

Ciencia e Ingeniería

Revista Interdisciplinar de Estudios en Ciencias

Básicas e Ingenierías

ISSN 2389-9484

Año 2025, julio-diciembre, Vol. 12, N.º 2, e15708822

Facultades de Ciencias Básicas y Aplicadas e Ingeniería.

Universidad de La Guajira

La Guajira, Riohacha, Colombia

<http://revistas.uniguajira.edu.co/index.php/cei>

Este documento fue depositado en Zenodo. DOI:

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.15708822>

Para cita prefiera el ARK:

<https://n2t.net/ark:/60540/15708822>

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA: INFLUENCIA EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA LIMPIA

Energy Storage Systems: Influence on the Generation of Clean Energy

Dorielys Dayana López Castrillo<https://orcid.org/0000-0003-4727-7819>ddayanalopez@uniguajira.edu.co

Universidad de La Guajira, Riohacha, Colombia

Andrés Llerena Caro<https://orcid.org/0009-0002-8994-6064>allerena@uniguajira.edu.co

Universidad de La Guajira, Riohacha, Colombia

Andrés David Vides Prado<https://orcid.org/0000-0002-0435-9331>avidesp@uniguajira.edu.co

Universidad de La Guajira, Riohacha, Colombia

RESUMEN

La sociedad, la industria y los gobiernos han reafirmado su compromiso con la conservación del medio ambiente, respaldando la producción de energía a partir de fuentes limpias y renovables. Para garantizar la continuidad en el suministro de energía en este contexto, se requiere la implementación de sistemas de almacenamiento de energía, conocidos como BESS (Battery Energy Storage Systems). Este artículo explora la implementación de sistemas de almacenamiento como una estrategia complementaria para las energías renovables y la preservación del medio ambiente. Se presenta un enfoque cualitativo respaldado por una moderada revisión literaria. El documento analiza la estructura, propiedades y aplicaciones de los BESS, así como su influencia en la generación de energía renovable y sus perspectivas desde el punto de vista ambiental. Los resultados obtenidos resaltan que los BESS juegan un papel fundamental como elementos de respaldo y versatilidad, facilitando la aplicación de estrategias sostenibles en la generación y suministro de energía eléctrica. En conclusión, los BESS se consolidan como una alternativa técnica económicamente rentable y adaptable. Estos sistemas no solo complementan la generación renovable, sino que también se adaptan a la disponibilidad del recurso, garantizan un suministro eléctrico seguro y constante, mejoran la eficacia de las fuentes renovables y aportan equilibrio al sistema eléctrico de manera sostenible.

Palabras clave: BESS (sistemas de almacenamiento de energía en baterías); energías renovables; conservación del medio ambiente; estrategias sostenibles; sistema eléctrico.

ABSTRACT

Society, industry and governments have reaffirmed their commitment to environmental conservation, supporting the production of energy from clean and renewable sources. To guarantee continuity in the energy supply in this context, the implementation of energy storage systems, known as BESS (Battery Energy Storage Systems), is required. This article explores the implementation of storage systems as a complementary strategy for renewable energy and environmental preservation. A qualitative approach supported by a moderated literature review is presented. The document analyzes the structure, properties and applications of BESS, as well as its influence on the generation of renewable energy and its perspectives from an environmental point of view. The results obtained highlight that BESS play a fundamental role as support and versatility elements, facilitating the application of sustainable strategies in the generation and supply of electrical energy. In conclusion, BESS are consolidated as an economically profitable and adaptable technical alternative. These systems not only complement renewable generation, but also adapt to the availability of the resource, guarantee a safe and constant electricity supply, improve the efficiency of renewable sources and provide balance to the electrical system in a sustainable way.

Keywords: BESS (Battery Energy Storage Systems); renewable energy; environmental conservation; sustainable strategies; electric system.

Recibido: 30-05-2024

Aceptado: 03-03-2025

Publicado: 01-07-2025



INTRODUCCIÓN

La producción de energía eléctrica a través de fuentes renovables ha experimentado un aumento significativo para hacer frente a la creciente demanda energética. Sin embargo, uno de los desafíos asociados con estas fuentes es su variabilidad, especialmente en lo que respecta al recurso eólico y solar. Las fluctuaciones en la velocidad del viento y la radiación solar generan interrupciones en la producción, lo que afecta la estabilidad de la red eléctrica y puede poner en peligro el suministro energético. Para abordar este problema, la integración de sistemas de almacenamiento de energía, conocidos como BESS (Battery Energy Storage Systems), con las plantas generadoras de energía renovable, se ha destacado como una solución técnicamente viable, implementándose como una de las soluciones más destacadas por su capacidad de contribuir a la estabilidad de frecuencia y voltaje en un sistema eléctrico (Chamba et al., 2022).

Los sistemas de generación de energía pueden dividirse en fuentes de energía no renovables (Energía térmica de combustibles fósiles y energía nuclear), fuentes de energía renovable (hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica y biomasa) y fuentes de energía emergentes o experimentales (energía de las olas y mareas, energía de corrientes marinas, y energía de fusión). La generación con fuentes de energía renovable está directamente ligada a la disponibilidad y variabilidad del recurso primario. Por ello, la tarea coordinada de mantener la relación entre la generación y la demanda se transforma en un parámetro difícil de regular, especialmente en el caso de la energía solar y eólica. Dada estas condiciones, es importante optimizar la disponibilidad del recurso en los momentos en que la demanda energética del sistema no requiere la inyección de potencia; para ello, es de suma importancia conservar la energía que excede a la demanda en determinado momento, para luego ser devuelta al sistema según las necesidades.

Los sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS, por sus siglas en inglés) son celdas recargables que almacenan y suministran energía eléctrica a través de reacciones químicas internas. Sus características clave incluyen la capacidad de carga y descarga, la capacidad total de almacenamiento de energía, la densidad energética y continuidad, que se refiere al número de ciclos de recarga que pueden soportar antes de presentar fallas. Estas propiedades están determinadas por las características de los materiales y componentes utilizados en su fabricación (Chamba et al., 2022).

Fernández (2019) demuestra que los sistemas de almacenamiento en baterías tienen la capacidad de compensar las variaciones en la generación de energía, asegurando así un suministro constante. De esta manera, pueden satisfacer la creciente demanda diaria de electricidad. Los sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) son efectivos para cumplir con requisitos de corta duración, ya que pueden ayudar a controlar la frecuencia y servir como reserva de energía. Como complemento en el sistema eléctrico, estos sistemas pueden desempeñar múltiples funciones para gestionar los recursos de manera eficiente. Collaguazo (2020) indica que, debido al aumento en la generación de electricidad distribuida y variable (como la eólica y solar), junto con el incremento de clientes y distancias de transmisión, la carga del sistema aumentará y su operación se volverá menos segura. En este contexto, los BESS pueden proporcionar desde soporte para la calidad de energía a corto plazo hasta gestión de energía a largo plazo, realizando diversas aplicaciones con un solo dispositivo.

Por otro lado, Oikonomou et al. (2017) señalan que el potencial de los BESS en Estados Unidos ha captado el interés de legisladores y reguladores tanto a nivel estatal como federal. La capacidad total de los BESS supera los 23 GW, de los cuales el 94% corresponde a sistemas hidroeléctricos de bombeo y el 6% restante a sistemas electroquímicos, como baterías de iones de litio, níquel-cadmio y azufre sódico. Según Parada (2018), en Chile, los sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) tienen diversas

aplicaciones en el sector energético, adaptándose a diferentes usos y segmentos. En el ámbito de la generación, se utilizan para arbitraje de energía, seguimiento de carga, integración de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) y Servicios Complementarios (SSCC). En el sector de transmisión, contribuyen a aliviar congestiones y a posponer inversiones. En el área de distribución, también permiten posponer inversiones, ofrecer SSCC, mejorar la seguridad y gestionar recursos energéticos distribuidos. Además, fuera del sistema interconectado, los BESS encuentran aplicaciones en microrredes, proporcionando respaldo de suministro a industrias y a consumos que no pueden ser interrumpidos.

En Colombia, las zonas rurales carecen de una red eléctrica que transporte la energía desde el sistema interconectado nacional. El gobierno ha optado por utilizar energías renovables, cómo lo menciona Banguero. et al., (2020) los avances del mercado de las energías renovables están propiciando la sustitución de generadores convencionales (Diesel) por sistemas fotovoltaicos autónomos o generadores renovables híbridos. En estos casos, la tecnología más utilizada para almacenar energía son los BESS. En aplicaciones fuera de la red, el almacenamiento de energía es un componente crucial para garantizar la confiabilidad de los sistemas autónomos de energía renovable.

A partir de lo anterior, este artículo pretende analizar en una estructura resumida los BESS, su influencia en la generación de energías limpias, propiedades, aplicaciones y perspectivas desde el punto de vista ambiental, para tal fin se analizan publicaciones de autores más representativos en el contexto global y nacional, para lo cual se consultó literatura especializada disponible en bases de datos académicas como Google académico, ScienceDirect, IEEE Xplore, Scielo y Scopus.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este artículo se sustenta en el enfoque de investigación cualitativa que sugiere un proceso que requiere la recolección de datos sin medición numérica (Hernández, Fernández y Baptista, 2010), mientras que para Blasco y Pérez (2007) se centra en estudiar la realidad en un contexto natural y tal como sucede, sacando e interpretando fenómenos de acuerdo con los objetos implicados. Además, este trabajo se apoya en la revisión literaria que para Guairao (2015) es un paso previo que se da antes de realizar una investigación. La revisión bibliográfica vincula al conocimiento de un tema y es en sí la primera etapa del proceso de investigación porque ayuda a identificar qué se sabe y qué se desconoce de un tema de interés. La revisión bibliográfica es una sinopsis que vinculan diferentes investigaciones y artículos para mostrar una idea sobre el estado actual de la cuestión a investigar.

En concordancia con lo anterior, se toma el enfoque cualitativo y la investigación de revisión literaria, se tomó información sobre los sistemas de almacenamientos de energía, su influencia en las energías limpias y la integración de estos sistemas en las energías renovables; mediante base de datos como Google académico, Scielo, IEEE Xplore y sciencedirect; con un total de 36 artículos tomados como referencia para llevar a cabo la revisión sistemática cualitativa.

GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Un BESS es un tipo de sistema que utiliza una disposición de baterías y otros equipos eléctricos para almacenar energía eléctrica (Conzen et al., 2023), para Parada (2018) son un conjunto de tecnologías que presentan diversas características técnicas que fundan una variedad de aplicaciones que permiten mejorar la operación técnica y económica de los sistemas eléctricos. Dariusz et al., (2023) expresa que los BESS son un elemento importante de los sistemas de energía debido al creciente nivel de penetración de las fuentes de energía renovable (FER). Según los autores Bautista et al., los BESS se puede entender como un subsistema de amortiguamiento, que permite el balance entre la generación y la demanda, lo cual generalmente se logra mediante un sistema de gestión de baterías. Por otro lado, Maraboli (2019) sustenta que los BESS, son sistemas que son cada vez más utilizados en la industria energética para contrarrestar la variabilidad e incertidumbre de centrales de generación, el autor resalta la importancia de dichos sistemas en la industria energética y por ende en la economía debido a que en cierta parte del concepto se enfoca en las centrales de generación de energía.

En este sentido, los BESS representan uno de los principales componentes de la modernización del sistema eléctrico que proporciona varios servicios para mejorar la confiabilidad y la resiliencia de la red eléctrica (Oikonomou et al., 2017).

TIPOS DE BESS

Almacenamiento Por Concentración Solar Térmica

La tecnología solar fotovoltaica es la más conocida y difundida en todo el mundo, al generar energía a gran escala aprovechando la radiación solar, por otro lado, la irradiación también puede ser utilizada como fuente para generar energía térmica, donde se calienta un fluido a temperaturas elevadas y a través de transferencia de calor calienta al fluido de trabajo o fluido caloportador que generalmente es agua.

Existen varios tipos de batería que puede servir para estos fines. En los sistemas fotovoltaicos se usa comúnmente las baterías de plomo-ácido.

Planta solar tipo colector cilindro parabólico: Este tipo de generación de energía se realiza mediante un colector de energía solar térmica, mediante un cilindro parabólico, está construido como un espejo parabólico a lo largo, con un tubo receptor recorriendo su extensión en el punto focal. La luz solar incide en el espejo y después es reflejada y concentrada en el tubo receptor y por el interior del tubo colector recorre el fluido, para luego realizar la transferencia de calor con otro fluido, generalmente agua desmineralizada, es llevado a temperaturas y presiones de vapor sobrecalentado para luego ser expandido en una turbina de vapor mediante el ciclo Rankine. En estos sistemas el almacenamiento térmico se configura a través de un tanque de almacenamiento de sales fundidas o permanentes, cuando no tiene la radiación solar en horas nocturnas se utilizan las sales fundidas de los tanques de almacenamiento para realizar la transferencia de calor y generar energía, en la actualidad hay plantas donde la autonomía del almacenamiento térmico va de 6 a 10 horas.

Planta de receptor torre central: La presente tecnología utiliza grandes cantidades de espejos para poder reflejar a la parte superior de la torre central, donde la radiación solar es capturada para calentar el fluido de trabajo que viene a ser agua desmineralizada y luego es convertido en vapor sobrecalentado a grandes presiones para abastecer a las turbinas de vapor y así poder generar energía eléctrica. El almacenamiento de energía en este tipo de central viene a ser el tanque de sales fundidas, cuando no se tiene la radiación

solar se utiliza el fluido del tanque de almacenamiento para poder calentar el fluido de trabajo (Gonzales, 2022).

Almacenamiento electroquímico

El almacenamiento electroquímico se encuentra referido al almacenamiento en baterías, en este contexto se analizan las siguiente:

Baterías clásicas: Son aquellas que se encuentran constituidas por dos o más celdas electroquímicas que utilizan reacciones del tipo químico para crear un flujo de electrones en un circuito externo, es decir, corriente eléctrica. Se considera un tipo de tecnología en una fase de uso extendido a nivel mundial y con una gran variedad de materiales con distintas bondades cada uno, entre las principales se tienen a las de litio, sodio y níquel.

Baterías de flujo: Son el resultado de la combinación de las baterías clásicas o convencionales con las pilas de combustible, la característica principal es que permiten separar la energía de la potencia, la energía se almacena en los denominados electrolitos (positivo y negativo), la potencia de la celda es directamente proporcional al tamaño de los electrodos. Entre las más desarrolladas se tiene a la de Vanadio y las de Zinc-Bromo. Su nivel de desarrollo aun es menor al de las baterías clásicas (Gonzales, 2022).

Almacenamiento químico

Es el almacenamiento de la energía en enlaces químicos, gracias al uso de energía eléctrica, y que a futuro pueda ser extraída cuando se necesite, los cuales se clasifican en hidrogeno, amoníaco y sistema de almacenamiento de biocombustibles.

Hidrógeno: El hidrógeno es una sustancia que almacena energía, no es una fuente de energía primaria, quiere decir que almacena energía en sus enlaces y que se libera posteriormente. Normalmente, según la materia prima empleada, se le asigna un color, nosotros describiremos el hidrógeno verde, el cual se obtiene por electrólisis, mediante electricidad. El proceso de obtención consiste en emplear corriente eléctrica continua a fin de separar la molécula de agua en hidrogeno y oxígeno.

El hidrógeno (verde o descarbonizado), se plantea como un nuevo combustible de transición, que complementaría a las energías renovables en los sistemas de energía del futuro, gracias a su capacidad para sustituir el gas a corto plazo en los procesos industriales que requieren altas temperaturas y a su contribución al almacenamiento, permitiendo ampliar las opciones de movilidad sostenible (IRENA, 2019). Entre los electrolizadores más empleados están los PEM (Protón Exchange Membrane) y alcalinos. Existen electrolizadores que están en desarrollo como de óxido sólido y que tiene ventajas como eficiencia. Una vez obtenido el hidrógeno, puede ser almacenado físicamente por compresión, licuado o crio comprimido. El hidrogeno encuentra una gran variedad de aplicaciones, actualmente se viene usando en una mezcla baja con el gas natural para ser transportado por tubería y ser empleado sobre todo en movilidad.

Es así como se propone al H₂ como una alternativa competitiva frente a los combustibles de origen fósil, además, se utilizará el denominado H₂ verde, es decir, aquel producido a partir de energías renovables. El uso de estas energías es indispensable para un crecimiento sustentable y desempeña un papel clave para reducir las emisiones de carbono. Para la obtención del gas se recurrirá a la tecnología de electrólisis PEM (Polymer Electrolyte Membrane), la cual utiliza agua pura como materia prima y logra una pureza del 99,99%. La energía eléctrica necesaria será tomada de la red, procurando utilizar la obtenida a partir de

fuentes renovables. A partir del proceso de electrólisis, también se obtiene Oxígeno. Una parte de este subproducto será almacenada a presión y comercializada, mientras que el resto será venteado a la atmósfera. El término LOHC incluye todos los sistemas de almacenamiento de H₂ que son líquidos en condiciones de presión y temperaturas normales, siendo sus propiedades similares a las del crudo de petróleo (Calvetti et al., 2020).

Amoníaco: El amoníaco se obtiene generalmente de fertilizantes. Para dicho fin, se requiere nitrógeno, obtenido por licuefacción del aire, el cual requiere una cantidad importante de electricidad. Para la obtención del amoníaco se requiere entre 7% y 18% de energía equivalente contenida en el hidrógeno. Su almacenamiento puede ser realizado por medio de las tuberías y equipos ya existentes. Es importante mencionar que dicha manipulación requiere precauciones por lo tóxico, inflamable y corrosivo (Gonzales, 2022).

Sistema de almacenamiento de biocombustibles: La biomasa se puede utilizar tanto para el almacenamiento como para la producción de electricidad. En esta era de crisis energética, se requiere restringir el uso de gases de efecto invernadero. La necesidad de nuevos tipos de componentes de gasolina, que no se extraigan de la materia prima del petróleo se vuelve importante. La biomasa se puede convertir directamente en combustible. Los biocombustibles comunes son el etanol y el biodiesel. Estas son las opciones para la sustitución de combustibles existentes (Mishra et al., 2022).

Almacenamiento eléctrico por supercondensadores: Los ultra condensadores o supercondensadores, son muy diferentes a los condensadores convencionales debido a que tienen un área de placa más grandes y las distancias entre placas son más cortas. Los condensadores convencionales presentan dos placas cubiertas por un material metálico poroso para un área de almacenamiento de carga más grande, separadas por una película plástica gruesa o dieléctrico cerámico. Cuando el condensador está cargado, se crea un campo eléctrico a partir de 2 placas en una carga positiva y en otra negativa. Esto luego polariza el dieléctrico y alinea las moléculas en la dirección opuesta del campo, reduciendo su fuerza y permitiendo que las placas almacenen más carga (Gonzales, 2022).

Almacenamiento energético con bombeo hidráulico: Se trata del almacenaje de energía a través del bombeo de agua desde un reservorio inferior o río hasta un reservorio superior. Para que la tecnología de almacenamiento sea eficiente, la diferencia de cotas entre los dos reservorios deberá ser al menos de 100 metros. Utilizando la energía eléctrica, se eleva el agua del reservorio inferior o río al superior realizándose en horas fuera de punta (HFP), cuando la demanda de energía sea menor; de esta manera se usa la energía sobrante para hacer operar la turbina y subir el agua al nivel superior y almacenar la energía en los reservorios. En el día, la demanda de energía es mayor, por la cual la central hidroeléctrica actúa como una convencional, el agua del reservorio superior baja por la tubería de conducción hasta la casa maquinas donde están las turbinas, generadores y los transformadores que transforman la energía mecánica a eléctrica, y a través de las líneas eléctricas de transmisión es transportada a los usuarios finales, viviendas e industrias (Gonzales, 2022).

Almacenamiento energético con aire comprimido (CAES)

Es el almacenaje de energía generada en un instante para su utilización en otro periodo a través de aire comprimido. La aplicación a pequeña escala ha sido utilizada en la propulsión de locomotoras de mina y las aplicaciones a gran escala conservan la energía térmica agrupada con aire comprimido; la pérdida de calor disminuye la eficiencia de energía de la tecnología de almacenamiento con aire comprimido. La tecnología

del sistema de almacenamiento CAES, tiene entre sus principales características la viabilidad económica, densidad de energía y la flexibilidad de su sistema (Gonzales, 2022).

El almacenamiento con batería inercial: El almacenamiento con batería inercial (conocida como batería volante), es una forma de acumular la energía de manera cinética, para la cual se utiliza un volante de inercia. De acuerdo con el enunciado se ha desarrollado y diseñado un tipo de almacenamiento energético empleando un rotor cilíndrico con rodamientos magnéticos, que giran a gran velocidad. La acumulación de la energía cinética, a través de una batería inercial es en base al fundamento de masa rotatoria. la energía en una batería inercial se acumula de manera cinética rotacional. La entrada de energía comúnmente se capta de una fuente eléctrica que viene de una red del sistema eléctrico, se enciende y acelera la batería inercial a medida que acumula energía y se va parando lentamente debido a la descarga, con la finalidad de despachar la energía almacenada. La cantidad de energía acumulada en una batería inercial depende de la masa, material y modelo del rotor.

La tecnología con batería inercial dispone de un mayor tiempo de vida útil y desarrolla mayores ciclos en su operación. En la actualidad, los equipos de almacenaje varían en su capacidad de energía desde unos kW-hora hasta cientos de kW-hora, en su gran mayoría se utiliza para niveles de alta potencia como el arranque de energía frente una interrupción o la compensación imprevista de potencia por pérdida de energía (Gonzales, 2022).

Según Lechón et al., 2023 existen varias tecnologías para almacenar electricidad. Los sistemas hidráulicos de bombeo (PHS) son el sistema de almacenamiento más utilizado en todo el mundo, alcanzando el 96% de la capacidad total (197 GW) en 2017. A los PHS les siguen los sistemas de almacenamiento térmico con una capacidad de 3,3 GW, las baterías con 1,9 GW y otros sistemas de almacenamiento mecánico con 1,6 GW (volantes de inercia- 0,9 GW y almacenamiento de energía por aire comprimido o CAES-0,6 GW). En la tabla 1 se presentan los sistemas de almacenamiento más usados a nivel mundial.

Tabla 1. Sistemas de almacenamiento más utilizados a nivel mundial.

Sistemas de almacenamiento más utilizado a nivel mundial.	
Nombre	Capacidad (GW)
Almacenamiento hidráulico por bombeo	197 GW
Almacenamiento Térmico	3,3 GW
Almacenamiento electroquímico	1,9 GW
Almacenamiento por aire comprimido	1,9 GW

BESS Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES (SOLAR Y EÓLICA)

Las baterías operan almacenando la energía y son una de las tecnologías más disponibles en el mercado, con una de las mejores relaciones costo-efectividad, funcionan conectadas en conjunto de serie/paralelo para cumplir con requisitos de voltaje/corriente. Un convertor las une con la red eléctrica y un controlador es usado para cargarlas durante horas de poca demanda y/o bajo costo de la energía. Las baterías Lead-Acid son las más implementadas hasta ahora, son de bajo costo, poseen baja densidad de energía y limitada vida útil. Otras como Nickel-Cadmium, Sodium Sulfur, Vanadium Redox, Lithium Ion y Sodium Nickel Chloride han sido empleados, pero en menor medida. Los estudios actuales se centran en investigar el incremento

la densidad de energía, mejorar la vida útil y la eficiencia mientras se mantiene el bajo costo, el objetivo es aumentar su viabilidad.

Por otra parte, algunos BESS son empleados para mejorar la controlabilidad y el flujo de potencia del sistema eléctrico, mejorar el perfil de voltaje y suavizar la potencia de salida de renovables. Algunas empresas las implementan para mejorar el factor de potencia, mejorar la salida de plantas solares, control de voltaje y frecuencia (Mejía & Londoño, 2011). Los BESS tienen una influencia significativa en el desarrollo y la implementación de energías renovables. Su integración con fuentes de energía renovable tiene múltiples impactos positivos en la forma en que se generan, distribuyen y consumen energías limpias. Aquí hay algunas maneras en que los BESS influyen en las energías renovables:

1. Mitigación de la variabilidad y la intermitencia: Las fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, son inherentemente intermitentes debido a las condiciones climáticas cambiantes. Los BESS pueden almacenar el exceso de energía producida durante períodos de alta generación y liberarla cuando la producción es baja, suavizando así las variaciones y permitiendo una oferta de energía más constante y predecible.
2. Mejora de la capacidad de entrega constante: La combinación de BESS con energías renovables puede convertir la energía intermitente en una fuente de energía confiable y constante. Esto es esencial para garantizar la estabilidad de la red eléctrica y satisfacer la demanda continua de energía.
3. Maximización del autoconsumo: En sistemas solares fotovoltaicos residenciales, los BESS pueden almacenar el exceso de energía generada durante el día para su uso en la noche, lo que aumenta la tasa de autoconsumo y reduce la dependencia de la red eléctrica.
4. Suministro en horarios pico: En regiones donde la demanda eléctrica es más alta en ciertos momentos del día, los BESS pueden liberar energía almacenada durante estos períodos de alta demanda para reducir la necesidad de encender plantas de generación costosas y menos eficientes.
5. Microrredes y sistemas aislados: En áreas remotas o aisladas, los BESS pueden integrarse con sistemas solares o eólicos para proporcionar una fuente constante de energía, incluso cuando las condiciones climáticas son desfavorables.
6. Estabilización de frecuencia y respuesta a la demanda: Los BESS pueden proporcionar servicios de estabilización de frecuencia y respuesta rápida a la demanda, lo que contribuye a mantener el equilibrio en la red eléctrica y responder a cambios repentinos en la demanda o la oferta.
7. Almacenamiento comunitario: Los BESS pueden instalarse en comunidades o vecindarios donde múltiples hogares comparten la energía generada por sistemas solares o eólicos, lo que permite una distribución eficiente y equitativa de la energía.

La integración de sistemas de almacenamiento de energía en baterías con energías renovables es una estrategia clave para avanzar hacia un sistema eléctrico más sostenible, confiable y eficiente. Estas soluciones ayudan a superar los desafíos asociados con la variabilidad inherente de las fuentes de energía renovable y contribuyen a la transición hacia una matriz energética más limpia (Ju & Sanches, 2022).

LOS BESS Y EL MEDIO AMBIENTE

En esta sección se analizan los sistemas descritos anteriormente desde el punto de vista ambiental, en tal sentido las baterías comerciales de ion-litio empleadas en proyectos BESS utilizan cátodos con cobalto, un metal raro extraído en países donde el trabajo infantil es usual. En cuanto a la eficiencia del uso de los recursos y prevención de la contaminación con relación a los gases de efecto invernadero (GEI) los BESS generan emisiones de gases como NO_x, SO_x y CO_x asociados con el uso de maquinaria y vehículos especializados durante la fase de construcción.

En cuanto a las baterías de Li-S se consideran que tienen un menor impacto ambiental debido al uso del azufre, que es un elemento relativamente abundante en la Tierra, también es residuo en muchos procesos industriales, con lo cual puede ser reutilizado. El azufre no presenta un destacado impacto ambiental ni toxicidad, es relativamente barato. No obstante, esta ventaja potencial no se evalúa plenamente en la mayor parte de la bibliografía disponible sobre esta tecnología (Benveniste, 2021). Por su parte, las baterías de Li-ion NMC podrían considerarse como la tecnología de Li-ion menos contaminante (Hawkins et al., 2012; Hawkins et al., 2013) y que se utiliza generalmente en la mayoría de los modelos eléctricos.

Por último, los componentes de la batería deben reciclarse para garantizar un bajo impacto ambiental y preservar los recursos naturales. Se pueden restaurar o reutilizar partes o todas las instalaciones. Algunos expertos (Martínez, 2019). han analizado el mercado de almacenamiento de baterías y su capacidad para integrar energía renovable, sin embargo, indican la necesidad de abordar a profundidad la sostenibilidad de las baterías (Martínez, 2019).

Según Benveniste (2021) existen tres hechos en que la comunidad científica, en su inmensa mayoría, coincide: 1) La concentración de GEI en la atmósfera terrestre está directamente relacionada con la temperatura media de la Tierra, 2) Esta concentración ha ido aumentando progresivamente desde la Revolución Industrial y, en mayor medida, tras la 2ª Guerra Mundial y, con ella, la temperatura del planeta, 3) Los GEI más abundante, alrededor de dos tercios de todos los tipos de GEI, es el dióxido de carbono (CO₂) que resulta de la quema de combustibles fósiles.

Por lo tanto, es de importancia manifestar el desarrollo de acciones que tengan como objetivo la reducción drástica e inmediata de las emisiones de GEI, pasando por cambios sistémicos transversales que afecten la generación de energía, el sistema productivo, el consumo y la movilidad. En muchos de estos campos los BESS pueden emplearse en sistemas eficientes y sostenibles que reduzcan los aportes de GEI a la atmosfera, por lo cual es importante su implementación en la generación de energías limpias.

Investigadores como Wigger et al., (2023) precisan que el uso de menos capacidades de batería no solo reduce los costos potenciales de factor de carga de refinación (FCR) de los BESS, sino también las posibles implicaciones ambientales relacionadas con el ciclo de vida completo del producto. En particular, varios estudios de evaluación del ciclo de vida (ACV) señalaron la relevancia de los materiales utilizados en los BESS de iones de litio (LIB), que predominantemente son níquel, manganeso y cobalto, así como el litio. La reducción de la capacidad de las baterías disminuiría la cantidad de materiales utilizados y, con ello, los impactos ambientales potenciales relacionados con la alta demanda de energía y agua para la extracción de materias primas y la producción de celdas de baterías.

Los BESS también pueden generar problemáticas asociadas a los manejos de fallas del sistema, la industria considera actualmente códigos y estándares para la instalación de BESS y exigen análisis de mitigación de riesgos para esos sistemas. Conzen et al., 2023 evidencia que en el año 2017 se reportaron al menos 27 incendios de BESS en Corea del Sur, otros 23 se registraron en 2018 y por ese motivo el Ministerio de

Industria de Corea del Sur formó un comité para investigar durante cinco meses estos eventos, como resultado se dispuso un informe publicado en 2019 que describe los factores clave que contribuyeron a la alta frecuencia de incendios: Falta de sistemas de protección de baterías para identificar y detener cortocircuitos, Gestión insuficiente del entorno operativo (p. ej., polvo, humedad, cambios de temperatura), Mala calidad de instalación y falta de sistemas integrados de monitoreo y control de BESS.

En el estudio realizado por Alshafi & Bicer (2021) sobre el ACV para analizar y comparar el impacto ambiental de los BESS basados en Flujo Redox, Aire comprimido y sales fundidas, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Comparación de los impactos ambientales de los BESS.

Categoría de impacto BESS	Batería de flujo Redox	Aire comprimido	Sales fundidas
Calentamiento global kg CO ₂ eq. /kWh	0,121	0,117	0,0146
Acidificación Kg SO ₂ eq. /kWh	0,000273	0,000391	0,0000258
Agotamiento de la capa de ozono kg R11 eq. /kWh	4,38 x 10 ⁻¹⁰	5,62 x 10 ⁻¹³	2,84 x 10 ⁻¹⁰
Toxicidad humana kg DCB eq. /kWh	2,34	0,0528	0,00312
Ecotoxicidad acuática- Marina. kg DCB eq. /kWh	2,21	36,7	0,965

Fuente: Alshafi & Bicer (2021).

En relación con la categoría de calentamiento global las Batería de flujo Redox con 0,121 kg CO₂ eq/kWh son las que aportan mayor impacto ambiental teniendo en cuenta que los tres componentes principales responsables del calentamiento global son los buques portacontenedores, la calefacción urbana y la electricidad fotovoltaica. En la categoría de impacto de agotamiento de la capa de ozono el aire comprimido representa un mayor impacto con un valor de 5,62x¹⁰⁻¹³ kg R11 eq/kWh, en este caso destaca que la producción de acero causa graves impactos ambientales, incluido el monóxido de carbono como emisiones al aire que deteriora la capa de ozono estratosférica.

El potencial de toxicidad humana es una categoría muy importante, ya que durante la fabricación de las baterías se emplean muchos productos químicos tóxicos. Para Alshafi & Bicer (2021) la mezcla de láminas de cobre utilizada para fabricar baterías representa la mayor parte del impacto. El sistema de batería de flujo redox representa casi el 100% del impacto total, equivalente a 2,34 kg DCB eq/kWh. La exposición prolongada al cobre provoca irritación de la nariz, los ojos o la boca; por lo tanto, podría causar mareos, dolores de cabeza, dolores de estómago, etc.

BESS- PARA LA INTEGRACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

Los BESS son tecnologías que encaminan a un futuro sostenible de la mano con las energías renovables, debido a que estas tienen la capacidad de capturar energías de diferentes fuentes y almacenarlas en un sistema complejo proporcionando servicios y optimizando la energía de las fuentes. La integración de los BESS a las energías renovables permite la implementación de estos sistemas energéticos en las energías limpias, logrando un desarrollo energético sostenible. La demanda de energía cada día es más exigente, por este motivo el almacenamiento energético es una pieza fundamental para integrar las energías renovables en el sistema eléctrico.

Según Chunyang, et al., (2023) los BESS se ha aplicado ampliamente para proporcionar servicios de red, como regulación de frecuencia, soporte de voltaje, arbitraje de energía, etc. Se implementan algoritmos avanzados de control y optimización para cumplir con los requisitos operativos y para preservar la vida útil de la batería; sin embargo, Dariusz et al., (2023) describe que la función principal de los BESS es la maximización de la rentabilidad del sistema mediante el cambio de energía. Esto permite aumentar la capacidad de la instalación a pesar del límite de potencia de conexión y mejora los ingresos del sistema al vender energía en el DM en momentos con precios más altos.

En contraste, para Medina (2021) los usos de los sistemas de almacenamiento de energía a pesar de su antigua existencia (principios del siglo XX), su aplicación no ha sido muy significativa por los altos costos que supone su instalación, pero a su vez recalca que la integración de las ERNC se está convirtiendo en una tecnología que facilita la flexibilidad necesaria para la integración de las mismas y que existen muchas alternativas para implementarlas, sin embargo, las baterías se están convirtiendo en los sistemas de almacenamiento por excelencia debido a la gran cantidad y variedad de servicios que ofrece.

Esta creciente influencia para Salguero (2019) se debe a que el almacenamiento en baterías posee una serie de características deseables que incluyen operación libre de contaminación, alta eficiencia de carga y descarga, características flexibles de potencia y energía para cumplir con diferentes funciones de red, larga vida útil (mientras se siga las indicaciones del fabricante) y bajo mantenimiento. También afirma que este sistema es uno de los mejores para la integración de recursos renovables, debido a su pequeño tamaño que a su vez proporcionan control de frecuencia para reducir variaciones en la producción energética y para mitigar las fluctuaciones de producción de estas.

En cuanto a la relación BESS medio ambiente es común analizar el impacto ambiental sólo en relación con las emisiones (GEI) tomando como indicador clave los kg de CO² equivalente emitidos, pero hoy en día, la mayoría de los estudios ambientales valoran categorías de impacto adicionales, como el potencial de agotamiento de los materiales, la toxicidad y el agotamiento de los recursos fósiles, entre otros. Por otro lado, Zackrisson et al., (2010) y Casals et al., (2017) afirman que el impacto ambiental de las baterías de Li-ion reales es responsable de casi la mitad del impacto ambiental total de la fabricación de los vehículos, lo cual depende fuertemente del sistema eléctrico del país donde se utilizan las y de la vida útil de la batería. Lechón et al., (2023) dan su aporte sobre el impacto ambiental de los BESS en términos de emisiones de GEI y sostienen que el almacenamiento mecánico, especialmente el almacenamiento por bombeo y el almacenamiento de energía por aire comprimido adiabático, son las tecnologías con las menores emisiones de GEI. La energía solar térmica parece ser la opción que menos GEI genera para el almacenamiento de energía durante unas horas, seguida de las baterías con emisiones de GEI que oscilan entre 80 y 59 kgCO₂eq/MWh. En esta categoría, el uso de almacenamiento de energía electrotérmica causaría las mayores emisiones de efecto invernadero. En relación al uso de sistemas de almacenamiento con regulación de

frecuencia y voltaje, las baterías en general y las de iones de litio en particular serían las opciones con menores emisiones de gases de efecto invernadero.

Los BESS se analizan como posibles soluciones técnicas para la producción de servicios de equilibrio, ya que pueden armonizar las desviaciones a corto y largo plazo (es decir, estacionales) en la oferta y la demanda de energía. Wigger et al., (2023) describe que la batería de iones de litio (LIB) se caracteriza técnicamente por tiempos de respuesta rápidos, alta densidad de energía y eficiencia, lo que hace que un sistema de almacenamiento de energía de batería estática (BESS) sea particularmente adecuado para servicios públicos, equilibrio ultrarrápido, como reserva de competencia de frecuencia. (FCR).

Desde otra perspectiva, disponer de un sistema de generación que involucre diferentes tecnologías contribuye a la seguridad energética de las naciones, la Figura 1 se muestra la participación en el mercado de generación de energía eléctrica de las diferentes fuentes primarias de generación en la zona sur del país de Perú, se observa el predominio de la generación de energía por centrales hidroeléctricas y termoeléctricas teniendo las energías renovables no convencionales (ERNC) eólicas y solar un 5% de participación.

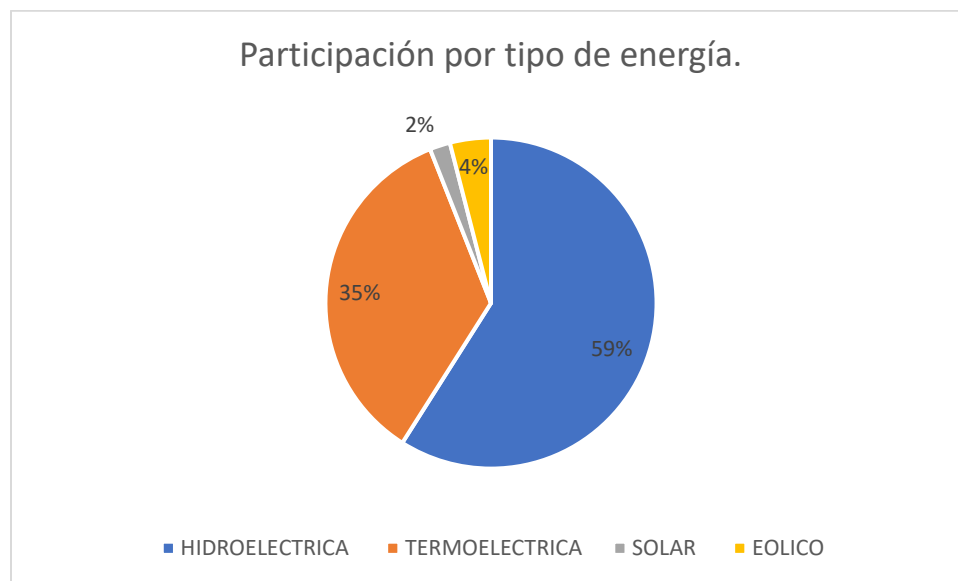


Figura 1 Participación por tipo de generación de energía.
Fuente: Baquerizo et al, 2022.

Si el gobierno promueve la inversión en ERNC puede aumentar la participación en el mercado eléctrico, debe valorar que las centrales térmicas e hidroeléctricas son las encargadas de responder ante las fluctuaciones de la demanda y proporcionan reserva rotante para la regulación primaria de frecuencia (RPF) y la regulación secundaria de frecuencia (RSF), en ese aspecto, la integración de mayor potencia instalada de la tecnología ERNC, exigiría una mayor flexibilidad en el sistema eléctrico.

Los BESS permiten al sistema energético ser flexible debido a que el desarrollo de estos sistemas y de redes eléctricas sostenibles son esenciales para mejorar la eficiencia del sistema eléctrico con un aplanamiento de la curva de demanda y evitar vertidos energéticos indeseados en momentos de bajo consumo, un claro ejemplo de esto sería la reacción rápida de las baterías en tensión y la disposición de la energía que se produce cuando sea necesitada y para el desarrollo de redes inteligentes que sean capaces

de integrar de forma predictiva, comportamientos y acciones de los usuarios eliminando pérdidas y aumentando la calidad de la energía (Gonzales, 2022).

CONCLUSIONES

El uso de la energía eléctrica para un futuro sostenible requiere de fuentes renovables de energía, en este sentido se puede concluir que los BESS son unos subsistemas de amortiguamiento que permite el balance entre la generación y la demanda de energía. En el contexto de transición energética y la integración de ERNC, los BESS toman relevancia dentro de la sostenibilidad energética y se enfrenta al reto medio ambiental de las energías limpias y el desarrollo sostenible.

Los BESS influyen de manera positiva en las energías limpias debido a que resultan útiles y son los más usados para la acumulación energética aportando cualidades que fortalecen los sistemas eléctricos, aportando también al cumplimiento de objetivos ambientales. Los BESS pueden aportar a la sostenibilidad debido a que son mucho más que batería, están compuestos, entre otros elementos, por un inversor bidireccional que conecta la batería a una fuente eléctrica permitiendo que la batería pueda cargarse y suministrar la energía cuando sea necesario. Los BESS, surgen en respuesta a la necesidad de sincronizar oferta y demanda de energía, tienen la capacidad de mejorar la eficiencia y la economía del generador debido a que no tienen carga mínima asegurando que siempre habrá energía disponible para cumplir con los requisitos máximos para un sistema de potencia.

En las categorías de impactos los sistemas de almacenamiento de flujo redox tienen el mayor aporte en el calentamiento global en relación con los otros dos sistemas analizados (aire comprimido y almacenamiento de energía térmica en sales fundidas). En la contribución del potencial de agotamiento de la capa de ozono el sistema de almacenamiento de energía térmica en sales fundidas representa el menor impacto ambiental en relación con los demás sistemas de almacenamiento. Este sentido, los BESS conducen a un futuro sostenible, ofrecen la posibilidad de extraer el máximo potencial a las energías renovables; siendo una estrategia ambiental y sostenible.

LITERATURA CITADA

- AlShafi, M. y Bicer, Y. (2021). Evaluación del ciclo de vida de sistemas de aire comprimido, baterías de flujo redox de vanadio y sales fundidas para almacenamiento de energía renovable. Informes de energía. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.161>
- Argudo Palomino, R. M., Lazo Baque, M. C., & Córdova, J. (2020). *Generación de energía reactiva a partir de Bess* (Doctoral dissertation, ESPOL. FIEC.). <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/57302>
- Banguero, E., Correcher, A., Pérez-Navarro, Á., García, E., & Aristizábal, A. (2020). Diagnóstico de un sistema de almacenamiento de energía en baterías basado en el análisis de componentes principales. *Energía Renovable*, 146, 2438-2449.

- Baquerizo Basurto, R., Canchari Porto, H. D., Polo Orellana, J. L., Poma Montes, I., & Valenzuela Guzmán, R. D. (2022). *Evaluación de generación de energía eléctrica mediante un sistema solar fotovoltaico con sistema de almacenamiento de energía con baterías (BESS-Storage) en la zona sur del país*. <https://repositorio.esan.edu.pe/handle/20.500.12640/3207>
- Bautista, A., Mina, J., & Lozoya, R. *Revisión de factores para el diseño de sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías para fuentes renovables de energía*.
- Benveniste Pérez, G. (2021). Análisis de ciclo de vida de sistemas innovadores de almacenamiento eléctrico en litio-azufre (Li-S) para vehículos. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/347913>
- Blasco, J. y Pérez, J. (2007). Metodologías de investigación en las ciencias de la actividad física y el deporte: ampliando horizontes. Madrid, España: Club Universitario.
- Calvetti, F., Maurer-Neuman, P., Moure, S., Pisani, J., & Scagni, Y. (2020). Producción de hidrógeno verde y transporte mediante líquidos orgánicos. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/28511>
- Canals Casals, L., Amante García, B., González Benítez, M.M., 2017b. Aging Model for Re-used Electric Vehicle Batteries in Second Life Stationary Applications, in: J.L. Ayuso Muñoz (Ed.), Project Management and Engineering Research. pp. 139–151. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51859-6>
- Chamba, M. S., Vargas, W., Riofrio, J., & Echeverría, D. (2022). *Regulación Primaria de Frecuencia Mediante Sistemas de Almacenamiento de Energía con Baterías en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano*. *Revista Técnica energía*, 19(1), 13-21 <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.506>
- Chunyang, Z., Peter Bach, A., Chresten, T., Seyedmostafa, H. (2023). Sistema de almacenamiento de energía de batería conectado a la red: una revisión de la aplicación y la integración, Revisión de energía renovable y sostenible, volumen 182, 113400, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113400>.
- Collaguazo Solís, J. R. (2020). *Control de voltaje óptimo para sistemas de almacenamiento de energía de batería (BESS) acoplados a microrredes de AC utilizando algoritmos LQG* (Bachelor's thesis). <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19171>
- Conzen, J., Lakshmipathy, S., Kapahi, A., Kraft, S., & DiDomizio, M. (2023). Lithium-ion battery energy storage systems (BESS) hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 81, 104932
- Dariusz, B., Piotr, O., Michał, B. (2023). *Sistema de almacenamiento de energía de batería para granja fotovoltaica conectada a la red: estrategia de gestión de energía y algoritmo de optimización de dimensionamiento diario de almacenamiento de energía*, Volumen 72, Parte A, 108201, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108201>.
- Díaz, F., Sumpers, A., Gomis, O., & Villafáfila, R. (2016). A Review of Energy Storage Technologies for Wind Power Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2154-2171.
- Estevez, R. (2021). Eco Inteligencia. Obtenido de <https://www.ecointeligencia.com/2021/09/almacenar-energia-sistemas-quimicos-3>
- Fernández Ocoró, B. A. (2019). *Evaluación de la integración de sistemas de baterías en los sistemas de potencia utilizando el software PowerWorld*. chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/11797/T08865.pdf?sequence=5

- González Carrera, M. (2022). Sistema de almacenamiento de energía basado en baterías. <http://hdl.handle.net/10651/64417>
- Guirao Goris, S. J. A. (2015). Utilidad y tipos de revisión de literatura. *Ene*, 9(2), 0-0. <https://dx.doi.org/10.4321/S1988-348X2015000200002>
- Gutschi, H. (2022). Obtenido de Estudio de factores técnicos y económicos: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/111503/cfjimenez_rp.pdf?sequence=1
- Hawkins, T.R., Gausen, O.M., Strømman, A.H., 2012. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—a review. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 997–1014. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0440-9>
- Hawkins, T.R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Strømman, A.H., 2013. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *J. Ind. Ecol.* 17, 53–64. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>
- Hernández, R. Fernández C. y Baptista P. (2010). Metodología de la Investigación. México DF: Mc Graw Hill.
- Hu, Y., Armada, M., & Sánchez, M. J. (2022). Potential utilization of battery energy storage systems (BESS) in the major European electricity markets. *Applied Energy*, 322, 119512. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119512>
- IRENA (2019). Hydrogen: A Renewable Energy Perspective, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA. (2017). Obtenido de Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030: <https://www.irena.org/publications/2017/oct/electricity-storageand-renewables-costs-and-markets>
- Lechón, Y., Lago, C., Herrera, I., Gamarra, A. R., & Pérula, A. (2023). Carbon benefits of different energy storage alternative end uses. Application to the Spanish case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 171, 112985
- Marabolí Muñoz, V. (2019). *Análisis de la incorporación de capacidad de respuesta inercial en centrales fotovoltaicas mediante BESS*. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170284>
- Martínez, J. C., Gómez, M. D., Madero, R. V., & Amenedo, J. L. R. (2019). Sistemas de almacenamiento mediante baterías electroquímicas. *Contribución a la integración de energías renovables*. UC3M, Madrid.
- Medina Catay, F. M. (2021). Sistema de almacenamiento de energía en batería (BESS) y su influencia en la demanda eléctrica diaria del sistema de distribución SE0062 (Huancayo). <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7604>
- Mejía, A. E., & Londoño, M. H. (2011). Sistemas de almacenamiento de energía y su aplicación en energías renovables. *Scientia et Technica*, 1 (47), 12-16. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4517879>

- Oikonomou, K., Parvania, M., Satyal, V., 2017. Almacenamiento de energía en la interconexión del oeste de EE. UU.: *Adopción actual, tendencias y desafíos de modelado*. <https://smartgrid.ieee.org/bulletins/june-2017/energy-storage-in-the-western-us-interconnection-current-adoption-trends-and-modeling-challenges>
- Parada Pino, D. E. (2018). Aplicaciones técnicas y económicas de sistemas BESS en parques eólicos y fotovoltaicos en el sistema eléctrico chileno. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152522>
- Salguero Pizarro, P. E. (2019). Modelo de dimensionamiento óptimo y análisis técnico económico de un sistema BESS para la planta solar FU Huayca II en la región de Tarapacá. <https://repositorio.uta.cl/jspui/handle/123456789/687>
- Wigger, H., Draheim, P., Besner, R., Brand-Daniels, U., & Vogt, T. (2023). Environmental and economic analysis of sector-coupling battery energy storage systems used for frequency containment reserve. *Journal Of Energy Storage*, 68, 107743. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107743>
- Zackrisson, M., Avellán, L., & Orlenius, J. (2010). Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues. *Journal Of Cleaner Production*, 18(15), 1519-1529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.004>

BIODATA

Dorielys Dayana López Castrillo: Estudiante del programa de Ingeniería ambiental de la Universidad de La Guajira, Colombia.

Andrés Llerena Caro: Estudiante del programa de Ingeniería ambiental de la Universidad de La Guajira, Colombia.

Andrés Vides Prado: Andrés D. Vides Prado, Profesor de la Facultad de ingeniería de La Universidad de La Guajira. Ingeniero industrial, Magister en energías renovables en sistemas eléctricos y candidato a doctor en Ingeniería.

Publicaciones:

- Brito, C. A. C., Rodríguez, N. P. P., Caballero, H. J. B., & Prado, A. V. (2022). Carreteras solares: alternativa sostenible para la infraestructura vial. *Ciencia e Ingeniería: Revista de investigación interdisciplinar en biodiversidad y desarrollo sostenible, ciencia, tecnología e innovación y procesos productivos industriales*, 9(2), 3.
- Vides-Prado, A., Mora-Flórez, J., & Pérez-Londono, S. (2023). Group assessment for the selection of sustainable small-scale power supply projects: a study case from northern Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 425, 138834.
- Vides-Prado, A. D., Mora-Florez, J. J., Domenech, B., Juanpera, M., Parajeles, M. J., Bastante, E., & Ferrer-Martí, L. A Redesign Method for Rural Electrification Projects, Case Study in Yutaho, Colombia. Case Study in Yutaho, Colombia. Preprint article 2025.