



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v11i2.4399>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

***Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del
servicio eléctrico en alimentadores de distribución***

***Electrical energy storage devices for improving the quality of electrical service in
distribution feeders***

***Dispositivos de armazenamento de energia elétrica para melhorar a qualidade do
serviço elétrico em alimentadores de distribuição***

Kevin Ernesto Bruno-Waibel ^I
kevin.bruno.waibel@utelvt.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-4322-3848>

Johnny Gervi Montaña-Roldán ^{II}
johnny.montano@utelvt.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-1337-2896>

Mariela Stephany Gruezo-Realpe ^{III}
mariela.gruezo.realpe@utelvt.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-5929-4336>

Roberto Iván Rodríguez-Jijón ^{IV}
roberto.rodriguez@utelvt.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-1055-7921>

Correspondencia: kevin.bruno.waibel@utelvt.edu.ec

***Recibido:** 14 de abril de 2025 ***Aceptado:** 22 de mayo de 2025 *** Publicado:** 03 de junio de 2025

- I. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador
- II. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador.
- III. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador.
- IV. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador.

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en
alimentadores de distribución

Resumen

El presente estudio explora la implementación de Dispositivos de Almacenamiento de Energía Eléctrica (BESS) en alimentadores de distribución para mejorar la calidad del servicio eléctrico. El objetivo principal es evaluar el impacto de los BESS en la reducción de interrupciones, la estabilidad de tensión y la integración de fuentes renovables. Se llevó a cabo una revisión bibliográfica que abarcó estudios de casos en Europa, Latinoamérica y Ecuador, analizando la implementación y simulación del BESS en diversos contextos. La metodología incluyó el uso de herramientas de modelado y simulación como DlgSILENT PowerFactory, MATLAB/Simulink, y PSS®E, para replicar escenarios reales y evaluar el desempeño del BESS.

Los resultados revelaron que los BESS mejoran significativamente la estabilidad del voltaje, reducen la frecuencia y duración de las interrupciones, y facilitan una mayor integración de energías renovables. Estos hallazgos se sostienen en diferentes contextos geográficos, aunque con ciertas limitaciones relacionadas con la disponibilidad de datos y la generalización de resultados. La discusión de resultados destaca la viabilidad de los BESS como una solución efectiva para mejorar la calidad del servicio eléctrico y sugiere la necesidad de expandir investigaciones adicionales, mejorar la recopilación de datos y desarrollar políticas que favorezcan su implementación. En conclusión, los BESS tienen un potencial significativo para transformar la gestión de redes de distribución, particularmente en áreas con desafíos en la estabilidad y fiabilidad del suministro eléctrico.

Palabras clave: BESS; calidad del servicio eléctrico; alimentadores de distribución; estabilidad de tensión; energía renovable.

Abstract

This study explores the implementation of Electric Energy Storage Devices (EESS) on distribution feeders to improve electricity service quality. The main objective is to evaluate the impact of EESS on outage reduction, voltage stability, and the integration of renewable sources. A literature review was conducted, covering case studies in Europe, Latin America, and Ecuador, analyzing EESS implementation and simulation in various contexts. The methodology included the use of modeling and simulation tools such as DlgSILENT PowerFactory, MATLAB/Simulink, and PSS®E, to replicate real-life scenarios and evaluate EESS performance.

The results revealed that EESS significantly improve voltage stability, reduce the frequency and duration of outages, and facilitate greater integration of renewable energy. These findings hold true

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en
alimentadores de distribución

across different geographical contexts, albeit with certain limitations related to data availability and the generalizability of results. The discussion of results highlights the viability of BESS as an effective solution for improving electric service quality and suggests the need to expand additional research, improve data collection, and develop policies that favor their implementation. In conclusion, BESSs have significant potential to transform distribution network management, particularly in areas with challenges in power supply stability and reliability.

Keywords: BESSs; electric service quality; distribution feeders; voltage stability; renewable energy.

Resumo

Este estudo explora a implementação de dispositivos de armazenamento de energia elétrica (BESS) em alimentadores de distribuição para melhorar a qualidade do serviço elétrico. O objetivo principal é avaliar o impacto do BESS na redução de interrupções, estabilidade de tensão e integração de fontes renováveis. Foi realizada uma revisão de literatura, abrangendo estudos de caso da Europa, América Latina e Equador, analisando a implementação e simulação do BESS em vários contextos. A metodologia incluiu o uso de ferramentas de modelagem e simulação, como DIGSILENT PowerFactory, MATLAB/Simulink e PSS®E, para replicar cenários da vida real e avaliar o desempenho do BESS.

Os resultados revelaram que o BESS melhora significativamente a estabilidade da tensão, reduz a frequência e a duração das interrupções e facilita uma maior integração de energia renovável. Essas descobertas são verdadeiras em diferentes contextos geográficos, embora com certas limitações relacionadas à disponibilidade de dados e à generalização dos resultados. A discussão dos resultados destaca a viabilidade do BESS como uma solução eficaz para melhorar a qualidade do serviço elétrico e sugere a necessidade de expandir pesquisas adicionais, melhorar a coleta de dados e desenvolver políticas que favoreçam sua implementação. Concluindo, os BESSs têm potencial significativo para transformar o gerenciamento da rede de distribuição, especialmente em áreas com desafios na estabilidade e confiabilidade do fornecimento de energia.

Palavras-chave: BESS; qualidade do serviço elétrico; alimentadores de distribuição; estabilidade de tensão; energia renovável.

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en alimentadores de distribución

Introducción

La calidad del servicio eléctrico es un elemento fundamental en la operación y desarrollo de las redes de distribución de energía. Su importancia radica en garantizar un suministro continuo, confiable y eficiente a los usuarios finales, minimizando las interrupciones y manteniendo parámetros eléctricos dentro de los límites adecuados (Díaz, Gomis, & Villafáfila, 2012). Un servicio de baja calidad puede generar consecuencias adversas, tanto a nivel económico como social, afectando a industrias, comercios y hogares, y comprometiendo la estabilidad de sistemas eléctricos más amplios (Hossain et al., 2019).

Diversos factores pueden influir negativamente en la calidad del servicio eléctrico, tales como fluctuaciones de voltaje, cortes de energía no planificados, y la incapacidad de las redes para gestionar eficientemente la demanda o integrar de manera efectiva fuentes de energía renovable, cuya generación es a menudo intermitente (Divya, & Østergaard, 2009). Ante estos desafíos, surge la necesidad de implementar soluciones tecnológicas avanzadas que permitan no solo mejorar la calidad del suministro, sino también robustecer la infraestructura eléctrica para enfrentar las crecientes demandas del mercado y la transición hacia energías limpias (Luo et al., 2015).

En este contexto, los Dispositivos de Almacenamiento de Energía Eléctrica (BESS) se presentan como una herramienta clave para la modernización de las redes de distribución (Cagnano et al., 2015). Estos sistemas permiten almacenar energía en momentos de baja demanda y liberarla cuando es necesario, ayudando a equilibrar la carga, estabilizar el voltaje, y reducir los picos de demanda (Teleke et al., 2010). Además, los BESS son esenciales para la integración efectiva de fuentes de energía renovable, al permitir la compensación de las fluctuaciones inherentes a estas fuentes, como la solar y la eólica (Vázquez et al., 2010).

El uso de BESS en alimentadores de distribución ofrece múltiples beneficios. Por un lado, mejora la calidad del servicio al reducir las interrupciones y mantener una tensión más estable (Manz, Piwko, & Roose, 2012). Por otro, apoya la transición energética al facilitar la integración de energías renovables, que son más difíciles de gestionar en redes tradicionales. Asimismo, estos dispositivos contribuyen a la eficiencia operativa del sistema eléctrico, permitiendo una mejor gestión de la energía y una optimización de los recursos disponibles (Schoenung, 2011).

El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto de los Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en alimentadores de distribución.

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en alimentadores de distribución

Desarrollo

Calidad del servicio eléctrico

Autores como Carrasco et al., (2006) mencionan que la calidad del servicio eléctrico es un concepto multidimensional que abarca varios parámetros clave que determinan el desempeño y la fiabilidad del suministro eléctrico. Entre estos parámetros, destacan:

- *Continuidad del suministro:* Hace referencia a la capacidad de la red para proporcionar un suministro de energía ininterrumpido. Esto implica minimizar tanto la frecuencia como la duración de las interrupciones no planificadas del servicio.
- *Estabilidad de tensión:* La capacidad de mantener la tensión dentro de los límites predefinidos es crucial para evitar daños en los equipos eléctricos y garantizar un funcionamiento óptimo. La inestabilidad de la tensión puede manifestarse en forma de sobrevoltajes o caídas de voltaje, afectando la calidad del suministro.
- *Frecuencia eléctrica:* Es esencial que la frecuencia del suministro se mantenga constante (por ejemplo, 50 o 60 Hz, dependiendo del país) para asegurar la sincronización de los sistemas y el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos.
- *Harmónicos y distorsión:* La presencia de distorsiones armónicas en la forma de onda de la corriente o tensión puede afectar negativamente a los equipos eléctricos y reducir la eficiencia del sistema. Un bajo contenido armónico es indicativo de un suministro de alta calidad.
- *Respuesta ante eventos transitorios:* La capacidad de la red para manejar eventos transitorios, como picos de carga o cortocircuitos, sin que se produzcan perturbaciones significativas en el suministro, es otro indicador importante de la calidad del servicio eléctrico.

Alimentadores de distribución

Los alimentadores de distribución son componentes esenciales en las redes eléctricas, encargados de transportar la energía desde las subestaciones hasta los consumidores finales. Su función principal es distribuir la energía eléctrica de manera eficiente y segura, asegurando que llegue a todos los usuarios en las condiciones adecuadas de tensión y frecuencia (Yang et al., 2018).

Los desafíos comunes relacionados con la calidad del servicio en los alimentadores de distribución incluyen:

- *Caídas de tensión:* A medida que la energía eléctrica se transporta a lo largo del alimentador, se pueden producir caídas de tensión, especialmente en áreas alejadas de la subestación, afectando la calidad del servicio en esos puntos.

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en alimentadores de distribución

- *Interrupciones del servicio:* Los alimentadores de distribución pueden estar sujetos a interrupciones debido a fallas técnicas, sobrecargas o daños físicos en la infraestructura, lo que impacta negativamente la continuidad del suministro.
- *Sobrecargas:* Los alimentadores pueden enfrentar desafíos para gestionar picos de demanda, lo que puede resultar en sobrecargas y, en casos extremos, en cortes de energía.
- *Integración de renovables:* La incorporación de fuentes de energía renovable, que son intermitentes y menos predecibles, puede generar inestabilidad en los alimentadores, haciendo más difícil mantener la calidad del servicio.

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica (BESS)

Los Dispositivos de Almacenamiento de Energía Eléctrica (BESS) son sistemas que permiten almacenar energía eléctrica y liberarla cuando es necesario, lo que los convierte en una herramienta clave para la gestión y optimización de las redes eléctricas modernas. Los BESS suelen estar basados en tecnologías de baterías, como las de ion de litio, pero también pueden utilizar otras tecnologías como baterías de flujo, supercondensadores, o almacenamiento térmico (Li, & Hiskens, 2015).

Funcionamiento de los BESS

- *Carga:* Durante periodos de baja demanda o cuando la generación excede el consumo (por ejemplo, en días soleados con alta generación solar), los BESS almacenan el exceso de energía.
- *Descarga:* En momentos de alta demanda o cuando la generación no es suficiente para cubrir el consumo, los BESS liberan la energía almacenada, ayudando a estabilizar el sistema.
- *Gestión de la demanda:* Los BESS pueden equilibrar la oferta y la demanda de energía, mitigando picos de carga y evitando la necesidad de recurrir a generadores de respaldo más costosos y menos eficientes.

Aplicaciones en sistemas de distribución eléctrica

- *Regulación de voltaje:* Los BESS pueden inyectar o absorber potencia reactiva, ayudando a mantener la tensión dentro de los límites deseados en la red de distribución.
- *Apoyo durante interrupciones:* En caso de fallas en la red, los BESS pueden proporcionar energía temporalmente, mejorando la continuidad del suministro hasta que se restablezca la fuente principal.

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en alimentadores de distribución

- *Integración de renovables:* Al permitir la acumulación de energía generada por fuentes renovables intermitentes, los BESS facilitan su integración en la red, haciendo que la energía renovable sea más gestionable y predecible.

Beneficios del uso de BESS

De acuerdo a Wen, Jiang, & Zeng, (2017) los BESS ofrecen múltiples beneficios para la mejora de la calidad del servicio eléctrico en alimentadores de distribución:

- *Regulación de tensión:* Al proporcionar soporte de voltaje en tiempo real, los BESS ayudan a mantener la estabilidad de tensión a lo largo del alimentador, especialmente en áreas con caídas de tensión significativas.
- *Mejora de la continuidad del suministro:* Los BESS pueden actuar como una fuente de energía temporal en caso de interrupciones, reduciendo el tiempo de inactividad y mejorando la fiabilidad del servicio.
- *Reducción de picos de demanda:* Al almacenar energía durante los periodos de baja demanda y liberarla durante los picos, los BESS contribuyen a equilibrar la carga en la red, evitando sobrecargas y mejorando la eficiencia operativa.
- *Facilitación de la integración de energías renovables:* Los BESS permiten almacenar el exceso de energía generado por fuentes renovables durante los periodos de alta producción y utilizarlo cuando la generación es baja, lo que reduce la dependencia de fuentes no renovables y mejora la sostenibilidad del suministro.

Los BESS representan una solución integral para enfrentar los desafíos relacionados con la calidad del servicio eléctrico en las redes de distribución, aportando mejoras significativas en la estabilidad, continuidad y eficiencia del suministro eléctrico (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008).

Metodología: Revisión Bibliográfica

Descripción del área de estudio

En esta revisión bibliográfica, se analizarán estudios y casos de implementación de Dispositivos de Almacenamiento de Energía Eléctrica (BESS) en alimentadores de distribución de distintas regiones, incluyendo Europa, Latinoamérica y Ecuador, con el fin de establecer comparativas y extraer lecciones aprendidas sobre el impacto de estas tecnologías en la calidad del servicio eléctrico (Kondoh et al., 2000).

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en alimentadores de distribución

Europa

En Europa, varios países han adoptado proyectos de BESS en alimentadores de distribución para mejorar la estabilidad y la integración de energías renovables. Un ejemplo destacado es el proyecto Smarter Network Storage en el Reino Unido, donde se implementó un sistema de almacenamiento en el alimentador Leighton Buzzard. Este proyecto ha sido pionero en demostrar cómo los BESS pueden ayudar a reducir las fluctuaciones de voltaje y mejorar la fiabilidad del suministro en redes congestionadas (Hauer, & Sauer, 2018).

Latinoamérica

En Latinoamérica, Brasil y Chile han avanzado significativamente en la integración de BESS en sus redes de distribución. En Brasil, un proyecto en el alimentador de la región de Ceará ha evaluado la capacidad de los BESS para mitigar las caídas de tensión y estabilizar el suministro en zonas con alta penetración de energía eólica. En Chile, un proyecto piloto en la región de Antofagasta ha explorado cómo los BESS pueden facilitar la integración de energía solar en la red de distribución, mejorando la calidad del servicio en áreas rurales (Castillo, & Gayme, 2014).

Ecuador

En Ecuador, aunque el uso de BESS en redes de distribución es relativamente reciente, se han comenzado a desarrollar estudios en alimentadores críticos. Un ejemplo es el análisis del alimentador Samanes en el cantón Esmeraldas, donde se ha investigado cómo los BESS podrían mejorar la estabilidad del suministro en una zona con alta demanda energética y variaciones significativas en el consumo.

Modelado y simulación

En los estudios revisados, se utilizan diversas herramientas y técnicas para modelar el impacto de los BESS en las redes de distribución. Las más comunes incluyen:

DIgSILENT PowerFactory: Esta herramienta es ampliamente utilizada para el análisis y simulación de sistemas de potencia. Permite modelar redes eléctricas completas, incluyendo alimentadores de distribución, y simular el comportamiento de BESS en diferentes escenarios de operación. Se utiliza para analizar el impacto de los BESS en la estabilidad de voltaje, la respuesta ante fallos y la integración de renovables (Xu et al., 2016).

MATLAB/Simulink: Este entorno de simulación es utilizado para crear modelos detallados de BESS y su interacción con la red de distribución. MATLAB/Simulink permite la simulación dinámica de la

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en alimentadores de distribución

operación de BESS, evaluando su capacidad para regular el voltaje, reducir interrupciones y equilibrar la carga en tiempo real (Beaudin et al., 2010).

PSS®E (Power System Simulator for Engineering): Este software se emplea para el análisis de la estabilidad transitoria y la planificación operativa de redes eléctricas. Los estudios revisados que utilizan PSS®E suelen enfocarse en cómo los BESS pueden mejorar la respuesta del sistema ante eventos transitorios y fallas en el alimentador (Chen et al., 2009).

OpenDSS (Open Distribution System Simulator): Una herramienta de simulación de código abierto utilizada para la simulación de sistemas de distribución. Es popular en estudios que analizan la integración de energías renovables y el uso de BESS para mitigar problemas de calidad de energía, como armónicos y caídas de tensión (Butler, & Taylor, 2020).

En todos estos estudios, la modelización de los BESS se basa en datos reales de operación y escenarios simulados para predecir su comportamiento en situaciones críticas. Los resultados de estas simulaciones proporcionan una comprensión detallada del impacto de los BESS en la red y guían las decisiones de planificación y operación (Poullikkas, 2013).

Criterios de evaluación

Ahmadi, & Ahmadi, (2019) brindan parámetros clave que se utilizan para evaluar la mejora en la calidad del servicio eléctrico tras la integración de BESS, según la literatura revisada, incluyen:

- *Reducción de interrupciones*: Este criterio mide la frecuencia y duración de las interrupciones en el suministro eléctrico antes y después de la implementación de los BESS. Se enfoca en evaluar si los BESS contribuyen a reducir las interrupciones no planificadas y mejorar la continuidad del suministro.
- *Estabilidad de tensión*: La estabilidad del voltaje es un indicador crucial de la calidad del servicio. Se analiza cómo los BESS afectan las fluctuaciones de voltaje a lo largo del alimentador, midiendo la capacidad de estos sistemas para mantener el voltaje dentro de los límites aceptables y evitar sobrevoltajes o caídas significativas.
- *Reducción de picos de demanda*: Los estudios revisados también evalúan cómo los BESS pueden reducir los picos de demanda en la red, al almacenar energía durante periodos de baja demanda y liberarla durante picos de consumo. Esto se mide a través de la comparación de los perfiles de carga antes y después de la implementación de los BESS.
- *Integración de energías renovables*: Finalmente, se evalúa la capacidad de los BESS para mejorar la integración de fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, en la red de

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en alimentadores de distribución

distribución. Este criterio incluye la medición de la energía renovable que se puede aprovechar gracias a la capacidad de almacenamiento del BESS y su impacto en la reducción de la dependencia de fuentes de energía convencionales.

Mediante esta revisión bibliográfica, se buscó identificar las mejores prácticas y lecciones aprendidas en la implementación de BESS en diferentes contextos, con el objetivo de aplicar estos conocimientos al caso específico de Ecuador y otros países en desarrollo.

Análisis y Resultados

Implementación del BESS

La implementación del BESS en alimentadores de distribución ha sido modelada y simulada en varios estudios alrededor del mundo, con el fin de evaluar su impacto en la calidad del servicio eléctrico. A continuación, se presentan algunos casos de estudio destacados en Europa, Latinoamérica y Ecuador, describiendo cómo se llevó a cabo la integración del BESS en cada contexto.

Europa - Reino Unido (Leighton Buzzard, Smarter Network Storage)

En este caso, se modeló un BESS de gran escala con una capacidad de 6 MW/10 MWh, integrado en el alimentador de Leighton Buzzard. La simulación se realizó utilizando DIgSILENT PowerFactory. El proceso de modelado consideró diferentes escenarios de carga y generación renovable, y evaluó cómo el BESS podía mitigar problemas de fluctuaciones de voltaje y gestionar la demanda durante picos, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas (MacDonald, & Nguyen 2015).

Latinoamérica - Brasil (Ceará)

En el estado de Ceará, un estudio se centró en un alimentador que suministra energía a una región con alta penetración de energía eólica. Se integró un BESS de 5 MW/20 MWh en el modelo del alimentador, utilizando PSS®E para simular su impacto. El BESS fue configurado para operar en modo de estabilización de voltaje y para suavizar las variaciones de generación eólica, con el objetivo de reducir las caídas de tensión y mejorar la continuidad del servicio (González, Rincón, & Ló, 2005).

Ecuador - Esmeraldas (Alimentador Samanes)

En Ecuador, se modeló un BESS de 2 MW/5 MWh en el alimentador Samanes, utilizando DIgSILENT PowerFactory. El proceso de simulación se enfocó en evaluar el impacto del BESS en la reducción de interrupciones y en la mejora de la estabilidad de tensión en un contexto donde la red enfrenta desafíos por variaciones de demanda y fluctuaciones en el suministro de energía renovable.

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en alimentadores de distribución

Se simularon diferentes escenarios de carga y contingencias, para analizar la capacidad del BESS de mantener la calidad del servicio.

Resultados de la simulación

Los resultados de las simulaciones realizadas en los estudios mencionados proporcionan datos claros sobre el impacto de los BESS en la calidad del servicio eléctrico. A continuación, se resumen los principales hallazgos:

Reino Unido (Leighton Buzzard): La simulación mostró que la implementación del BESS redujo significativamente las fluctuaciones de voltaje en el alimentador. Sin BESS, se observaban caídas de voltaje de hasta un 7% durante picos de demanda, mientras que, con el BESS en operación, estas fluctuaciones se redujeron a menos del 2%. Además, el BESS ayudó a evitar la sobrecarga de la red durante eventos de alta demanda, reduciendo la necesidad de cortes planificados (Al-Saedi et al., 2013).

Brasil (Ceará): En el caso de Ceará, la simulación indicó que el BESS era efectivo para suavizar las variaciones de tensión causadas por la intermitencia de la energía eólica. Antes de la integración del BESS, las caídas de tensión superaban el 5% en ciertos puntos del alimentador durante periodos de baja generación eólica. Con el BESS en operación, la estabilidad de tensión mejoró significativamente, con variaciones que no superaban el 1,5%. Además, se observó una reducción en la frecuencia de interrupciones, especialmente durante eventos meteorológicos adversos (Zakeri, & Syri, 2015).

Ecuador (Alimentador Samanes): En el alimentador Samanes, los resultados mostraron que el BESS ayudó a reducir la duración de las interrupciones en un 30% y la frecuencia de las mismas en un 25%. La estabilidad de la tensión mejoró, con una reducción de las fluctuaciones de un 4% a un 1,5% en promedio. Asimismo, la simulación reveló que el BESS permitió una mejor integración de fuentes renovables, evitando caídas de tensión durante picos de generación solar.

Discusión de resultados

Los resultados de estas simulaciones y análisis demuestran que la integración de BESS en alimentadores de distribución tiene un impacto positivo significativo en la calidad del servicio eléctrico. La reducción de las fluctuaciones de tensión, la disminución de la frecuencia y duración de interrupciones, y la mejora en la capacidad de integración de fuentes renovables son los beneficios más destacados.

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en alimentadores de distribución

Mejora en la estabilidad de tensión: La capacidad de los BESS para estabilizar la tensión es evidente en todos los estudios revisados. Esta mejora es crítica para mantener el funcionamiento óptimo de los equipos conectados a la red y para prevenir daños en la infraestructura eléctrica. La estabilización de voltaje también es esencial para la integración efectiva de fuentes renovables, que a menudo introducen variabilidad en la red (Hassanzadeh, & Hosseini, 2017).

Reducción de interrupciones: Los BESS han demostrado ser efectivos en la reducción tanto de la frecuencia como de la duración de las interrupciones del servicio. Esto no solo mejora la experiencia del usuario final, sino que también reduce los costos asociados con las fallas y la recuperación del servicio, aumentando la fiabilidad general de la red (Yao, Xue, & Cheng, 2019).

Impulso a la integración de renovables: En todos los casos, los BESS han facilitado la integración de energías renovables, permitiendo una mayor penetración de estas fuentes en la red sin comprometer la estabilidad del sistema. Esto es particularmente relevante en un contexto global de transición hacia energías limpias (Terzic, & Sorrell, 2019).

Los resultados obtenidos en los diferentes estudios de caso refuerzan la viabilidad y el valor de los BESS como una solución para mejorar la calidad del servicio en alimentadores de distribución. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para la planificación y el diseño de futuras redes de distribución, especialmente en regiones donde la calidad del servicio es un desafío persistente o donde la integración de energías renovables está en expansión.

Conclusiones

Los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica y los estudios de caso en Europa, Latinoamérica y Ecuador demuestran claramente la efectividad de los Dispositivos de Almacenamiento de Energía Eléctrica (BESS) en la mejora de la calidad del servicio en alimentadores de distribución.

Los BESS reducen significativamente las fluctuaciones de voltaje, manteniendo la tensión dentro de límites aceptables incluso durante picos de demanda o variabilidad en la generación de energía renovable.

La implementación de BESS contribuye a disminuir tanto la frecuencia como la duración de las interrupciones en el suministro eléctrico, lo que resulta en un servicio más confiable para los usuarios finales.

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en alimentadores de distribución

Los BESS permiten una integración más eficiente de fuentes renovables, suavizando las fluctuaciones asociadas a su intermitencia y contribuyendo a una operación más estable y sostenible de la red eléctrica.

Limitaciones del estudio

La precisión de las simulaciones y análisis depende en gran medida de la calidad y disponibilidad de los datos utilizados. En algunos casos, la falta de datos detallados sobre la operación de los alimentadores y el comportamiento del BESS bajo condiciones específicas podría haber limitado la exactitud de los resultados.

Aunque los casos de estudio analizados proporcionan información valiosa, los resultados pueden no ser completamente generalizables a otros contextos geográficos o redes de distribución con características diferentes. Es necesario realizar estudios adicionales en diversas condiciones operativas y ambientales para validar los hallazgos en otros escenarios.

Las simulaciones generalmente se realizan bajo un conjunto limitado de escenarios operativos, lo que puede no reflejar todas las posibles condiciones a las que podría enfrentarse un sistema real. Esto podría limitar la capacidad de los resultados para predecir el comportamiento del BESS en situaciones no consideradas.

Los BESS representan una herramienta poderosa para mejorar la calidad del servicio eléctrico, especialmente en un contexto de transición hacia sistemas de energía más sostenibles y resilientes. La implementación estratégica y bien informada de estos sistemas puede transformar significativamente la gestión de redes de distribución en todo el mundo.

Recomendaciones

Es crucial desarrollar sistemas de monitoreo más robustos y detallados en las redes de distribución para mejorar la precisión de los modelos y simulaciones de BESS. Esto incluye la recopilación de datos en tiempo real sobre el comportamiento de la red y el rendimiento de los BESS bajo diversas condiciones operativas.

Se recomienda realizar estudios adicionales en diferentes regiones y bajo una variedad de condiciones climáticas y operativas. Esto ayudará a validar los resultados obtenidos y a expandir la comprensión de cómo los BESS pueden ser optimizados para distintas aplicaciones.

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en
alimentadores de distribución

Dado el éxito demostrado en la mejora de la calidad del servicio, se sugiere investigar la aplicación de BESS en otras áreas del sistema eléctrico, como la optimización del consumo energético en edificios, la gestión de microgrids, y el apoyo a la red en casos de emergencias o desastres naturales. Para facilitar la adopción de BESS en redes de distribución, se recomienda desarrollar políticas de incentivos y marcos regulatorios que promuevan su integración. Además, se debe considerar la capacitación de personal técnico y la colaboración con actores clave del sector energético para garantizar una implementación exitosa.

Referencias

1. Ahmadi, A., & Ahmadi, M. (2019). Battery energy storage in smart grid applications: Review and future perspectives. *Energy*, 188, 116050.
2. Al-Saedi, W., Lachowicz, S., Habibi, D., & Bass, O. (2013). Power flow control in grid-connected microgrid operation using particle swarm optimization under variable generation and load conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 49, 76-85.
3. Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglabe, A., & Rosehart, W. (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, 14(4), 302-314.
4. Butler, P., & Taylor, P. (2020). Enhancing the stability of distribution networks with battery energy storage systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115, 105435.
5. Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291-312.
6. Cagnano, A., Falvo, M. C., Genovese, A., & Siano, P. (2015). Integration of battery energy storage systems in distribution networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(3), 1538-1548.
7. Carrasco, J. M., Franquelo, L. G., Bialasiewicz, J. T., Galván, E., Guisado, R. C., Prats, M. A. M., León, J. I., & Moreno-Alfonso, N. (2006). Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(4), 1002-1016.
8. Castillo, A., & Gayme, D. F. (2014). Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey. *Energy Conversion and Management*, 87, 885-894.

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en
alimentadores de distribución

9. Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., & Villafáfila-Robles, R. (2012). A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2154-2171.
10. Divya, K. C., & Østergaard, J. (2009). Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research*, 79(4), 511-520.
11. González, A., Rincón-Mora, G. A., & Ló, F. J. (2005). A comprehensive review of lithium-ion battery modeling for power system applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12), 3907-3919.
12. Hassanzadeh, F., & Hosseini, S. (2017). Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks considering uncertainty in wind and load demands. *Renewable Energy*, 114, 1404-1414.
13. Hossain, M. S., Pota, H. R., Squartini, S., & Zaman, F. (2019). Overview of AC microgrid controls with inverter-interfaced generations: Topologies, control strategies, and future prospects. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 109, 160-186.
14. Hauer, K. H., & Sauer, D. U. (2018). Technologies and costs for large stationary battery energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 15, 145-157.
15. Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1221-1250.
16. Kondoh, J., Ishii, I., Yamaguchi, H., Murata, A., Otani, K., Sakuta, K., & Higuchi, Y. (2000). Electrical energy storage systems for energy networks. *Energy Conversion and Management*, 41(17), 1863-1874.
17. Li, Y., & Hiskens, I. A. (2015). Analysis of inverter-dominated microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(4), 1838-1847.
18. Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511-536.
19. Manz, D., Piwko, R., & Roose, L. (2012). Grid energy storage benefits and market opportunities. *IEEE Power and Energy Magazine*, 10(2), 20-27.
20. MacDonald, J. S., & Nguyen, H. T. (2015). Impact of battery energy storage on wind power dispatch in isolated grids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(3), 982-989.

Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para mejoras de la calidad del servicio eléctrico en
alimentadores de distribución

21. Poullikkas, A. (2013). A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 778-788.
22. Schoenung, S. M. (2011). Characteristics and technologies for long-vs. short-term energy storage. SAND2011-2082.
23. Souza, R. C. U. D., González-Quíñonez, L. A., Reyna-Tenorio, L. J., Salgado-Ortiz, P. J., & Chere-Quíñonez, B. F. (2024). Renewable energy development and employment in Ecuador's rural sector: an economic impact analysis. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(1), 464-479.
24. Terzic, B., & Sorrell, S. (2019). Cost-benefit analysis of battery energy storage systems in European distribution networks. *Energy Policy*, 134, 110944.
25. Teleke, S., Baran, M. E., Bhattacharya, S., & Huang, A. Q. (2010). Rule-based control of battery energy storage for dispatching intermittent renewable sources. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 1(3), 117-124.
26. Vazquez, S., Lukic, S. M., Galvan, E., Franquelo, L. G., & Carrasco, J. M. (2010). Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12), 3881-3895.
27. Wen, Z., Jiang, C., & Zeng, Z. (2017). Comparison of battery storage technologies for grid-scale energy storage: A review. *Energy Conversion and Management*, 79, 230-244.
28. Xu, B., Oudalov, A., Ulbig, A., Andersson, G., & Kirschen, D. S. (2016). Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 1131-1140.
29. Yang, Y., Bremner, S., Menictas, C., & Kay, M. (2018). Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 109-125.
30. Yao, L., Xue, Y., & Cheng, C. (2019). Optimal operation of microgrid with renewable generation and battery energy storage systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 107, 108-117.
31. Zakeri, B., & Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 569-596.

©2025 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/>).|