

Analysis for Selection of Battery-Based Storage Systems for Electrical Microgrids

Análisis para la selección de sistemas de almacenamiento basados en baterías para microrredes eléctricas

Rafael Antonio Peña Suesca ^{*},¹, **Andrés I. Santos León** ¹, **César Leonardo Trujillo Rodríguez** ¹

¹Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía - Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia).

*Correspondence e-mail: cltrujillo@udistrital.edu.co

Recibido: 27/11/2019. Modificado: 31/07/2020. Aceptado: 06/08/2020.

Abstract

Context: In the implementation of a microgrid, the most expensive element is the energy storage system, which consists of batteries in most cases. Different authors, motivated to reduce the implementation costs that allow the widespread use of microgrids, have dedicated their efforts to develop techniques and topologies for microgrids, in order to optimize the energy storage system, seeking the compromise between useful life, maintenance, and initial investment.

Method: The objective of this paper is to present the selection criteria used to select the type of battery in a microgrid, these being sufficient to ensure economic viability throughout the entire lifecycle of the system. To achieve this objective, papers indexed in journals of scientific and engineering content were consulted, classifying the criteria into two groups: technical criteria and technical-economic criteria.

Results: It was established that the criteria ensure compliance with the technical characteristics required by the end-user of the micro-network, but they do not consider the operation of the storage system throughout its useful life. In contrast, the technical-economic criteria allow guaranteeing the operation of the microgrid storage system throughout the entire duration of the project.

Conclusions: The classification of the criteria in this paper is a guide that allows motivating the progress of research to establish methodologies that guarantee viable implementation costs at the microgrid level, based on the technical-economic analysis of the storage system.

Keywords: Batteries, microgrids, storage systems.

Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: R. Peña, A. Santos y C. Trujillo "Análisis para la selección de sistemas de almacenamiento basados en baterías para microrredes eléctricas", Ingeniería, Vol. 25, Num. 3, pp. 284-304 (2020).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.15613>

Resumen

Contexto: En la implementación de una microrred, la parte más costosa es el sistema de almacenamiento de energía, el cual, en la mayoría de casos, está conformado por baterías. Diferentes autores, motivados por reducir los costos de implementación y permitir el uso generalizado de las microrredes, han dedicado sus esfuerzos a desarrollar técnicas y topologías de microrred para optimizar el sistema de almacenamiento de energía, buscando el compromiso entre vida útil, mantenimiento e inversión inicial.

Método: El objetivo del presente artículo es presentar los criterios de selección que se utilizan para escoger el tipo de batería en una microrred, siendo estos suficientes para asegurar la viabilidad económica a lo largo del ciclo de vida del sistema. Para alcanzar dicho objetivo, se consultaron artículos indexados en revistas de contenido científico y de ingeniería, clasificando los criterios en dos grupos: criterios técnicos y criterios técnico-económicos.

Resultados: Se pudo establecer que los criterios aseguran el cumplimiento de las características técnicas que requiere el usuario final de la microrred, pero no consideran la operación del sistema de almacenamiento a lo largo de la vida útil. En contraste, los criterios técnico-económicos permiten garantizar el funcionamiento del sistema de almacenamiento de la microrred a lo largo de toda la duración del proyecto.

Conclusiones: La clasificación de criterios en este artículo es una guía que permite motivar el avance de investigaciones para establecer metodologías que garanticen costos de implementación viables a nivel de microrredes, partiendo del análisis técnico-económico del sistema de almacenamiento.

Palabras clave: Baterías, microrredes, sistemas de almacenamiento.

Idioma: Español

1. Introducción

El problema del cambio climático y la naturaleza finita de los combustibles fósiles, los cuales se utilizan para el suministro de energía eléctrica en diferentes escenarios como las poblaciones que no tienen acceso a la red eléctrica tradicional, ha impulsado el uso de las fuentes no convencionales de energía como los sistemas solares fotovoltaicos, sistemas eólicos, entre otros. Uno de los grandes retos del uso de este tipo de fuentes no convencionales de energía es la intermitencia de generación de energía propia de la variabilidad natural de la fuente primaria de energía como el sol y el viento. Los sistemas de almacenamiento de energía aparecen como sistemas que permiten mitigar este problema, asegurando confiabilidad y calidad en el suministro de energía [1].

El almacenamiento de energía se puede realizar de diferentes maneras utilizando sistemas mecánicos, neumáticos, térmicos y electroquímicos, entre otros. Los sistemas electroquímicos, los cuales pueden considerarse como arreglos de baterías, son un tipo de tecnología investigado de forma constante en los últimos años dadas sus características de densidad de potencia y energía [2].

Una de las formas en las que las fuentes no convencionales de energía, los sistemas de almacenamiento con baterías y otros sistemas interactúan bajo un esquema controlable y gestionable se denomina microrred. Las microrredes se pueden clasificar según el tipo de tensión en el punto común, donde convergen los diferentes subsistemas, como microrredes DC, AC o híbridas [3]. Según los objetivos de la microrred, el sistema de almacenamiento de energía juega un papel fundamental tanto técnica como económicamente.

Este trabajo presenta una revisión de los criterios de selección que se utilizan para determinar el tipo de batería que se utiliza en microrredes eléctricas. Cabe resaltar que las microrredes tipo DC e híbridas tienen la particularidad, desde el punto de vista técnico, de presentar una interfaz de tensión DC natural para diferentes subsistemas como generadores solares fotovoltaicos, sistemas de almacenamiento con baterías y cargas como iluminación LED, subsistemas de implementación viables a nivel residencial, lo que hace fundamental identificar el tipo de sistema de almacenamiento de energía inmerso en la microrred.

El presente artículo se divide en seis secciones, en la segunda sección se hace una descripción y análisis de las principales tecnologías de almacenamiento que eventualmente podrían hacer parte de una microrred, la tercera sección presenta los diferentes tipos de baterías existente en el mercado utilizadas en los sistemas de almacenamiento, la cuarta sección expone los criterios de selección de tipo de baterías, desde un enfoque técnico y técnicoeconómico, para ser utilizadas en el contexto de las microrredes eléctricas. La quinta sección da un panorama general del manejo de residuos producto de los sistemas de almacenamiento basados en baterías. La última sección presenta la discusión final y las conclusiones.

2. Descripción y análisis de las principales tecnologías de almacenamiento

Las tecnologías de almacenamiento de energía a menudo son clasificadas en tres categorías de acuerdo con la longitud de la descarga [4]: de calidad de potencia, cuando la longitud de la descarga es corta, de segundos a minutos, por ejemplo en control y regulación de frecuencia; de potencia puente, cuando la longitud de la descarga es intermedia, entre minutos y una hora, por ejemplo, para cubrir el gap entre una contingencia y el encendido de otra fuente; de gestión de energía, cuando la longitud de la descarga es más larga.

En la Figura 1, se muestran los principales sistemas comerciales de almacenamiento de energía.

En la Tabla I, se muestra una clasificación de los diferentes sistemas de almacenamiento de energía dependiendo de si este se realiza de forma mecánica, eléctrica o electroquímica.

Tabla I. Clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía

Tipo de almacenamiento	Sistema correspondiente	Wh/Kg	Eficiencia (%)
Mecánico	Almacenamiento por bombeo de agua (PSH) [5].	0,5-1,5	70-85
	Almacenamiento por aire comprimido (CAES) [6].	30-60	>60
	Almacenamiento en volantes de inercia (FW) [7].	5-100	90-95
Eléctrico	Almacenamiento en ultra capacitores (EDLC) [8].	5-8	84-97
Electroquímico	Almacenamiento en baterías [9].	30-265	60-95

Los sistemas de almacenamiento PSH (por sus siglas en inglés de *Pumped-Storage Hydroelectricity*) y CAES (por sus siglas en inglés de *Compressed Air Energy Storage*) son sistemas que requieren de condiciones geográficas apropiadas y son demasiado grandes y costosos para las potencias

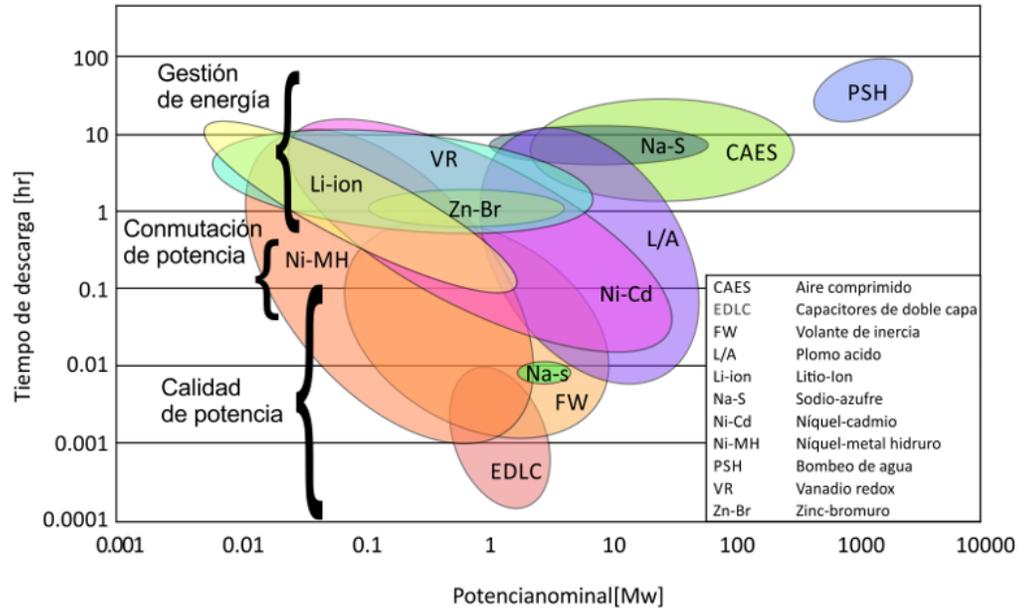


Figura 1. Aplicaciones y tecnologías de almacenamiento de energía [4].

que se manejan en las microrredes. Por otra parte, los FW son sistemas que pueden suministrar suficiente potencia en un periodo de tiempo corto y, por ello, se utilizan en descargas cortas orientadas a mantener la calidad de la potencia. No suelen ser utilizados como sistemas de respaldo de energía a menos que se usen junto a otros sistemas de almacenamiento. Los EDLC (por sus siglas en inglés de *Electric Double-Layer Capacitor*) tienen una alta densidad de potencia y tiempos cortos de carga comparados con las baterías; habitualmente operan con otros sistemas de almacenamiento de energía. Las baterías, por su parte, tienen unas características que las hacen propicias para operar en microrredes eléctricas, las cuales se abordarán en la siguiente sección.

3. Tipos de baterías eléctricas

Los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en microrredes eléctricas en su mayoría están conformadas por módulos electroquímicos, es decir, baterías. Esto se puede explicar, al menos desde el punto de vista técnico, puesto que las baterías han sido una tecnología en constante desarrollo desde su descubrimiento en el año 1000 a. c., como se puede apreciar en el resumen de línea de tiempo presentado en [10]. El desarrollo de esta tecnología también se ha visto impulsada por los subsidios que diferentes países han implementado para el financiamiento de los sistemas de almacenamiento de energía con baterías como se presenta en [11], [12]. Otro incentivo que se tiene para el desarrollo de sistemas de almacenamiento con baterías en este contexto es la mitigación ciertos fenómenos que afectan a la red tradicional cuando la microrred opera en modo red. Una revisión de este tipo de fenómenos se presenta en [13].

La batería eléctrica se trata de un dispositivo conformado por una o varias celdas con características electroquímicas capaces de convertir la energía química almacenada en energía eléctrica. Cada celda se caracteriza por estar conformada por un cátodo (electrodo positivo), un ánodo (electrodo

negativo) y un electrolito, el cual permite que los iones se muevan desde un electrodo hasta el otro, posibilitando el flujo de corriente fuera de la batería [14]. Es posible encontrar un sin número de baterías de distinta fabricación que ofrecen diferentes prestaciones. En seguida se presentan las más representativas en el mercado y que presentan mejores ventajas para su aplicación en microrredes eléctricas.

- Batería de plomo ácido (Pb).

Es la batería más común, ampliamente usada en vehículos convencionales, utilizadas como batería de arranque. Las tensiones habituales son 6 V, 12 V u otro múltiplo de 2, ya que la tensión suministrada por cada celda es de 2 V. La densidad de energía capaz de aportar es de 30 Wh/kg. Está compuesta por un par de electrodos de plomo, así que, cuando no se encuentra cargada se presenta como sulfato de plomo II ($PbSO_4$) insertado en una matriz de plomo metálico sobre el elemento metálico (Pb). El electrolito se caracteriza por ser una disolución de ácido sulfúrico [9].

Se destaca por ser una batería de bajo costo y fácil fabricación, siendo muy útil para un uso como acumuladores en sistemas de microrredes eléctricas. Por el contrario, la no admisión de sobrecargas ni descargas profundas, como su excesivo peso, la toxicidad del plomo y su lenta recarga, hace que no sean las más adecuadas para este tipo de aplicaciones.

- Batería níquel-hidruro metálico (Ni-MH).

Es un tipo de batería recargable que emplea un ánodo de oxihidróxido de níquel ($NiOOH$) y un cátodo de una aleación de hidruro metálico. Fue inventada con la idea de sustituir al cadmio en las baterías de Ni-Cd por una aleación que almacena hidrógeno. Una pila de Ni-MH es capaz de producir una tensión de 1,2 V para una capacidad que oscila entre 0,8 y 2,9 Ah. La densidad de energía aproximada alcanza los 80 Wh/kg, mientras que los ciclos de carga varían entre las 500 y 700 cargas, lo que supone un ciclo de vida superior a las baterías de plomo ácido.

En términos del efecto memoria, entendido como el fenómeno que restringe el uso de toda la energía por la limitación de la tensión o la capacidad de la recarga, en razón de fenómenos como tiempos prolongados en los procesos de carga-descarga y corrientes y temperaturas elevadas, la afectación sobre este tipo de baterías es menor. Son usadas en vehículos eléctricos híbridos como baterías de tracción, ordenadores portátiles, cámaras de video, relojes, radios y algunos teléfonos móviles. Por otra parte, las baterías de Ni-MH presentan una tasa de autodescarga del 30 % mensual comparadas con el 20 % que presentan las de NiCd, desplazando estas últimas a usos donde se presentan prolongados periodos entre consumos, por ejemplo, luces de emergencia, controles remotos, etc., dejando a las baterías de Ni-MH en aplicaciones donde se tienen consumos continuos de energía [14].

- Batería de sulfuro de sodio.

Este grupo de baterías aún se encuentran en su fase experimental por Ford Motor Company. Están compuestas de tubos electrolíticos de óxido de aluminio cerámicos con electrodos negativos de sodio y electrodos positivos de sodio fundido en medio de un contenedor aislado y sellado. Para

mantener el sulfuro fundido, la temperatura de la batería debe estar entre unos 300° y 350°. Estas baterías tendrían un costo de, aproximadamente, siete veces lo que costaría una batería de plomo ácido [15].

- Batería de litio-hierro.

Desarrollada por Sony Corporation y evaluadas por Nissan. Entre sus más sobresalientes características se encuentran los bajos efectos de memoria, alta energía específica de 100 Wh/Kg, alta potencia específica de 300 W/Kg y una vida útil de aproximadamente unos 1000 ciclos de carga. Estas baterías fabricadas para operar a 28,8 V consisten de ocho celdas cilíndricas metálicas cubiertas en un módulo de resina, cada batería tiene incorporado un controlador en la celda para verificar que está operando en un rango de 2,5 V a 4,2 V durante la carga y descarga. Esta batería presenta las desventajas de tener un alto costo en su construcción debido al uso de un material compuesto de óxido de cobalto para el ánodo y la alta pureza de un material orgánico usado en el electrolito, además de la necesidad de un sistema de ventilación para mantener frías las baterías [16].

- Baterías de níquel-zinc.

Estas emplean un electrodo positivo igual que el empleado en las baterías de NiCd y níquel-hierro junto con un electrodo negativo compuesto de zinc. Adicionalmente, utiliza una solución de hidróxido de potasio acuosa, como electrolito. Entre las ventajas a destacar de estas baterías se encuentra su relativamente elevada tensión por celda, aproximadamente 1,6 V, manteniendo la tensión constante durante una buena parte del ciclo de descarga. Adicionalmente, su alta densidad de energía que supera los 100 Wh/l, una energía específica aceptable de alrededor de 50 Wh/Kg. Finalmente, el funcionamiento a bajas temperaturas y su precio resultan ser características muy atractivas [17].

- Baterías de níquel-hierro.

Estas baterías usan un electrodo positivo de níquel sumergido en un electrolito de hidróxido de potasio como las baterías de níquel-cadmio y níquel-hidruro metálico. El material activo del electrodo es el hierro, el cual tiene características atractivas, por ejemplo, su costo y su estabilidad electroquímica. Las desventajas con estas tecnologías están relacionadas con el excesivo calentamiento de la batería en razón de la producción primigenia de hidrógeno durante los ciclos de carga, lo cual implica una disminución drástica de la eficiencia energética en el proceso de carga-descarga. Otras desventajas son su alto costo, razón de autodescarga elevada y un mal funcionamiento a bajas temperaturas [15].

- Baterías de níquel-cadmio (NiCd).

Estas baterías usan como electrolito una solución acuosa de una base, más exactamente hidróxido de potasio, diferente a las de plomo ácido que usan una solución ácida. Como consecuencia de dicha elaboración, presenta características de baja temperatura para su funcionamiento y permite que sea sellado herméticamente, lo cual resulta conveniente teniendo en cuenta la toxicidad de sus elementos [18].

Dentro de las ventajas que se destacan para este grupo de baterías se encuentra que, al estar el electrolito formado por hidróxido de potasio, no forma parte de las reacciones electroquímicas que tienen lugar en el proceso, haciendo que su concentración no varíe durante los procesos de descarga o recarga, por lo que su tensión varía poco en el proceso de descarga. De igual manera, presentan alta densidad de energía, de alrededor 90 Wh/l y una alta energía específica de aproximadamente 60 Wh/Kg, permitiéndoles así tener un elevado ciclo de vida.

Otro rasgo atractivo de estas baterías es que, después de las baterías de plomo ácido, las baterías de níquel-cadmio son las de mayor posicionamiento en el mercado.

En cuanto a los inconvenientes de adquisición, se encuentra su elevado precio respecto a las de ácido plomo, pues el níquel es un elemento costoso. Asimismo, la tensión máxima lograda por celda es de alrededor de 1,2 V, lo que resulta inferior respecto a las celdas de otros materiales, conllevando al uso de un mayor número de las mismas para la construcción de una batería. También tienden a recalentarse durante su funcionamiento, lo que afecta su rendimiento. Finalmente, a causa del uso de componentes tóxicos en su fabricación, especialmente el cadmio, resulta de difícil reciclaje y, por ende, dañino para el medio ambiente.

- Baterías de Li-ion.

Esta tecnología se ha convertido en la más importante en equipos móviles y portátiles. El alto nivel de tensión de las celdas de hasta 3,7 V facilita arreglos de menos celdas en serie para alcanzar las tensiones requeridas en las aplicaciones. En estas baterías, el cátodo está hecho de óxido metálico de litio (LiCoO_2 o LiMO_2) y el ánodo de carbón grafito. El electrolito son soluciones carbonatadas no acuosas.

Las principales ventajas son la densidad alta de energía (75-200 Wh/kg), elevada eficiencia (90-97 %), flexibilidad en tiempos de descarga (segundos o semanas), elevado promedio de ciclos completos de vida útil (1000-10.000), baja autodescarga (8 % al mes) y operación en rangos amplios de temperatura (-20 a 60 °C para la carga y -40 a 60 °C para la descarga) [19].

Las mayores desventajas son el alto costo (\$ 600/kWh) debido al empaque especial y a los circuitos internos de protección. La inestabilidad térmica de su electrodo positivo (óxido metálico), el cual puede descomponerse a elevadas temperaturas, liberando oxígeno y produciendo así mayores fugas térmicas. Muchas investigaciones se centran sobre materiales para el cátodo.

Los temas de seguridad exigen especial cuidado y para minimizar el riesgo. Estas baterías se equipan con unidades de monitoreo que evitan sobrecargas y descargas excesivas. Usualmente se instalan circuitos que monitorean la tensión individual de cada celda y evitan que se presenten desviaciones de tensión entre ellas.

Debido al alto costo, compiten con las baterías de plomo ácido solo en casos especiales, por ejemplo, en aplicaciones que requieran descargas fuertes en tiempos cortos [16].

4. Selección de tecnología de baterías para microrredes

De las diferentes tecnologías de baterías disponibles, las baterías de plomo ácido se han utilizado de forma continua en las microrredes eléctricas, esto se debe al hecho de que es una tecnología madura, la cual ha alcanzado costos viables para los proyectos. Otros tipos de baterías también se pueden encontrar en microrredes, dentro de estas tecnologías cabe resaltar la tecnología de Li-ion que ofrece características de densidad de potencia y energía, lo cual la hace viable técnicamente para conformar sistemas de almacenamiento en microrredes. La viabilidad económica de implementación de sistemas de almacenamiento con baterías de Li-ion se ha alcanzado como una consecuencia directa del decrecimiento en costos de esta tecnología, este cambio en costos se presenta en [20].

Tomando como referencia la recopilación de trabajos presentada en [21] se elaboró la Figura 2, la cual agrupa los trabajos [22]–[39] que se encuentran en la ventana de tiempo 2011-2018 según el tipo de batería utilizada. Se aprecia claramente en la Figura 2 cómo los sistemas de almacenamiento basados en baterías de plomo ácido son la tendencia dominante; sin embargo, se resalta la fracción que corresponde a los sistemas de almacenamiento conformados por baterías de Li-ion, tecnología que empieza a alcanzar costos que hacen su implementación viable en microrredes eléctricas.

Existen diferentes criterios para la selección del tipo de batería a utilizar en la microrred eléctrica. Los criterios se pueden dividir en dos grupos: criterios técnicos y económicos. Los criterios técnicos corresponden al análisis de una serie de parámetros técnicos como, por ejemplo, densidad de potencia, densidad de energía, entre otros. Por otro lado, al considerar que el sistema de almacenamiento de energía de la microrred puede llegar a hasta el 50 % del costo total de la microrred, el análisis que considera parámetros técnicos y económicos de forma simultánea se hace necesario para garantizar un punto de equilibrio entre las características técnicas del sistema de almacenamiento y su costo a lo largo de toda su vida útil.

4.1. Criterios técnicos

En los trabajos [40] y [41], la tasa de descarga y carga del sistema de batería se analiza como una función de la potencia entregada por el sistema de generación solar fotovoltaico y por la potencia demanda por la carga. En [41] se desarrolla una simulación considerando un sistema de almacenamiento con baterías de fosfato de hierro de litio (Li-iron), tecnología en la cual el cátodo de la batería está formado por un fosfato de hierro de litio. Este tipo de batería es más estable y tiene mayor vida útil que las baterías de litio, pues en estas el cátodo está compuesto por un óxido de cobalto o por un óxido de manganeso-litio, compuestos tradicionales en las baterías de ion de litio. En [42] y [43] se argumentan algunas de las ventajas de las baterías de litio con electrodos compuestos por óxidos y dióxidos metálicos, desde el enfoque de que estos materiales son capaces de tolerar el estrés de los cambios de volumen que implican los ciclos de carga y descarga de la batería, de tal forma que se logra una mayor vida útil con mayores capacidades y un aumento en la tensión por celda. En estos trabajos, es claro que la selección de la batería se realizó en función de obtener las mejores características posibles en las baterías del sistema de almacenamiento.

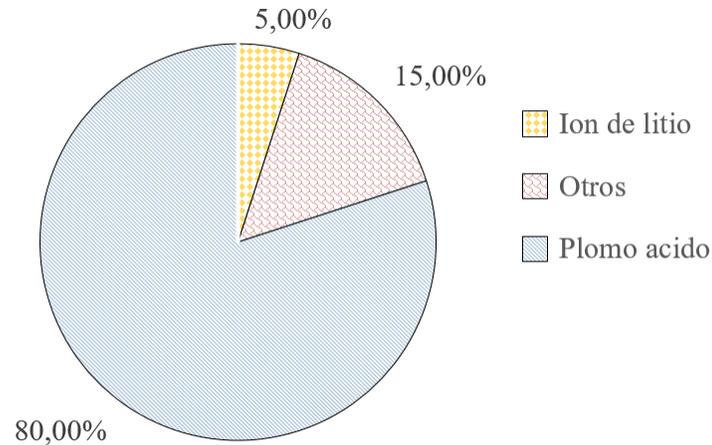


Figura 2. Tipos de baterías utilizados en diferentes proyectos de microrredes Fuente: elaboración propia con base en [22]–[39].

Por otro lado, en [40] se desarrolla un sistema de gestión inteligente de energía en el cual la batería se modela con un esquema circuital, donde también se considera la dinámica de la batería. Este sistema de gestión optimiza el uso de los diferentes sistemas de almacenamiento de energía con baterías, de tal forma que las pérdidas de energía en las líneas de transmisión sean mínimas. Así, la selección del tipo de batería es una función directa de los objetivos de control programados en el sistema de gestión.

La topología de la microrred en cuanto a la posición del sistema de almacenamiento también es un parámetro técnico relevante. En [44], se demuestra, mediante un caso de estudio de una microrred residencial en India, que se requiere un 1,55 % de energía menos en el sistema centralizado de baterías en comparación con una microrred con el sistema de almacenamiento distribuido. El caso de estudio considera cinco perfiles de carga diferentes, uno por cada casa que conforma la microrred, y un sistema de generación fotovoltaica por casa como única fuente de energía no convencional. En este trabajo también se hace referencia a otros parámetros técnicos para la selección de la batería como la capacidad nominal, el tiempo de carga y el estrés que se genera en la batería en el intercambio de energía con la microrred.

Por otro lado, en el trabajo desarrollado en [45] se presenta una metodología de optimización del banco de baterías de Li-ion para una microrred DC (corriente continua, por sus siglas en inglés) con conexión a red en función de parámetros como costo diario de la electricidad comprada de la red y degradación del banco de baterías. Si bien el anterior trabajo considera parámetros de naturaleza técnica y económica, la selección del tamaño del banco de baterías depende de la estrategia de control, descentralizado para la operación estable y autónoma que se propone en el trabajo. Lo anterior implica directamente que la metodología con la que se escoge el tamaño del banco de baterías es de carácter técnico, dado que no existe un compromiso general desde el diseño entre los parámetros técnicos y económicos considerados.

Otra alternativa para el diseño del sistema de almacenamiento de energía de la microrred, considerando parámetros técnicos, es partir de estrategias de control propuestas que tengan dentro de sus objetivos la operación adecuada de la batería. Con un conjunto de estrategias de control de este tipo

es posible determinar el tipo de batería más conveniente en función de los requerimientos técnicos de la microrred y las capacidades de cada uno de los esquemas de control disponibles. Por ejemplo, se podría utilizar el esquema de control propuesto en [46] para determinar el tipo de batería más conviene en función de las características técnicas que se requieren en la microrred.

Metodologías alternas se pueden adaptar de trabajos en los cuales el sistema de almacenamiento no hace parte de una microrred, pero en la metodología considera parámetros técnicos de interés como mantenimiento del sistema de almacenamiento y ventilación del mismo. Un ejemplo de un trabajo de este tipo se puede encontrar en [47]. En este trabajo se desarrolla un modelo para optimizar el tamaño de un sistema de almacenamiento de baterías de plomo ácido, utilizado como sistema de respaldo en una subestación de transmisión. Si bien este trabajo no se realiza directamente sobre una microrred, sí proporciona herramientas para considerar parámetros técnicos de instalación como la refrigeración del sistema de almacenamiento.

La selección del sistema de almacenamiento de energía de una microrred también puede considerar el uso en particular para el cual se implementa la microrred, por ejemplo, en [48] se considera una microrred compuesta por un sistema solar fotovoltaico y un sistema de almacenamiento de energía con baterías. Esta microrred tiene como propósito específico aumentar la capacidad de adaptación a desastres naturales que tiene el sistema de distribución al cual se encuentra conectada. En este escenario en particular, en el cual la microrred tiene un propósito tan específico, los autores resaltan la importancia de las acciones de gestión sobre el sistema de almacenamiento basado en baterías. Trabajos de este tipo aportan nuevas herramientas para desarrollar o complementar metodologías de selección y dimensionamiento de sistemas de almacenamiento con baterías para microrredes, con parámetros técnicos que permitan considerar escenarios especiales como los desastres naturales o condiciones ambientales críticas para los sistemas de distribución.

Un enfoque técnico diferente para la selección del tamaño del banco de baterías utilizado en una microrred se plantea en [49], trabajo en el cual se propone un esquema de control para un sistema de almacenamiento híbrido formado por baterías y un sistema de almacenamiento magnético con un superconductor. En este trabajo, el dimensionamiento del banco de baterías parte del esquema de control propuesto, el cual tiene como objetivo responder a los cambios abruptos de potencia que se generan en la microrred cuando esta se conecta y desconecta de la red.

4.2. Criterios técnico-económicos

Considerando que el sistema de almacenamiento de energía con baterías puede ser la parte más costosa de la microrred, una combinación de parámetros técnicos y económicos para la selección del tipo de batería es una opción conveniente frente al aseguramiento de su viabilidad.

En el trabajo que se presenta en [21] se puede encontrar un análisis técnico-económico del rendimiento de dos tecnologías de baterías populares hoy en día, las baterías de plomo ácido, una tecnología madura, y las baterías de Li-ion, una tecnología joven. En este trabajo se desarrolla un modelo de optimización para una microrred aislada y conectada a red en escenarios rurales y urbanos. Con el uso del *software* HOMER-2018 (13.11.3) se compara el rendimiento técnico-económico de las baterías de plomo ácido y ion de litio bajo perfiles de carga realísticos. Dentro de

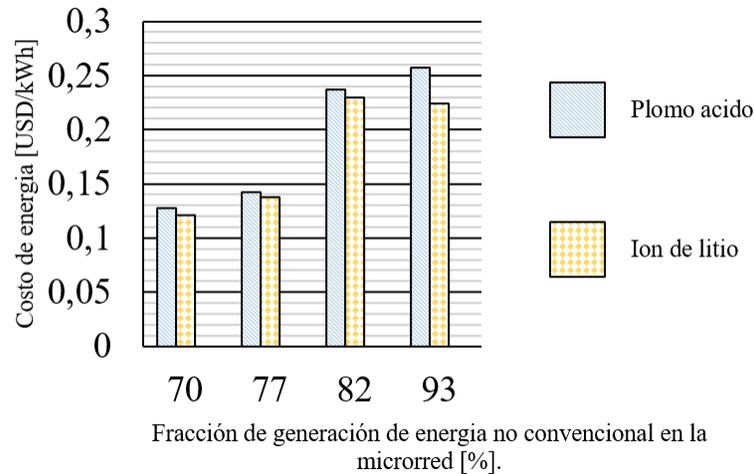


Figura 3. Costo de energía en función del tipo de batería utilizado y del porcentaje de energía renovable en el la microrred [21]

las conclusiones del estudio se puede encontrar que para ambos tipos de baterías la utilización es más baja con la microrred conectada a red que con la microrred operando en modo isla, además, las baterías de Li-ion tienen un nivel de pérdidas menor que las baterías de plomo ácido con un ciclo de vida más largo en comparación con estas últimas. Considerando lo anterior, los autores presentan como conclusión final el hecho de haber demostrado que a nivel residencial las baterías de Li-ion son una alternativa viable tanto técnica como económicamente para los sistemas de almacenamiento en microrredes residenciales. Técnicamente estas baterías presentaron algunas de las siguientes ventajas sobre la tecnología de plomo ácido: mantenimiento reducido, rápida tasa de carga, volumen reducido, mayor vida útil y menor costo de energía para diferentes porcentajes de generación con energía no convencional. Lo anterior se evidencia en la Figura 3.

En la Figura 3 también es interesante notar cómo la diferencia en el valor de la energía entre la microrred con sistema de almacenamiento a partir de baterías de Li-ion y la microrred con sistema de almacenamiento a partir de baterías de plomo ácido aumenta, siendo menor en la microrred con baterías de Li-ion, a medida que el porcentaje de energía generada en la microrred es de tipo no convencional.

El enfoque tecnoeconómico para la selección del tipo de batería para el sistema de almacenamiento de la microrred DC domiciliaria ha sido trabajado desde el desarrollo de expresiones matemáticas que permiten cuantificar el costo de ciclo de vida para cada tipo de batería. El costo de ciclo de vida modela el costo total que representa el sistema de almacenamiento con baterías. En [50]–[54] se desarrollan expresiones matemáticas que cuantifican este costo de vida en función de diferentes parámetros técnicos como profundidad de descarga (DOD), ciclos de usos a determinados DOD, eficiencia del almacenamiento de energía, entre otros.

Otros trabajos como el desarrollado en [55] consideran escenarios donde la microrred cuenta con conexión a red y existe un intercambio de energía con esta. En este caso, se plantea un problema de optimización para maximizar tanto el beneficio del propietario de la microrred como el beneficio del operador de red. El modelo considera parámetros relacionados con la selección y tamaño del

sistema de almacenamiento de energía utilizado por la microrred como el precio de la degradación, el número de baterías, la potencia de carga y descarga de las baterías, y la eficiencia durante carga y descarga. Cabe resaltar que en este trabajo también se considera la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que le proporciona un componente ambiental.

Otras formas de considerar criterios de selección de sistemas de almacenamiento de energía técnico-económicos se encuentran en los trabajos desarrollados con herramientas de análisis como HOMER (optimización híbrida de múltiples fuentes de energía renovables). Un ejemplo de este tipo de trabajos es el que se desarrolla en [56]–[60]. En el trabajo presentado en [57] se concluye que, para varios escenarios de microrred en Iran, el uso de baterías no es viable, dado que no existen políticas gubernamentales para tarifas preferenciales de la energía vendida a la red desde sistemas de almacenamiento de energía con baterías, la vida útil de la batería y los costos de reemplazo de las baterías.

Por otro lado, en [58] se utiliza HOMER para analizar diferentes parámetros técnicos y económicos de la microrred, incluyendo parámetros relacionados directamente con las baterías que forman el sistema de almacenamiento cuando se cambia la estrategia de control que se utiliza en la microrred para un caso de estudio en Iraq. En [59], se diseña una microrred bajo los criterios técnico-económicos que considera el *software* para un área residencial en Pakistán. En este trabajo, se desarrollan nueve casos de estudio basados en diferentes combinaciones de fuentes de energía como: solar fotovoltaica, eólica y diésel, en conjunto con un sistema de almacenamiento de energía con baterías. La novedad de este trabajo radica en la utilización en conjunto de los simuladores HOMER y MATLAB/Simulink, encargándose este último del modelado para el diseño óptimo, considerando parámetros técnicos como tensiones en los buses, rango de operación seguro del banco de baterías y balance de potencia activa.

El uso del *software* HOMER se presenta una vez más en el trabajo desarrollado en [60]. En contraste con el trabajo antes presentado, en este caso se tienen tanques de almacenamiento de hidrógeno como elemento almacenador de energía. En este trabajo se consideran tres diferentes escenarios para un caso de estudio en Australia, donde dos de los tres escenarios considerados incluyen un banco de baterías de Li-ion como sistema de almacenamiento de energía. Al final, los autores concluyen, a través de simulación, que el sistema más óptimo, con las consideraciones técnicas y económicas del *software* HOMER implica una microrred con sistema de almacenamiento de energía híbrido que incluye baterías de Li-ion y celdas de combustible en conjunto con un sistema de almacenamiento de hidrógeno y un electrolizador.

La selección y dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía para una microrred también debería considerar los factores climáticos, en especial cuando se consideran zonas geográficas con condiciones climáticas adversas como las zonas árticas. Un ejemplo de la selección y optimización de una microrred con sistema de almacenamiento de energía con baterías en una zona ártica se presenta en [61]. En este trabajo, se presenta un algoritmo de optimización genético que hace frente a las compensaciones necesarias que requiere el diseño del sistema al considerar las condiciones adversas de la región, ello al tiempo que selecciona la mejor configuración del sistema bajo parámetros técnicos, como la degradación de las baterías, y económicos, como el costo del combustible utilizado por el generador diésel de la microrred.

La selección del tamaño del banco de baterías para una microrred también puede abordarse desde un enfoque en el que se considere el despacho de energía desde la microrred hacia la red. Un ejemplo de este enfoque es el trabajo que se presenta en [62], un despacho inteligente de energía que tiene como objetivo maximizar el beneficio derivado del intercambio de energía con la red, al tiempo se considera la vida útil de las baterías. El trabajo también presenta un algoritmo para optimizar el tamaño del banco de baterías en función de los objetivos antes mencionados. Este tipo de investigaciones proporcionan una perspectiva diferente para abordar futuros trabajos en los cuales se considere —en la selección del tipo y cantidad de baterías— la operación comercial de la microrred.

La selección del tamaño óptimo del banco de baterías también puede abordarse con parámetros técnico-económicos de una forma probabilística. Ejemplos de este tipo de desarrollos son los trabajos presentados en [63]–[66]. En este grupo de trabajos el tamaño del banco de baterías considera parámetros como cambios en la demanda, la incertidumbre en la determinación del SOC, costo de operación de la microrred, precios de la energía, entre otros.

De forma similar, la determinación del tamaño del banco de baterías se puede establecer con un enfoque estocástico, como se aborda en los trabajos [67]–[71]. En este tipo de trabajo se consideran parámetros como la incertidumbre asociada a las fuentes de energía renovable, las emisiones de efecto invernadero, escenarios de conexión y no conexión a la red, y diferentes modos de operación en la microrred.

Los trabajos con enfoques probabilísticos y estocásticos pueden resultar útiles en desarrollos futuros en los que se incluyan en estos enfoques no solo el tamaño del banco de baterías, sino que también se considere el tipo de batería como una de las variables a determinar.

En la Tabla II, se presenta una clasificación técnico-económica de los principales trabajos enfocados a la selección de baterías para microrredes eléctricas.

5. Reciclaje de las baterías

Si bien la literatura científica donde se trata en detalle el reciclaje y disposición final de las baterías no es muy abundante, en [72] se presenta un panorama general que toma como referencia estudios de mercado desarrollados por empresas privadas. En este panorama se establece, como debería ser responsabilidad de cada fabricante de baterías, la correspondiente gestión para el reciclaje o disposición final de las baterías. El trabajo deja en claro que los mecanismos de disposición final o reutilización de las baterías depende del tipo de batería. Por ejemplo, en el caso de las baterías de plomo ácido se tienen a disposición todo un conjunto de empresas que se dedican exclusivamente a separar los materiales que conforman la batería y convertirlos en materias primas útiles.

En el caso de las baterías de Li-ion se opta, en primera instancia, por dar una segunda vida a las baterías, este es el caso de las baterías de los vehículos eléctricos. Cuando esto no es posible, se cuenta con un mercado más reducido para optar por la separación de los componentes que conforman la batería, también es importante resaltar que baterías como las Na-S y Na-NiCl₂ no cuentan con procesos de reciclaje. Otro aporte interesante de este trabajo es el de establecer la

Tabla II. Principales trabajos enfocados a la clasificación de sistemas de almacenamiento de energía para microrredes eléctricas.

Clasificación	¿Se propone estrategia de control?	¿Se propone sistema de administración?	¿Se propone algoritmo de optimización?	Parámetros considerados	Referencias
Técnica	No	Sí	No	Tasa de carga y descarga de la batería.	[40], [41]
Técnica	No	No	No	Vida útil y tensión por celda.	[42], [43]
Técnica	Sí	No	No	Disposición del banco de baterías.	[44]
Técnica	Sí	No	No	Degradación de la batería. Costo de la energía.	[45]
Técnica	Sí	No	No	Tasa de carga y descarga de la batería.	[46]
Técnica	Sí	No	No	Mantenimiento de las baterías. Ventilación de las baterías.	[47]
Técnica	No	No	No	Capacidad de adaptación que tiene la red, a la que se encuentra conectada la microrred, ante desastres naturales.	[48]
Técnica	Sí	No	No	Sistema de almacenamiento híbrido de baterías y sistema magnético con superconductor. Degradación de la batería durante la conexión y desconexión de la microrred a la red.	[49]
Técnico-económica	No	No	No	Emisiones de CO ₂ , diferentes configuraciones de microrred, microrred en modo isla u conectada a red.	[21]
Técnico-económica	No	No	No	Costo del ciclo de vida para la batería.	[50]–[54]
Técnico-económica	Sí	No	No	Degradación de la batería. Intercambio de energía con la red.	[55]
Técnico-económica	No	No	No	Parámetros técnico-económicos ajustados en HOMER.	[56]–[60]
Técnico-económica	No	No	Sí	Condiciones climáticas adversas.	[61]
Técnico-económica	No	No	Sí	Despacho de energía. Degradación de la batería.	[62]
Técnico-económica	No	No	No	Enfoque probabilístico en parámetros como la demanda y fuentes de energía.	[63]–[66]
Técnico-económica	No	No	No	Enfoque estocástico en parámetros como la demanda y fuentes de energía.	[67]–[71]

disposición del mercado actual para el reciclaje de baterías. El mercado para el reciclaje de baterías se encuentra liderado por Europa, donde se ha generado toda una cultura de reciclaje. En segundo puesto se encuentra el mercado de Norte América y, en tercer lugar, se encuentra el mercado de Asia pacífico.

6. Discusión

La revisión realizada en este artículo indica que los criterios de selección del tipo de batería que se utiliza en el sistema de almacenamiento de la microrred eléctrica se pueden clasificar en dos grupos, criterios técnicos y criterios técnico-económicos. Los criterios técnicos solo consideran los parámetros técnicos que aseguran que el diseño técnicamente los requisitos establecidos en un contexto en el que la microrred funcione en un escenario domiciliario. El hecho de solo considerar parámetros técnicos para la selección del tipo de batería del sistema de almacenamiento no resulta suficiente, puesto que esto puede conducir a la selección de una tecnología de batería cuyos costos hagan que el proyecto completo no sea viable económicamente. Esto resulta más crítico en los casos en los cuales la implementación de la microrred está orientada a poblaciones de escasos recursos en zonas aisladas, donde el presupuesto inicial debe ser considerado a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto.

La selección del tipo de batería con criterios del tipo técnico-económico considera un factor que se relaciona de forma directa con el ciclo de vida del proyecto y la vida útil de la batería. De esta forma, es posible realizar una selección de la tecnología de batería que asegure, junto a los demás elementos de la microrred, la viabilidad económica y técnica del proyecto que dé pie a la implementación a nivel domiciliario de las microrredes.

Es importante resaltar que dentro de las limitaciones del enfoque técnico-económico se encuentra una complejidad relacionada con el número de variables que considera el análisis y la búsqueda del modelo. Sobre esta base, la experimentación y prueba de baterías de diferente tecnología ha conducido a resultados y precios que son muy variados. Por ello, los criterios de selección de baterías entre una microrred y otra pueden variar. Así, para estos procesos se pueden tener, entre otras, las siguientes consideraciones:

- Tecnología y especificaciones frente al precio.
- Costos de operación y de mantenimiento.
- Vida útil versus profundidad de descarga.

Si se examina el caso de una microrred domiciliaria orientada a cubrir necesidades de energía (\geq 1 hora) en vez de alta potencia (\leq 1 hora), y se toma como criterio de selección obtener bajo precio a mediano y largo plazo del kilovatio-hora de almacenamiento. De acuerdo con lo anterior, se seleccionan baterías de carga y descarga lenta que son más durables que las fabricadas para descarga rápida. Además, por seguridad de la vivienda, se seleccionan baterías que sean selladas, libres de mantenimiento y sin costos de operación.

Por otra parte, considerando tecnologías y precios, actualmente se destacan las baterías de plomo ácido por menor precio y madurez en la tecnología. También se destacan, por las ventajas tecnológicas, las baterías de ion-litio que, siendo más costosas, aumentan en mercado y fabricación. Sin embargo, aún tienen precios que superan a las de plomo ácido.

Otro aspecto importante en la selección y dimensionamiento es la cantidad de energía a almacenar y la profundidad de descarga. Por ejemplo, se fabrican baterías de plomo ácido con vida útil

de 1000 ciclos para profundidad de descarga del 100 %. Las mismas baterías alcanzan vida útil de 20.000 ciclos con profundidad de descarga del 50 %, es decir, si se invierte el doble en baterías se alarga la vida útil 20 veces y se logra disminución de 10 veces en el valor del kWh a largo plazo. Por ejemplo, si se quieren almacenar y utilizar 3 kWh en la microrred, se escogen baterías con capacidad de 6 kWh que facilitan descargas de 1 kW durante tres horas y profundidad de descarga del 50 %. En este caso, se tiene un resultado adecuado con baterías de plomo ácido. Con baterías de 250 Ah, resulta el banco de una capacidad de 24 V/6 kWh.

Un enfoque técnico-económico que, además de las variables que en la literatura se pueden encontrar, considere el impacto del BMS (sistema de administración de la batería, por sus siglas en inglés) y gestión de la demanda puede considerarse como un tema para trabajos futuros.

7. Conclusiones

La selección de la tecnología de batería para el sistema de almacenamiento de una microrred eléctrica se puede realizar desde un enfoque técnico o técnico-económico. El enfoque técnico asegura el cumplimiento de los parámetros técnicos que requiere el usuario final, la limitación de este enfoque es la no consideración de la operación de la microrred a lo largo de toda su vida útil. Por otro lado, la selección de la tecnología de batería bajo un enfoque técnico-económico sí considera la operación de la microrred a lo largo de toda su vida útil, las principales características de este enfoque son su complejidad y la consideración del impacto de otros factores como el sistema de administración de la batería.

Referencias

- [1] A. J. Cavallo, "Energy storage technologies for utility scale intermittent renewable energy systems", *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 123, n.º 4, pp. 387-389, 2001. <https://doi.org/10.1115/1.1409556> ↑ 285
- [2] J. A. Guacaneme, D. Velasco y C. L. Trujillo, "Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes", *Información Tecnológica*, vol. 25, n.º 2, 2014. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000200020> ↑ 285
- [3] D. Wenzhong, *Energy Storage for Sustainable Microgrid*. Cambridge: Academic Press, 2015. ↑ 285
- [4] P. Denholm, E. Ela, B. Kirby y M. Milligan, "The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation", informe técnico, National Renewable Energy Lab., 2010. ↑ 286, 287
- [5] H. M. Gao y C. Wang, "A detailed pumped storage station model for power system analysis", en *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, octubre 2006. ↑ 286
- [6] A. Daneshi, N. Sadrmomtazi, H. Daneshi y M. Khederzadeh, "Wind power integrated with compressed air energy storage", en *IEEE International Conference on Power and Energy*, Kuala Lumpur, diciembre 2010. ↑ 286
- [7] E. K. Hussain, D. Benchebra, K. Atallah, H. S. Ooi, M. Burke y A. Goodwin, "A flywheel energy storage system for an isolated microgrid", en *IET Conference Publications*, Naples, septiembre 2014. ↑ 286
- [8] B. R. Alamri y A. R. Alamri, "Technical review of energy storage technologies when integrated with intermittent renewable energy", en *1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, Nanjing, abril 2009. ↑ 286
- [9] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, y Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review", *Progress in Natural Science*, vol. 19, n.º 3, pp. 291-312, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014> ↑ 286, 288

- [10] N. Gholam-Abbas y P. Gianfranco, Eds., *Lithium Batteries: Science and Technology*. Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-92675-9> ↑287
- [11] K. Popper y A. Hove, “Energy storage world markets report”, informe técnico, Energy Storage World, 2017. ↑287
- [12] International Renewable Energy Agency, “Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook”, informe técnico, International Renewable Energy Agency, 2015. ↑287
- [13] R. Passey, T. Spooner, I. MacGill, M. Watt y K. Syngellakis, “The potential impacts of grid-connected distributed generation and how to address them: A review of technical and non-technical factors”, *Energy Policy*, vol. 39, n.º 10, pp. 6280-6290, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.027> ↑287
- [14] M. G. Ruíz, “Pasado, presente y futuro de vehiculos electricos”, tesis de grado, *Universidad Tecnológica Pereira*, Pereira, 2015. ↑288
- [15] M. Kazmierkowski, “Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives (Emadi, A.; 2006) [Book News]”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, n.º 2, pp. 46-47, 2008. <https://doi.org/10.1109/MIE.2008.926483> ↑289
- [16] International Electrotechnical Commission, “Energy storage white paper”, informe técnico, International Electrotechnical Commission, 2009. ↑289, 290
- [17] D. Linden y T. B. Reddy, *Handbook of Batteries*. McGraw Hill, 2002. ↑289
- [18] X. Luo, J. Wang, M. Dooner y J. Clarke, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation”, *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511-536, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081> ↑289
- [19] J. Cho, S. Jeong y Y. Kim, “Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 48, pp. 84-101, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2015.01.002> ↑290
- [20] B. Nykvist y M. Nilsson, “Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles”, *Nature Clim Change*, vol. 5, n.º 4, pp. 329-332, 2015. <https://doi.org/10.1038/nclimate2564> ↑291
- [21] S. Dhundhara, Y. P. Verma y A. Williams, “Techno-economic analysis of the lithium-ion and lead-acid battery in microgrid systems”, *Energy Conversion and Management*, vol. 177, pp. 122-142, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.030> ↑291, 293, 294, 297
- [22] W. M. Amutha y V. Rajini, “Cost benefit and technical analysis of rural electrification alternatives in southern India using HOMER”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 236-246, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.042> ↑291, 292
- [23] S. Singh, M. Singh y S. C. Kaushik, “Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system”, *Energy Conversion and Management*, vol. 128, pp. 178-190, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.046> ↑291, 292
- [24] M. Usman, M. T. Khan, A. S. Rana y S. Ali, “Techno-economic analysis of hybrid solar-diesel-grid connected power generation system”, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 5, n.º 3, pp. 653-662, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2017.06.002> ↑291, 292
- [25] A. Chauhan y R. P. Saini, “Techno-economic feasibility study on Integrated Renewable Energy System for an isolated community of India”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 388-405, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.290> ↑291, 292
- [26] A. H. Mamaghani, S. A. A. Escandon, B. Najafi, A. Shirazi y F. Rinaldi, “Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia”, *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 293-305, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.086> ↑291, 292
- [27] L. M. Halabi, S. Mekhilef, L. Olatomiwa y J. Hazelton, “Performance analysis of hybrid PV/diesel/battery system using HOMER: A case study Sabah, Malaysia”, *Energy Conversion and Management*, vol. 144, pp. 322-339, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.070> ↑291, 292
- [28] R. Rajbongshi, D. Borgohain y S. Mahapatra, “Optimization of PV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER”, *Energy*, vol. 126, pp. 461-474, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.056> ↑291, 292
- [29] P. Peerapong y B. Limmeechokchai, “Optimal electricity development by increasing solar resources in diesel-based micro grid of island society in Thailand”, *Energy Reports*, vol. 3, pp. 1-13, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egyrr.2016.11.001> ↑291, 292
- [30] Y. Sawle, S. C. Gupta y A. K. Bohre, “Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2217-2235, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.081>

- [//doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.033](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.033) ↑291, 292
- [31] B. Dursun, C. Gokcol, I. Umut, E. Ucar y S. Kocabey, “Techno-Economic Evaluation of a Hybrid PV-Wind Power Generation System”, *International Journal of Green Energy*, vol. 10, n.º 2, 2012. <https://doi.org/10.1080/15435075.2011.641192> ↑291, 292
- [32] A. Hiendro, R. Kurnianto, M. Rajagukguk, Y. M. Simanjuntak y Junaidi, “Techno-economic analysis of photovoltaic/wind hybrid system for onshore/remote area in Indonesia”, *Energy*, vol. 59, pp. 652-657, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.005> ↑291, 292
- [33] R. Kumar, R. A. Gupta y A. K. Bansal, “Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using biogeography based optimization algorithm”, *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 8, pp. 33-43, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2012.08.002> ↑291, 292
- [34] B. K. Das, N. Hoque, S. Mandal, T. K. Pal y M. A. Raihan, “A techno-economic feasibility of a stand-alone hybrid power generation for remote area application in Bangladesh”, *Energy*, vol. 134, pp. 775-788, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.024> ↑291, 292
- [35] M. K. Shahzad, A. Zahid, T. Ur Rashid, M. A. Rehan, M. Ali y M. Ahmad, “Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software”, *Renewable Energy*, vol. 106, pp. 264-273, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.033> ↑291, 292
- [36] V. Tomar y G. N. Tiwari, “Techno-economic evaluation of grid connected PV system for households with feed in tariff and time of day tariff regulation in New Delhi – A sustainable approach”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 822-835, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.263> ↑291, 292
- [37] C. Phurailatpam, B. S. Rajpurohit y L. Wang, “Planning and optimization of autonomous DC microgrids for rural and urban applications in India”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 194-204, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.022> ↑291, 292
- [38] S. Salehin, M. T. Ferdaous, R. M. Chowdhury, S. S. Shithi, M. S. Bhuiyan y M. A. Mohammed, “Assessment of renewable energy systems combining techno-economic optimization with energy scenario analysis”, *Energy*, vol. 112, pp. 729-741, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.110> ↑291, 292
- [39] R. Sen y S. C. Bhattacharyya, “Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER”, *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 388-398, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.028> ↑291, 292
- [40] R. K. Chauhan y K. Chauhan, “Management of renewable energy source and battery bank for power losses optimization”, en Q. Yang, T. Yang y W. Li, Eds., *Smart Power Distribution Systems*. Academic Press, 2019, pp. 299-320, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812154-2.00015-8> ↑291, 292, 297
- [41] K. Chauhan y R. K. Chauhan, “Optimization of grid energy using demand and source side management for DC microgrid”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 9, n.º 3, p. 35101, 2017. <https://doi.org/10.1063/1.4984619> ↑291, 297
- [42] J. Liu et al., “Iron fumarate as large-capacity and long-life anode material for Li-ion battery boosted by conductive Fe₂P decorating”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 809, p. 151826, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151826> ↑291, 297
- [43] X. Chen y M. Najafi, “Adsorbed Iron oxide (FeO), Lead oxide (PbO), Tellurium dioxide (TeO₂) and Niobium dioxide (NbO₂) to silicon nanotube (9, 0) as anode electrodes in Li- and Na-ion batteries”, *Solid State Ionics*, vol. 341, p. 115043, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2019.115043> ↑291
- [44] R. K. Chauhan, K. Chauhan, B. R. Subrahmanyam, A. G. Singh y M. M. Garg, “Distributed and centralized autonomous DC microgrid for residential buildings: A case study”, *Journal of Building Engineering*, vol. 27, p. 100978, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2019.100978> ↑292, 297
- [45] S. Wang, L. Lu, X. Han, M. Ouyang y X. Feng, “Virtual-battery based droop control and energy storage system size optimization of a DC microgrid for electric vehicle fast charging station”, *Applied Energy*, vol. 259, p. 114146, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114146> ↑292
- [46] R. K. Chauhan y K. Chauhan, “Battery Monitoring and Control System for Photovoltaic based DC Microgrid”, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 20, n.º 6, 2019. <https://doi.org/10.1515/ijeeps-2019-0133> ↑293, 297
- [47] J. Ribič, J. Pihler, R. Maruša, F. Kokalj y P. Kitak, “Lead-Acid Battery Sizing for a DC Auxiliary System in a Substation by the Optimization Method”, *Energies*, vol. 12, n.º 22, p. 4400, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12224400> ↑293

- [48] E. Galvan, P. Mandal y Y. Sang, “Networked microgrids with roof-top solar PV and battery energy storage to improve distribution grids resilience to natural disasters”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 123, p. 106239, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106239> ↑293, 297
- [49] Q. Sun, D. Xing, H. Alafnan, X. Pei, M. Zhang y W. Yuan, “Design and test of a new two-stage control scheme for SMES-battery hybrid energy storage systems for microgrid applications”, *Applied Energy*, vol. 253, p. 113529, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113529> ↑293, 297
- [50] Y. Tian, X. Li, Y. Zhu y R. Xia, “Optimal capacity allocation of multiple energy storage considering microgrid cost Optimal capacity allocation of multiple energy storage considering microgrid cost”, en *The International Conference on Mechanical, Electric and Industrial Engineering*, Hangzhou, mayo 2018. ↑294, 297
- [51] S. A. Pourmousavi, R. K. Sharma y B. Asghari, “A framework for real-time power management of a grid-tied microgrid to extend battery lifetime and reduce cost of energy”, en *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, Washintong, enero 2012. ↑294, 297
- [52] M. Jarnut, S. Wermiński y B. Waśkowicz, “Comparative analysis of selected energy storage technologies for prosumer-owned microgrids”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 925-937, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.084> ↑294, 297
- [53] I. Pawel, “The Cost of Storage – How to Calculate the Levelized Cost of Stored Energy (LCOE) and Applications to Renewable Energy Generation”, *Energy Procedia*, vol. 46, pp. 68-77, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.159> ↑294, 297
- [54] M. Obi, S. M. Jensen, J. B. Ferris y R. B. Bass, “Calculation of levelized costs of electricity for various electrical energy storage systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 908-920, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.043> ↑294, 297
- [55] H. Hosseinnia, J. Modarresi y D. Nazarpour, “Optimal eco-emission scheduling of distribution network operator and distributed generator owner under employing demand response program”, *Energy*, vol. 191, p. 116553, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116553> ↑294, 297
- [56] J. Asfar, A. Atieh y R. Al-Mbaideen, “Techno-economic analysis of a microgrid hybrid renewable energy system in Jordan”, *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 52, n.º 4, pp. 415-423, 2019. <https://doi.org/10.18280/jesa.520412> ↑295, 297
- [57] S. A. Sadat, J. Faraji, M. Babaei y A. Ketabi, “Techno-economic comparative study of hybrid microgrids in eight climate zones of Iran”, *Energy Science and Engineering*, vol. 8, n.º 9, 2020. <https://doi.org/10.1002/ese3.720> ↑295, 297
- [58] A. S. Aziz, M. F. Naim, M. R. Adzman, M. F. Mohammed y M. A. M. Ramli, “Feasibility analysis of grid-connected and islanded operation of a solar PV microgrid system: A case study of Iraq”, *Energy*, vol. 191, p. 116591, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116591> ↑295, 297
- [59] E. A. Al-Ammar et al., “Residential Community Load Management Based on Optimal Design of Standalone HRES With Model Predictive Control”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12542-12572, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965250> ↑295, 297
- [60] F. Dawood, G. M. Shafiullah y M. Anda, “Stand-Alone Microgrid with 100 % Renewable Energy: A Case Study with Hybrid Solar PV- Battery-Hydrogen”, *Sustainability*, vol. 12, n.º 5, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12052047> ↑295, 297
- [61] M. R. Qitoras, P. E. Campana y C. Crawford, “Exploring electricity generation alternatives for Canadian Arctic communities using a multi-objective genetic algorithm approach”, *Energy Conversion and Management*, vol. 210, p. 112471, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112471> ↑295, 297
- [62] T. S. Mahmoud, B. S. Ahmed y M. Y. Hassan, “The role of intelligent generation control algorithms in optimizing battery energy storage systems size in microgrids: A case study from Western Australia”, *Energy Conversion and Management*, vol. 196, pp. 1335-1352, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112471> ↑296, 297
- [63] G. Carpinelli, F. Mottola y D. Proto, “Probabilistic sizing of battery energy storage when time-of-use pricing is applied”, *Electric Power Systems Research*, vol. 141, pp. 73-83, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.07.013> ↑296, 297
- [64] S. Bahramirad, W. Reder y A. Khodaei, “Reliability-Constrained Optimal Sizing of Energy Storage System in a Microgrid”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, n.º 4, pp. 2056-2062, 2012. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2217991> ↑296, 297
- [65] H. Bludszuweit y J. A. Dominguez-Navarro, “A Probabilistic Method for Energy Storage Sizing Based on Wind Power Forecast Uncertainty”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, n.º 3, pp. 1651-1658, 2011. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2144444>

[//doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2089541](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2089541) ↑296, 297

- [66] D. M. Greenwood, N. S. Wade, P. C. Taylor, P. Papadopoulos y N. Heyward, “A Probabilistic Method Combining Electrical Energy Storage and Real-Time Thermal Ratings to Defer Network Reinforcement”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, n.º 1, pp. 374-384, 2017. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2600320> ↑296, 297
- [67] S. X. Chen, H. B. Gooi y M. Q. Wang, “Sizing of Energy Storage for Microgrids”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, n.º 1, pp. 142- 151, 2012. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2160745> ↑296, 297
- [68] T. A. Nguyen, M. L. Crow, y A. C. Elmore, “Optimal Sizing of a Vanadium Redox Battery System for Microgrid Systems”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, n.º 3, pp. 729-737, 2015. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2404780> ↑296, 297
- [69] S. Sukumar, H. Mokhlis, S. Mekhilef, K. Naidu y M. Karimi, “Mix-mode energy management strategy and battery sizing for economic operation of grid-tied microgrid”, *Energy*, vol. 118, pp. 1322-1333, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.018> ↑296, 297
- [70] J. P. Fossati, A. Galarza, A. Martín-Villate y L. Fontán, “A method for optimal sizing energy storage systems for microgrids”, *Renewable Energy*, vol. 77, pp. 539-549, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.039> ↑296, 297
- [71] L. Guo, W. Liu, B. Jiao, B. Hong y C. Wang, “Multi-objective stochastic optimal planning method for stand-alone microgrid system”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 8, n.º 7, pp. 1263-1273, 2014. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0541> ↑296, 297
- [72] M. Sufyan, N. A. Rahim, M. M. Aman, C. K. Tan y S. R. S. Raihan, “Sizing and applications of battery energy storage technologies in smart grid system: A review”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, n.º 1, p. 14105, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5063866> ↑296

R. A. Peña Suesca



He received his B.S. degree in Electronics Engineering from the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in 1976, the M.Sc. degree in Electrical Engineering from the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, in 2006, currently he is studying a PhD. in Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. He currently works as a professor in the Department of Electrical Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, where he teaches courses on analogue circuits and power electronics. His main research interests include power electronics and microgrids.
e-mail: rapena@udistrital.edu.co

A. I. Santos León



Received the B.S. degree in Electric Engineering from the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in 2016, currently he is studying a M.Sc. in Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. He is a co-researcher at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in the research lines of Li-ion batteries and DC microgrids. His main research interests include: Li-ion batteries and DC microgrids.
e-mail: andresisantosleon@gmail.com

C. L. Trujillo Rodríguez



He received his B.S. degree in Electronics Engineering from the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in 2003, the M.Sc. degree in Electrical Engineering from the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, in 2006, and the Ph.D. degree in Electronics Engineering from the Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, in 2011. He currently works as a professor in the Department of Electrical Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, where he teaches courses on analogue circuits and power electronics. His main research interests include modelling and control of power converters applied to the distributed generation and microgrids.
e-mail: cltrujillo@udistrital.edu.co