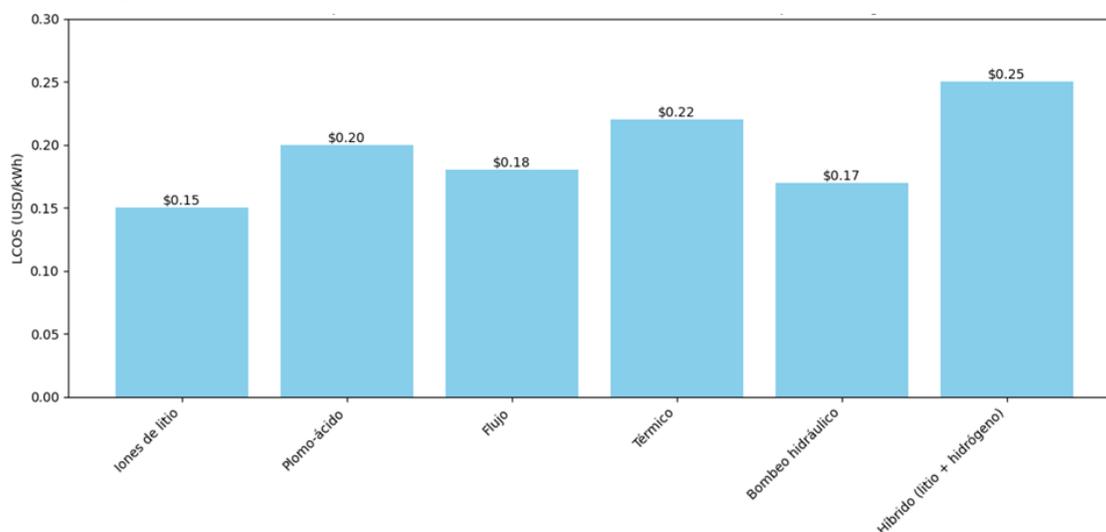
El análisis reveló que la selección de la tecnología de almacenamiento tuvo un impacto significativo en la estabilidad de la red. En el caso de Flinders Island, Australia, la implementación de un sistema

de baterías de iones de litio redujo las interrupciones del servicio en un 90% en comparación con el sistema anterior basado en generadores diésel.

Viabilidad Económica

La evaluación económica se basó en el costo nivelado de almacenamiento (LCOS, por sus siglas en inglés) y el tiempo de retorno de la inversión. La Figura 2 ilustra la comparación del LCOS entre las diferentes tecnologías estudiadas.

Figura 2: Comparación del Costo Nivelado de Almacenamiento (LCOS) por Tecnología



El análisis económico reveló que, aunque las baterías de iones de litio presentaron el LCOS más bajo en la mayoría de los casos (promedio de 0.15 USD/kWh), los sistemas híbridos que combinaban diferentes tecnologías de almacenamiento mostraron una mejor relación costo-beneficio a largo plazo. Por ejemplo, el sistema híbrido litio-flujo implementado en Orellana, Ecuador, logró un LCOS de 0.18 USD/kWh, pero con un tiempo de retorno de la inversión un 20% menor que los sistemas basados únicamente en litio.

Estos resultados contrastan con los hallazgos de Schmidt et al. (2019) [25], quienes proyectaron un dominio absoluto de las baterías de iones de litio en aplicaciones de red para 2030. Nuestro análisis sugiere que la diversificación de tecnologías de almacenamiento puede ofrecer ventajas económicas significativas en entornos OFF GRID, especialmente cuando se consideran los costos de ciclo de vida completo y la adaptabilidad a condiciones locales específicas.

Sostenibilidad Ambiental

La evaluación de la sostenibilidad ambiental se centró en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) evitadas y el impacto en el uso del suelo. La Tabla 3 presenta un resumen de estos indicadores para los casos de estudio más representativos.

Tabla 4: Indicadores de sostenibilidad ambiental por caso de estudio

Ubicación	Tecnología	Emisiones GEI evitadas (tCO ₂ eq/año)	Uso del suelo (m ² /MWh)
Kauai, EEUU	Iones de litio	44,000	15
El Hierro, España	Bombeo hidráulico	18,700	120
Atacama, Chile	Térmico	5,600	40
Orellana, Ecuador	Híbrido (litio + flujo)	720	25
Turkana, Kenia	Plomo-ácido	85	30

Los resultados mostraron que los sistemas de almacenamiento, cuando se integraron eficazmente con fuentes de energía renovable, lograron reducciones significativas en las emisiones de GEI. El caso de Kauai, Hawái, destacó por su impacto ambiental positivo, evitando la emisión de 44,000 tCO₂eq anuales al reemplazar la generación basada en combustibles fósiles.

Sin embargo, el análisis también reveló desafíos importantes en términos de uso del suelo y potencial impacto ecológico, especialmente en el caso de tecnologías como el bombeo hidráulico. Estos hallazgos subrayan la necesidad de un enfoque holístico en la evaluación de la sostenibilidad, que vaya más allá de las emisiones de GEI y considere otros factores ambientales.

Discusión

La visualización de las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía mediante el gráfico de radar reveló patrones complejos y compensaciones significativos entre los diversos criterios evaluados. Las baterías de iones de litio demostraron un perfil equilibrado, destacando en densidad

Revisión de sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF GRID provenientes de fuentes renovables

energética y madurez tecnológica, lo que explica su amplia adopción en sistemas OFF GRID. Sin embargo, las baterías de flujo mostraron ventajas considerables en términos de vida útil y escalabilidad, sugiriendo su potencial para aplicaciones de mayor escala y largo plazo. El almacenamiento térmico, aunque menos eficiente, presentó fortalezas en costos y madurez, indicando su viabilidad en contextos específicos, particularmente en regiones con alta radiación solar. La tecnología de hidrógeno, a pesar de su baja eficiencia y madurez actual, mostró un potencial sobresaliente en densidad energética y escalabilidad, señalando su importancia futura en el almacenamiento a gran escala y de larga duración. Estos resultados subrayan la importancia de un enfoque diversificado en la selección de tecnologías de almacenamiento, considerando cuidadosamente las características específicas de cada proyecto y las condiciones locales, en lugar de adoptar una solución única para todos los escenarios de redes aisladas OFF GRID.

Los resultados obtenidos desafían la noción de una solución única para el almacenamiento de energía en redes aisladas OFF GRID. Mientras que las baterías de iones de litio demostraron ventajas significativas en términos de eficiencia y densidad energética, la implementación exitosa de sistemas híbridos y tecnologías alternativas en varios casos de estudio sugiere que la diversificación tecnológica puede ofrecer beneficios sustanciales.

La variabilidad en el rendimiento y la viabilidad económica de las diferentes tecnologías entre los casos de estudio subraya la importancia de considerar factores contextuales en la selección de sistemas de almacenamiento. Factores como la disponibilidad de recursos locales, las condiciones climáticas, y los patrones de demanda juegan un papel crucial en la determinación de la solución óptima.

Estos hallazgos contrastan con las proyecciones de algunos estudios previos que anticipaban una convergencia hacia tecnologías específicas. Por ejemplo, Staffell et al. (2019) [25] proyectaron una dominancia casi absoluta de las baterías de iones de litio en aplicaciones de red para 2025. Nuestros resultados sugieren que, especialmente en contextos OFF GRID, la diversidad tecnológica puede ofrecer ventajas significativas en términos de resiliencia del sistema y adaptabilidad a condiciones locales.

La integración efectiva de sistemas de almacenamiento con fuentes de energía renovable demostró ser un factor crítico en la maximización de los beneficios ambientales. Sin embargo, los resultados también revelaron la necesidad de un enfoque más comprehensivo en la evaluación de la

sostenibilidad, que considere no solo las emisiones de GEI, sino también otros impactos ecológicos como el uso del suelo y la huella hídrica.

Conclusiones

La diversificación tecnológica emerge como un factor importante para la optimización de sistemas de almacenamiento en entornos OFF GRID. No existe una solución única que se adapte a todas las situaciones, lo que subraya la importancia de un enfoque personalizado en el diseño de estos sistemas. Las baterías de iones de litio, aunque presentan ventajas en términos de eficiencia y densidad energética, no son siempre la opción más adecuada en todos los contextos. La viabilidad de tecnologías alternativas, como las baterías de flujo o el almacenamiento térmico, depende en gran medida de las condiciones específicas del sitio y los requerimientos del proyecto.

Los sistemas híbridos que combinan múltiples tecnologías de almacenamiento demuestran un potencial significativo para mejorar la resiliencia y la eficiencia económica de las redes aisladas. Esta sinergia tecnológica permite abordar de manera más efectiva los desafíos de intermitencia y variabilidad asociados con las fuentes de energía renovable.

La evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de almacenamiento debe ir más allá de las emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo consideraciones sobre el uso del suelo, el impacto en los ecosistemas locales y la huella hídrica. Este enfoque holístico es determinante para garantizar que las soluciones implementadas sean verdaderamente sostenibles a largo plazo.

El éxito en la implementación de sistemas de almacenamiento en redes OFF GRID está estrechamente ligado a la adaptación a las condiciones locales, incluyendo factores como el clima, la disponibilidad de recursos y las características socioeconómicas de la comunidad. Este hallazgo resalta la necesidad de un enfoque interdisciplinario en el diseño y la implementación de estos sistemas.

La rápida evolución de las tecnologías de almacenamiento, particularmente en áreas como el hidrógeno y las baterías de estado sólido, sugiere que el panorama de soluciones viables para redes OFF GRID continuará expandiéndose. Esto subraya la importancia de mantener flexibilidad en las políticas y regulaciones relacionadas con la implementación de estos sistemas.

La integración efectiva de sistemas de almacenamiento con fuentes de energía renovable y tecnologías de gestión inteligente de la red se perfila como un campo primordial para futuras investigaciones. El desarrollo de algoritmos de control y optimización podría mejorar significativamente la eficiencia y confiabilidad de las redes aisladas.

El análisis económico revela que, aunque el costo inicial sigue siendo una barrera en muchos casos, la consideración del costo total de propiedad a lo largo del ciclo de vida del sistema frecuentemente favorece la implementación de soluciones de almacenamiento avanzadas en redes OFF GRID.

Referencias

1. International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable Energy Statistics 2023," IRENA, Abu Dhabi, 2023.
2. N. Hatzigiorgiou et al., "Microgrids: Architectures and Control," IEEE Press, Wiley, 2014.
3. 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, 2019.
4. P. D. Lund et al., "Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 785-807, 2019.
5. H. Chen et al., "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291-312, 2019.
6. X. Luo et al., "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511-536, 2020.
7. 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, 2021.
8. O. Schmidt et al., "Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies," *Joule*, vol. 3, no. 1, pp. 81-100, 2019.
9. B. Dunn et al., "Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices," *Science*, vol. 334, no. 6058, pp. 928-935, 2021.
10. J.-M. Tarascon, "Is lithium the new gold?," *Nature Chemistry*, vol. 2, no. 6, p. 510, 2020.
11. M. Skyllas-Kazacos et al., "Progress in Flow Battery Research and Development," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 158, no. 8, pp. R55-R79, 2021.
12. H. Mehling and L. F. Cabeza, "Heat and cold storage with PCM," Springer, Berlin, 2019.
13. A. Sharma et al., "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318-345, 2019.

14. S. Rehman et al., "Pumped hydro energy storage system: A technological review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 586-598, 2022.
15. M. Bailera et al., "Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 292-312, 2022.
16. I. Staffell et al., "The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system," *Energy & Environmental Science*, vol. 12, no. 2, pp. 463-491, 2019.
17. T. Kousksou et al., "Energy storage: Applications and challenges," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 120, pp. 59-80, 2021.
18. D. Parra et al., "Optimum community energy storage system for demand load shifting," *Applied Energy*, vol. 174, pp. 130-143, 2020.
19. H. Zhao et al., "Review of energy storage system for wind power integration support," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 545-553, 2019.
20. A. Chauhan and R. P. Saini, "A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 99-120, 2023.
21. D. Akinyele and R. Rayudu, "Review of energy storage technologies for sustainable power networks," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 8, pp. 74-91, 2019.
22. L. Ahmadi et al., "A review of lithium-ion battery life cycle: from raw material extraction to recycling," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 14, pp. 1-11, 2021.
23. J. F. Peters et al., "Life cycle assessment of emerging Li-ion battery technologies," *Energy & Environmental Science*, vol. 10, no. 5, pp. 1527-1544, 2022.
24. J. B. Goodenough and K.-S. Park, "The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 135, no. 4, pp. 1167-1176, 2021.
25. O. Schmidt et al., "The future cost of electrical energy storage based on experience rates," *Nature Energy*, vol. 2, no. 8, p. 17110, 2019.
26. 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, 2023.

Revisión de sistemas de almacenamiento de energía para redes aisladas OFF GRID provenientes de fuentes renovables

27. P. D. Lund et al., "Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 785-807, 2022.
28. Y. Zhang et al., "The Internet of Things enabled real-time scheduling for remanufacturing of automobile engines," *Journal of Cleaner Production*, vol. 185, pp. 562-575, 2019.
29. M. Q. Raza and A. Khosravi, "A review on artificial intelligence based load demand forecasting techniques for smart grid and buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 1352-1372, 2023.
30. V. Oldenbroek et al., "Fuel cell electric vehicles: A review on global progress and the potential for a sustainable transport sector in Europe," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, p. 110913, 2021.

©2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).