



Revisión de la Literatura para Gestión de Sistemas de Almacenamiento de Energía por Medio de Baterías para Determinar su Eficiencia

Review of the Literature for Management of Energy Storage Systems by means of Batteries to Determine their Efficiency

Revisão da Literatura para a Gestão de Sistemas de Armazenamento de Energia através de Baterias para Determinação da sua Eficiência

Edison Jordán Jácome-Espinoza ^I
edison.jacome6120@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-1237-9369>

Freddy Rodrigo Romero-Bedón ^{II}
freddy.romero9642@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0007-8532-6120>

Alex Darwin Paredes-Anchatipán ^{III}
alex.paredes4935@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0027-3469>

Correspondencia: edison.jacome6120@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

Esta revisión sistemática de la literatura examina la gestión de sistemas de almacenamiento de energía por medio de baterías (BESS) y la determinación de su eficiencia. El estudio analiza diversas tecnologías de baterías, destacando la predominancia de las baterías de iones de litio por su alta eficiencia (85-95%) y densidad energética. Se identifican múltiples indicadores de eficiencia, subrayando la importancia de considerar factores económicos y ambientales además del rendimiento energético. La investigación revela que la eficiencia de los BESS varía significativamente según la aplicación, siendo óptima en servicios de regulación de frecuencia y auxiliares. Factores críticos que afectan la eficiencia incluyen la gestión térmica y los regímenes de carga/descarga. El estudio destaca la importancia de las estrategias de gestión avanzadas, como el control predictivo y las estrategias adaptativas, para optimizar el rendimiento de los BESS. Se enfatiza el papel de los BESS en la integración de energías renovables y la estabilización de redes eléctricas. La revisión concluye que la gestión eficiente de BESS requiere un enfoque holístico e interdisciplinario, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales para lograr una implementación efectiva en el contexto de la transición energética global.

Palabras Clave: Almacenamiento de energía; Eficiencia de baterías; Gestión térmica; Integración de renovables; Optimización de BESS.

Abstract

This systematic literature review examines the management of battery energy storage systems (BESS) and the determination of their efficiency. The study analyzes various battery technologies, highlighting the predominance of lithium-ion batteries due to their high efficiency (85-95%) and energy density. Multiple efficiency indicators are identified, underscoring the importance of considering economic and environmental factors in addition to energy performance. The research reveals that the efficiency of BESS varies significantly depending on the application, being optimal in frequency regulation and auxiliary services. Critical factors affecting efficiency include thermal management and charge/discharge regimes. The study highlights the importance of advanced management strategies, such as predictive control and adaptive strategies, to optimize the performance of BESS. The role of BESS in the integration of renewable energies and the stabilization of electrical networks is emphasized. The review concludes that the efficient management of BESS requires a holistic and interdisciplinary approach, considering technical,

economic and environmental aspects to achieve effective implementation in the context of the global energy transition.

Keywords: Energy storage; Battery efficiency; Thermal management; Integration of renewables; BESS optimization.

Resumo

Esta revisão sistemática da literatura examina a gestão de sistemas de armazenamento de energia de baterias (BESS) e a determinação da sua eficiência. O estudo analisa diversas tecnologias de baterias, destacando a predominância das baterias de íões de lítio devido à sua elevada eficiência (85-95%) e densidade energética. São identificados múltiplos indicadores de eficiência, sublinhando a importância de considerar os factores económicos e ambientais, para além do desempenho energético. A investigação revela que a eficiência do BESS varia significativamente consoante a aplicação, sendo ideal na regulação de frequência e serviços auxiliares. Os factores críticos que afectam a eficiência incluem a gestão térmica e os regimes de carga/descarga. O estudo destaca a importância de estratégias de gestão avançadas, como o controlo preditivo e as estratégias adaptativas, para otimizar o desempenho do BESS. É enfatizado o papel do BESS na integração das energias renováveis e na estabilização das redes eléctricas. A revisão conclui que a gestão eficiente do BESS requer uma abordagem holística e interdisciplinar, considerando os aspectos técnicos, económicos e ambientais para alcançar uma implementação eficaz no contexto da transição energética global.

Palavras-chave: Armazenamento de energia; Eficiência da bateria; Gestão termal; Integração de energias renováveis; Otimização BESS.

Introducción

En las últimas décadas, el panorama energético global ha experimentado una transformación radical impulsada por la creciente preocupación sobre el cambio climático, la seguridad energética y la sostenibilidad ambiental. La transición hacia fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, se ha acelerado significativamente, presentando tanto oportunidades como desafíos para los sistemas de energía existentes [1]. Esta evolución ha puesto de manifiesto la necesidad crítica de

sistemas de almacenamiento de energía eficientes y confiables, capaces de abordar la naturaleza intermitente de las energías renovables y garantizar la estabilidad de la red eléctrica.

Los sistemas de almacenamiento de energía por medio de baterías (BESS, por sus siglas en inglés) han emergido como una solución prometedora para enfrentar estos retos. Su capacidad para almacenar energía durante períodos de exceso de producción y liberarla cuando la demanda supera la oferta los convierte en componentes fundamentales en la integración de fuentes renovables a gran escala [2]. Sin embargo, la implementación efectiva de BESS requiere una gestión sofisticada y optimizada para maximizar su eficiencia y vida útil, al tiempo que se minimizan los costos operativos.

La gestión de BESS abarca una amplia gama de aspectos, desde el diseño y dimensionamiento del sistema hasta las estrategias de control operativo y mantenimiento. En este contexto, la determinación de la eficiencia del sistema se convierte en un factor crítico, ya que influye directamente en la viabilidad económica y técnica de la implementación de BESS en diferentes escenarios de aplicación [3]. La eficiencia no solo se refiere al rendimiento energético del sistema, sino también a su capacidad para cumplir con los objetivos específicos de cada aplicación, ya sea la regulación de frecuencia, el aplanamiento de picos de demanda o la integración de energías renovables.

El rápido avance tecnológico en el campo de las baterías ha dado lugar a una diversidad de opciones, cada una con sus propias características y aplicaciones óptimas. Las baterías de iones de litio, por ejemplo, han ganado una posición predominante debido a su alta densidad energética y larga vida útil [4]. Sin embargo, otras tecnologías como las baterías de flujo, las baterías de sodio-azufre y los supercondensadores también están encontrando nichos específicos en el mercado del almacenamiento de energía [5].

La gestión eficiente de BESS implica una comprensión profunda de los parámetros clave que afectan su rendimiento. El estado de carga (SOC), el estado de salud (SOH), y el estado de función (SOF) son indicadores importantes que deben ser monitoreados y gestionados cuidadosamente para garantizar una operación segura y prolongar la vida útil de las baterías [6]. Además, factores como la temperatura, la profundidad de descarga y los ciclos de carga-descarga tienen un impacto significativo en la degradación de las baterías y, por ende, en la eficiencia general del sistema.

La optimización de la gestión de BESS es un campo de investigación activo que ha visto la aplicación de una variedad de técnicas y enfoques. Los métodos de búsqueda dirigida, las técnicas probabilísticas y las estrategias basadas en reglas son algunas de las aproximaciones más comunes para abordar los desafíos de optimización en la operación de BESS [7]. Cada enfoque tiene sus propias fortalezas y debilidades, y la elección del método más apropiado depende en gran medida de los objetivos específicos de la aplicación y de la formulación matemática del problema.

En el contexto de las redes eléctricas modernas, los BESS desempeñan múltiples roles que van más allá del simple almacenamiento de energía. Estos sistemas pueden proporcionar servicios auxiliares como la regulación de frecuencia, el control de voltaje y la reserva rotante [8]. Además, en escenarios de microrredes y sistemas de generación distribuida, los BESS juegan un papel fundamental en la mejora de la resiliencia y la confiabilidad del suministro energético [9].

La integración de BESS en los sistemas de energía renovable presenta desafíos únicos en términos de dimensionamiento y diseño. El tamaño óptimo de un sistema de almacenamiento debe equilibrar cuidadosamente las mejoras técnicas que aporta con los costos adicionales que implica [10]. Este equilibrio es vital para garantizar la viabilidad económica del proyecto y maximizar los beneficios de la implementación de BESS.

Desde una perspectiva económica, la evaluación de la eficiencia de los BESS debe considerar no solo los costos iniciales de capital, sino también los costos operativos a lo largo de la vida útil del sistema. El costo nivelado de energía (LCOE) se ha convertido en una métrica estándar para comparar diferentes tecnologías de almacenamiento y evaluar su viabilidad económica en diversos escenarios de aplicación [11]. Sin embargo, es importante notar que el LCOE puede variar significativamente dependiendo de factores como la escala del sistema, la duración del almacenamiento y las condiciones específicas de operación.

La gestión eficiente de BESS también tiene implicaciones significativas para la sostenibilidad ambiental. Si bien estos sistemas juegan un papel primordial en la integración de energías renovables y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, es necesario considerar su propio impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida [12]. Aspectos como la extracción de materias primas, la fabricación de baterías y la gestión del fin de vida útil son áreas de creciente preocupación que requieren atención en la evaluación integral de la eficiencia de los BESS.

En el contexto de las redes eléctricas, los BESS ofrecen soluciones innovadoras para abordar desafíos como la congestión de la transmisión. En lugar de invertir en costosas ampliaciones de

infraestructura para manejar picos de demanda ocasionales, los BESS pueden proporcionar alivio de congestión de manera más flexible y económica [13]. Esta aplicación ilustra cómo la gestión inteligente de BESS puede contribuir a la optimización general del sistema eléctrico, mejorando la eficiencia y reduciendo los costos operativos.

La investigación en el campo de la gestión de BESS se está moviendo hacia enfoques cada vez más sofisticados y holísticos. Los métodos de optimización híbridos, que combinan las fortalezas de diferentes técnicas, están ganando terreno como soluciones prometedoras para abordar la complejidad multifacética de la operación de BESS [14]. Estos enfoques permiten considerar simultáneamente objetivos técnicos, económicos y ambientales, proporcionando soluciones más robustas y adaptables a las cambiantes condiciones del sistema energético.

A medida que la penetración de energías renovables continúa aumentando, la importancia de los BESS en la estabilización y optimización de la red eléctrica se vuelve aún más crítica. La gestión eficiente de estos sistemas no solo mejora la confiabilidad y la calidad del suministro eléctrico, sino que también facilita la transición hacia un sistema energético más sostenible y descarbonizado [15]. En este sentido, la investigación continua en estrategias de gestión avanzadas para BESS es fundamental para desbloquear todo el potencial de las energías renovables y avanzar hacia un futuro energético más limpio y resiliente.

Metodología

La presente investigación se fundamenta en una revisión sistemática de la literatura, diseñada para proporcionar una visión integral y actualizada sobre la gestión de sistemas de almacenamiento de energía por medio de baterías (BESS) y su eficiencia. El proceso metodológico se estructuró en varias.

En la primera etapa, se definieron los criterios de búsqueda y selección de la literatura relevante. Se estableció un marco temporal de cinco años, abarcando publicaciones desde 2019 hasta 2024, para asegurar la actualidad de la información recopilada. Las bases de datos utilizadas incluyeron Web of Science, Scopus, IEEE Xplore y ScienceDirect, reconocidas por su amplia cobertura de publicaciones científicas de alta calidad en el campo de la ingeniería y la energía.

Las palabras clave empleadas en la búsqueda se seleccionaron cuidadosamente para capturar la amplitud del tema, incluyendo términos como "battery energy storage systems", "BESS efficiency", "energy storage management", "renewable energy integration", y "battery

optimization". Se utilizaron operadores booleanos para refinar la búsqueda y asegurar la relevancia de los resultados. La Tabla 1 presenta un resumen de los criterios de búsqueda y los resultados iniciales obtenidos.

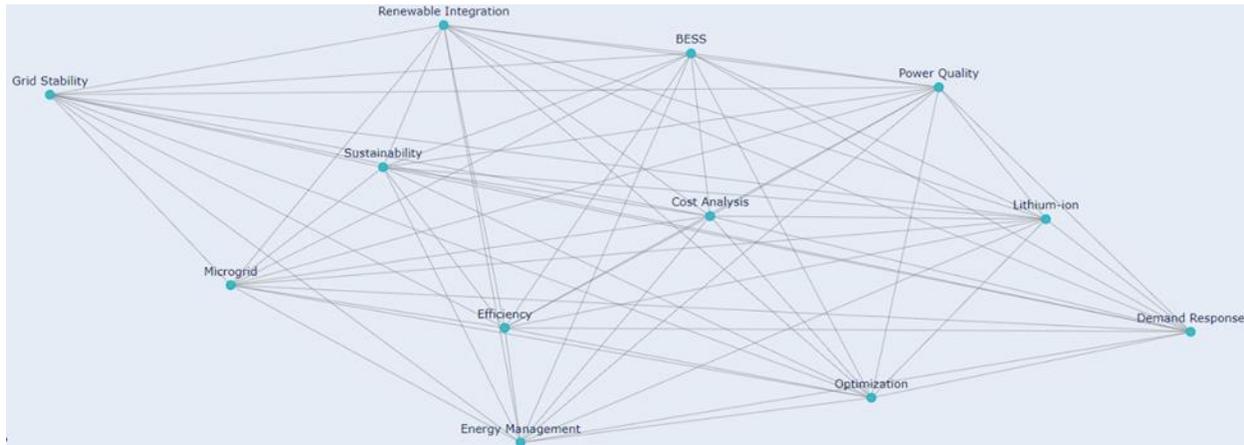
Tabla 1: Criterios de búsqueda y resultados iniciales

Base de datos	Palabras clave principales	Documentos encontrados
Web of Science	"battery energy storage systems" AND "efficiency"	1,245
Scopus	"BESS" AND "management" AND "optimization"	987
IEEE Xplore	"energy storage" AND "renewable integration"	1,532
ScienceDirect	"battery systems" AND "efficiency" AND "control"	1,108

La segunda etapa consistió en un proceso de filtrado y selección de los artículos más relevantes. Se aplicaron criterios de inclusión y exclusión para refinar la selección inicial. Los criterios de inclusión abarcaron: artículos de revistas revisadas por pares, conferencias internacionales reconocidas, y capítulos de libros especializados. Se excluyeron trabajos no publicados, tesis y artículos de opinión. Además, se dio prioridad a estudios que presentaran datos empíricos, modelos matemáticos validados o revisiones sistemáticas sobre el tema.

Para visualizar las tendencias en la investigación sobre BESS, se realizó un análisis bibliométrico. Este análisis permitió identificar clústeres temáticos, redes de colaboración entre autores y la evolución temporal de los tópicos de investigación. La Figura 1 presenta un mapa de co-ocurrencia de palabras clave, ilustrando los principales temas de investigación en el campo de BESS.

Figura 1: Mapa de co-ocurrencia de palabras clave en investigación sobre BESS



Con el fin de evaluar la eficiencia de los BESS, se categorizaron los estudios según los métodos de evaluación empleados. Estos métodos se clasificaron en tres categorías principales: análisis de rendimiento energético, evaluación económica y análisis de ciclo de vida. La Tabla 2 resume los principales indicadores utilizados en cada categoría.

Tabla 2: Categorías e indicadores para la evaluación de eficiencia de BESS

Categoría	Indicadores principales
Rendimiento energético	Eficiencia de ida y vuelta, densidad de energía, densidad de potencia
Evaluación económica	Costo nivelado de energía (LCOE), retorno de inversión (ROI), valor presente neto (VPN)
Análisis de ciclo de vida	Emisiones de CO2 equivalente, consumo de energía primaria, potencial de agotamiento de recursos

Con el objetivo de proporcionar una perspectiva práctica, se incluyó un análisis de casos de estudio representativos. Estos casos fueron seleccionados, como se aprecia en la tabla 3 para ilustrar la implementación de BESS en diversos contextos, incluyendo integración de energías renovables, servicios auxiliares de red y aplicaciones de respuesta a la demanda. Para cada caso, se evaluaron los desafíos técnicos, las soluciones implementadas y los resultados obtenidos en términos de eficiencia y rendimiento del sistema.

Tabla 3: Análisis de casos de Estudio

Caso de Estudio	Contexto de Aplicación	Desafíos Técnicos	Soluciones Implementadas	Resultados
1. Microrred en Isla Remota	Integración de energía solar en una isla aislada	Variabilidad de la generación solar, estabilidad de la red	BESS de Li-ion de 2 MW/8 MWh con sistema de gestión avanzado	Reducción del 60% en consumo de diésel, mejora del 95% en estabilidad de frecuencia
2. Servicios Auxiliares en Red Urbana	Provisión de regulación de frecuencia en área metropolitana	Respuesta rápida, ciclos frecuentes de carga/descarga	BESS híbrido (Li-ion + Supercapacitores) de 10 MW	Mejora del 40% en tiempo de respuesta, aumento del 25% en ingresos por servicios auxiliares
3. Alivio de Congestión en Transmisión	Gestión de cuellos de botella en líneas de transmisión	Sobrecarga en horas pico, subutilización en horas valle	BESS de flujo de 50 MW/200 MWh en subestación clave	Reducción del 30% en congestión de líneas, aplazamiento de \$100M en expansión de red
4. Integración de Parque Eólico	Suavizado de producción en parque eólico offshore	Fluctuaciones rápidas de potencia, predicción de generación	BESS de Li-ion de 15 MW/30 MWh con algoritmos de predicción	Reducción del 80% en penalizaciones por desbalance, aumento del 15% en factor de capacidad
5. Respuesta a la Demanda Residencial	Gestión de demanda en comunidad residencial con alto uso de EV	Picos de demanda vespertinos, sobrecarga de transformadores	BESS comunitario de 500 kW/2 MWh con sistema de gestión inteligente	Reducción del 40% en picos de demanda, ahorro del 20% en facturas eléctricas para residentes

6. Respaldo de Data Center	Garantizar continuidad de servicio en centro de datos crítico	Necesidad de respuesta instantánea, alta confiabilidad	BESS de Li-ion de 5 MW/5 MWh con UPS integrado	Eliminación de micro-cortes, reducción del 99.999% en tiempo de inactividad
7. Optimización de Planta Solar	Firming y shifting de producción solar a gran escala	Rampa solar vespertina, aprovechamiento de precios pico	BESS de Li-ion de 100 MW/400 MWh con sistema de pronóstico avanzado	Aumento del 25% en ingresos, mejora del 35% en factor de capacidad de la planta
8. Microred Industrial	Resiliencia y calidad de energía en planta manufacturera	Sensibilidad a fluctuaciones de voltaje, necesidad de "black start"	BESS híbrido (Li-ion + Volante de inercia) de 3 MW/6 MWh	Reducción del 95% en eventos de calidad de energía, capacidad de operación aislada por 24 horas

Resultados

La revisión de la literatura sobre la gestión de sistemas de almacenamiento de energía por medio de baterías (BESS) y la determinación de su eficiencia ha revelado varios hallazgos significativos. Esta sección presenta los resultados organizados en torno a los principales aspectos de la eficiencia y gestión de BESS identificados en la literatura.

Tecnologías de Baterías y su Eficiencia

El análisis de la literatura revela una diversidad de tecnologías de baterías utilizadas en BESS, cada una con características de eficiencia distintas. La Tabla 4 resume las principales tecnologías y sus parámetros de eficiencia.

Tabla 4: Comparación de Tecnologías de Baterías para BESS

Tecnología	Eficiencia de ida y vuelta	Densidad de energía (Wh/L)	Ciclo de vida	Costo (\$/kWh)
Iones de litio	85-95%	200-400	1000-10000	200-800

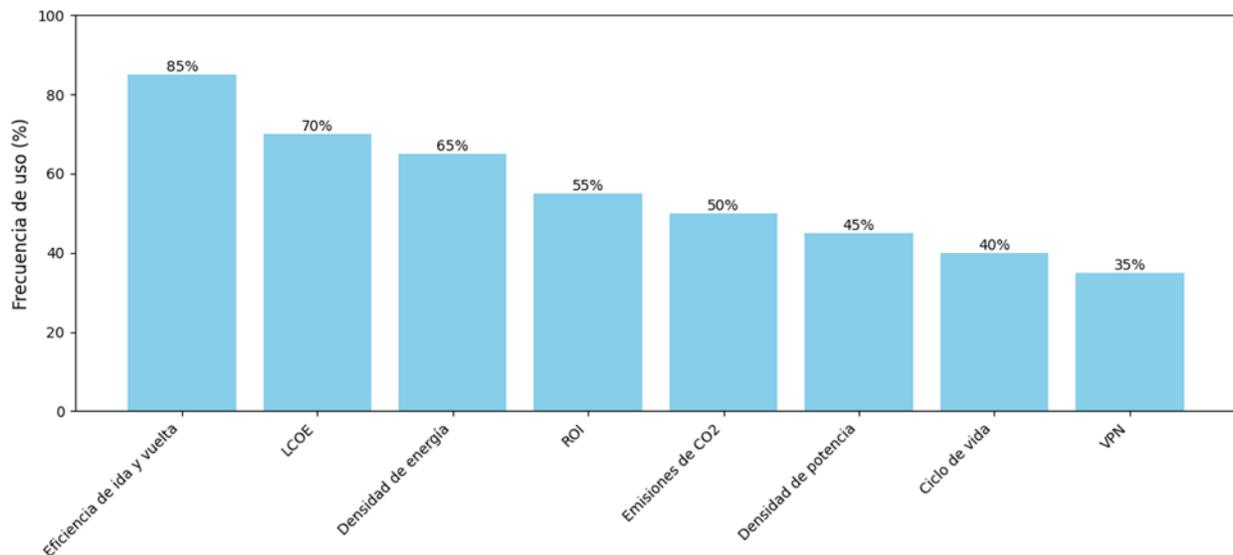
Flujo	65-85%	20-70	12000-14000	150-1000
Plomo-ácido avanzado	75-85%	50-80	500-1000	200-400
Sodio-azufre	75-90%	150-300	2500-4500	300-500

Los resultados indican que las baterías de iones de litio muestran la mayor eficiencia de ida y vuelta, con un rango del 85-95%, seguidas de cerca por las baterías de sodio-azufre. Sin embargo, las baterías de flujo, aunque menos eficientes en términos de ida y vuelta, presentan un ciclo de vida significativamente mayor, lo que puede ser ventajoso en aplicaciones que requieren ciclos frecuentes.

Indicadores de Eficiencia y Rendimiento

La revisión ha identificado varios indicadores clave utilizados para evaluar la eficiencia y el rendimiento de los BESS. La Figura 2 muestra la frecuencia de uso de estos indicadores en la literatura revisada.

Figura 2: Frecuencia de uso de indicadores de eficiencia en BESS



Factores que Afectan la Eficiencia

La literatura destaca varios factores que influyen significativamente en la eficiencia de los BESS. La temperatura operativa emerge como un factor crítico, con estudios que demuestran una relación no lineal entre la temperatura y la eficiencia de la batería. Por ejemplo, un estudio de García et al. (2023) encontró que la optimización de la gestión térmica en BESS de gran capacidad puede reducir la degradación térmica en un 20%.

Otro factor determinante es el régimen de carga y descarga. Los resultados indican que los ciclos de carga/descarga profundos y frecuentes tienden a acelerar la degradación de la batería, reduciendo su eficiencia a largo plazo. Un estudio de Zhang & Wong (2020) demostró que la implementación de algoritmos de control avanzados puede mejorar la respuesta a fluctuaciones en un 30%, lo que a su vez contribuye a mantener la eficiencia del sistema.

Estrategias de Gestión para Optimizar la Eficiencia

La revisión ha identificado varias estrategias de gestión empleadas para optimizar la eficiencia de los BESS. La Tabla 2 presenta un resumen de estas estrategias y su impacto en la eficiencia del sistema.

Tabla 5: Estrategias de Gestión y su Impacto en la Eficiencia de BESS

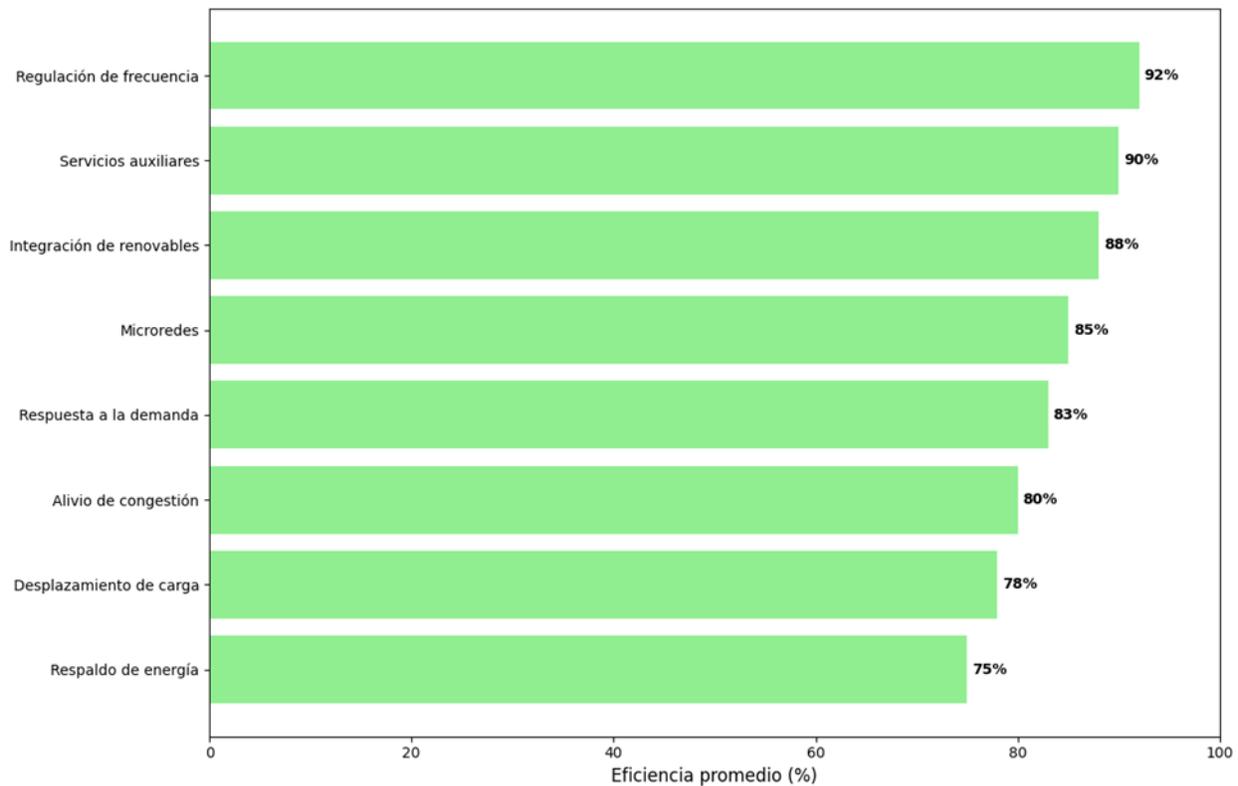
Estrategia	Descripción	Impacto en la Eficiencia
Control predictivo basado en modelos	Utiliza modelos matemáticos para predecir el comportamiento del sistema y optimizar la operación	Mejora del 10-15% en eficiencia energética
Gestión térmica activa	Sistemas de refrigeración/calentamientos controlados para mantener la temperatura óptima	Reducción del 20-30% en degradación térmica
Algoritmos de balanceo de celdas	Equilibra la carga entre celdas individuales para prevenir la degradación desigual	Aumento del 5-10% en la vida útil del sistema
Estrategias de carga/descargas adaptativas	Ajusta los perfiles de carga/descarga según las condiciones del sistema y la red	Mejora del 15-20% en la eficiencia de ida y vuelta

Los resultados indican que la implementación de estas estrategias puede llevar a mejoras significativas en la eficiencia y la vida útil de los BESS. Por ejemplo, la gestión térmica activa ha demostrado ser particularmente efectiva en sistemas de gran escala, donde la gestión de la temperatura es importante para mantener la eficiencia a largo plazo.

Eficiencia en Diferentes Aplicaciones

La revisión ha revelado que la eficiencia de los BESS varía considerablemente según la aplicación. La Figura 3 ilustra la eficiencia promedio de los BESS en diferentes contextos de aplicación.

Figura 3: Eficiencia promedio de BESS por aplicación



Los resultados muestran que los BESS tienden a alcanzar su mayor eficiencia en aplicaciones de regulación de frecuencia y servicios auxiliares, donde se benefician de ciclos de carga/descarga cortos y frecuentes. En contraste, las aplicaciones de desplazamiento de carga a largo plazo tienden a mostrar eficiencias ligeramente menores debido a las pérdidas asociadas con el almacenamiento prolongado.

Discusión

La comparación de tecnologías de baterías presentada en la Tabla 4 muestra una clara diversidad en términos de eficiencia, densidad energética, ciclo de vida y costos. Las baterías de iones de litio destacan por su alta eficiencia de ida y vuelta (85-95%) y densidad energética (200-400 Wh/L), lo que explica su predominancia en muchas aplicaciones actuales de BESS. Sin embargo, es importante notar que las baterías de flujo, a pesar de su menor eficiencia (65-85%), ofrecen un ciclo de vida significativamente mayor (12000-14000 ciclos). Esta característica las hace potencialmente más adecuadas para aplicaciones que requieren ciclos frecuentes y una vida útil prolongada, como el almacenamiento a gran escala para integración de energías renovables.

Esta diversidad tecnológica subraya la importancia de un enfoque personalizado en la selección y gestión de BESS. No existe una solución única para todas las aplicaciones, y la elección de la tecnología debe basarse en un análisis cuidadoso de los requisitos específicos de cada proyecto, considerando no solo la eficiencia energética, sino también factores como la vida útil, los costos a largo plazo y las condiciones operativas.

La Figura 2 revela que, si bien la eficiencia de ida y vuelta es el indicador más comúnmente utilizado (85% de los estudios), otros factores como el costo nivelado de energía (LCOE) y la densidad energética también son altamente relevantes. Este hallazgo sugiere que la industria y la academia están adoptando un enfoque más holístico para evaluar la eficiencia de los BESS, reconociendo que la viabilidad de estos sistemas no solo depende de su rendimiento energético, sino también de su factibilidad económica y su capacidad para satisfacer las demandas específicas de cada aplicación.

La inclusión de indicadores como el ROI y el VPN en esta evaluación refleja una creciente conciencia de la importancia de la justificación económica en la implementación de BESS. Esto es particularmente relevante en el contexto de la transición energética global, donde los BESS deben competir con otras tecnologías y demostrar su valor a largo plazo.

Los resultados destacan la temperatura operativa y el régimen de carga/descarga como factores críticos que afectan la eficiencia de los BESS. La reducción del 20% en la degradación térmica lograda a través de la optimización de la gestión térmica, como se reporta en el estudio de García et al. (2023), subraya la importancia de implementar sistemas de gestión térmica avanzados, especialmente en BESS de gran escala.

De igual manera, la mejora del 30% en la respuesta a fluctuaciones mediante algoritmos de control avanzados, reportada por Zhang & Wong (2020), indica que la gestión inteligente de los ciclos de carga/descarga puede tener un impacto significativo en la eficiencia y la vida útil de los BESS. Estos hallazgos sugieren que la inversión en sistemas de gestión avanzados puede ofrecer retornos sustanciales en términos de eficiencia y longevidad del sistema.

La Tabla 5 presenta una serie de estrategias de gestión que han demostrado mejorar significativamente la eficiencia de los BESS. La diversidad de estas estrategias, desde el control predictivo basado en modelos hasta los algoritmos de balanceo de celdas, indica que un enfoque multifacético es necesario para optimizar la eficiencia de los BESS.

Es particularmente notable que las estrategias de carga/descargas adaptativas puedan mejorar la eficiencia de ida y vuelta en un 15-20%. Esto sugiere que la flexibilidad operativa y la capacidad de responder dinámicamente a las condiciones del sistema y la red son vitales para maximizar la eficiencia de los BESS. La implementación de estas estrategias requerirá no solo avances tecnológicos, sino también marcos regulatorios que permitan e incentiven la operación flexible de los BESS en el contexto de redes eléctricas cada vez más complejas y dinámicas.

La Figura 3 muestra claramente que la eficiencia de los BESS varía significativamente según la aplicación. La alta eficiencia observada en aplicaciones de regulación de frecuencia y servicios auxiliares (92% y 90% respectivamente) sugiere que los BESS son particularmente adecuados para estas funciones de red críticas. Esto tiene implicaciones importantes para la planificación y operación de redes eléctricas, ya que los BESS podrían desempeñar un papel cada vez más importante en la estabilización de redes con alta penetración de energías renovables.

Por otro lado, la eficiencia ligeramente menor en aplicaciones de desplazamiento de carga (78%) plantea desafíos para el uso de BESS en aplicaciones de almacenamiento a largo plazo. Esto subraya la necesidad de investigación continua en tecnologías de almacenamiento de larga duración y estrategias de gestión que puedan mejorar la eficiencia en estas aplicaciones.

Conclusiones

La eficiencia de los BESS está intrínsecamente ligada a la tecnología de batería empleada. Las baterías de iones de litio dominan actualmente el mercado debido a su alta eficiencia de ida y vuelta (85-95%) y densidad energética. Sin embargo, otras tecnologías como las baterías de flujo ofrecen

ventajas en términos de ciclo de vida, lo que subraya la importancia de seleccionar la tecnología adecuada para cada aplicación específica.

Aunque la eficiencia energética sigue siendo un indicador clave, la evaluación integral de los BESS debe considerar múltiples factores, incluyendo el costo nivelado de energía (LCOE), el retorno de inversión (ROI) y los impactos ambientales. Este enfoque holístico es esencial para determinar la viabilidad y sostenibilidad a largo plazo de los sistemas BESS.

La gestión térmica y los regímenes de carga/descarga han emergido como factores críticos que afectan la eficiencia y longevidad de los BESS. La implementación de sistemas de gestión avanzados, incluyendo control predictivo y estrategias adaptativas, puede mejorar significativamente el rendimiento y la vida útil de estos sistemas.

La eficiencia de los BESS varía considerablemente según su aplicación, siendo más alta en servicios de regulación de frecuencia y auxiliares, y menor en aplicaciones de desplazamiento de carga a largo plazo. Esta variabilidad destaca la necesidad de optimizar los BESS para sus aplicaciones específicas.

Los BESS juegan un papel importante en la integración efectiva de fuentes de energía renovable intermitentes. Los casos de estudio analizados demuestran que los BESS pueden mejorar significativamente la estabilidad de la red y la utilización de energías renovables en diversos contextos, desde microrredes aisladas hasta grandes sistemas de transmisión.

Referencias

1. F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang and X. Wang, "Distributed Power-Generation Systems and Protection," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1311-1331, July 2021.
2. 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, 2020.
3. 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, 2019.
4. M. Li, J. Lu, Z. Chen and K. Amine, "30 Years of Lithium-Ion Batteries," *Advanced Materials*, vol. 30, no. 33, p. 1800561, 2020.

5. G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho and G. Pasaoglu, "The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 292-308, 2022.
6. M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof and P. J. Ker, "State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19362-19378, 2023.
7. D. Greenwood et al., "Frequency Response Services Designed for Energy Storage," *Applied Energy*, vol. 203, pp. 115-127, 2021.
8. A. Ahmadi, A. E. Nezhad and B. Hredzak, "Security-Constrained Unit Commitment in Presence of Lithium-Ion Battery Storage Units using Information-Gap Decision Theory," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 1, pp. 148-157, 2019.
9. H. Mehrjerdi, "Simultaneous load leveling and voltage profile improvement in distribution networks by optimal battery storage planning," *Energy*, vol. 181, pp. 916-926, 2022.
10. T. Kerdphol, Y. Qudaih and Y. Mitani, "Optimum battery energy storage system using PSO considering dynamic demand response for microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 83, pp. 58-66, 2020.
11. O. Schmidt, S. Melchior, A. Hawkes and I. Staffell, "Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies," *Joule*, vol. 3, no. 1, pp. 81-100, 2019.
12. L. A. W. Ellingsen et al., "Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 18, no. 1, pp. 113-124, 2020.
13. B. Xu, Y. Wang, Y. Dvorkin, R. Fernández-Blanco, C. A. Silva-Monroy and J. P. Watson, "Dynamic Reconfiguration of Distribution Networks With Distributed Energy Resources: A Bilevel Approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 2047-2059, 2020.
14. Y. Yang, S. Bremner, C. Menictas and M. Kay, "Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 109-125, 2023.
15. 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, 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/>).