Sistemas de almacenamiento masivo de energía con baterías (BESS): Estado actual y tendencias de futuro

Jorge Alonso del Valle[1], J.C. Viera[1], Manuela González[1], David Anseán[1], Víctor Manuel García[2], Cecilio Blanco Viejo[1]
[1]Universidad de Oviedo, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas
[2]Universidad de Oviedo, Departamento de Química Física y Analítica

***Resumen*—El uso de sistemas de almacenamiento masivo de energía (Energy Storage Systems, ESS) en la red eléctrica está creciendo notablemente en los últimos años. Permiten ayudar a la integración de energías renovables en la red y realizan funciones de estabilización, tanto de frecuencia como de tensión. Dentro de las diferentes tecnologías de almacenamiento utilizadas, una de las más prometedoras son las baterías, concretamente las baterías basadas en litio. No obstante, existen diferentes tecnologías de baterías de litio-ion, cada una con sus propias características, pudiendo ser más o menos apropiadas para su empleo en los ESS.**

En este artículo se analiza la problemática del almacenamiento masivo de energía en la red eléctrica, en particular mediante el empleo de baterías (Battery Energy Storage Systems, BESS). Además, se estudian las tecnologías de baterías de litio-ion existentes y su grado de desarrollo actual, así como su idoneidad para las distintas aplicaciones de los BESS. Finalmente, y en base a los estudios más importantes realizados sobre las baterías de los BESS en servicio, se analizan sus perspectivas de futuro.

***Palabras clave* — Almacenamiento masivo de energía con baterías (BESS), Baterías de litio-ion, Integración en la red de energías renovables, Regulación de frecuencia en la red eléctrica**

I. Introducción

En los últimos años se está produciendo un cambio muy importante en la red eléctrica a nivel mundial. Inicialmente se trataba de un sistema de generación centralizada, con pocos puntos de generación de muy alta capacidad. En la actualidad se está pasando a un sistema de generación distribuida, con muchos puntos de generación de baja potencia, generalmente a partir de fuentes de energía renovable [1][2]. Este cambio se ve justificado por la creciente penetración de energías renovables en el mercado de la energía eléctrica [3]. No obstante, a pesar de las ventajas de la energía renovable, siguen existiendo dificultades que frenan su desarrollo, destacando la falta de certeza en la disponibilidad del recurso energético renovable. Entre las soluciones que se están proponiendo, una de las más efectivas es el almacenamiento de energía [4]. Tradicionalmente, el sistema eléctrico ha operado generando energía al mismo tiempo que se consume; ahora, el empleo de sistemas de almacenamiento masivo de energía (Energy Storage Systems, ESS) supone una mejora significativa en la efectividad de la red eléctrica.

El almacenamiento energético puede tener diferentes funciones en la red eléctrica, desde la regulación de frecuencia hasta el soporte de energías renovables. Además, existen diferentes tecnologías de almacenamiento energético en función de la forma de energía en la que se almacena [5]. Cada tecnología presenta características propias, así como ventajas e inconvenientes en aspectos clave para la aplicación [6].

El empleo de baterías (Battery Energy Storage Systems, BESS), en especial baterías de litio-ion, se está popularizado a nivel mundial. Las baterías destacan por su alta eficiencia energética (relación entre energía almacenada y energía devuelta a la red) y su rapidez de respuesta; no obstante, el alto coste de los BESS y la necesidad de garantía de una vida útil prolongada son todavía barreras a superar [7]. Hay que resaltar que existen múltiples tecnologías de baterías de litio-ion y que varias se están empleando actualmente en los BESS [8]. Las baterías exhiben en función de su tecnología, forma constructiva, etc. diferentes prestaciones que, además, pueden evolucionar de forma diferente a largo plazo. Por tanto, es importante analizar en detalle su envejecimiento en servicio ya que sólo una vida útil prolongada [9] va a permitir amortizar el elevado coste inicial de las instalaciones.

En el presente artículo se analiza la problemática del almacenamiento masivo de energía, en particular de los (BESS); se estudian sus diferentes aplicaciones y las tecnologías de baterías utilizadas en función de la aplicación.

II. Sistemas de almacenamiento energético

En la Figura 1 se muestra una clasificación general de los ESS, en función de la forma en que se almacena la energía. A continuación, se presentan las diferentes tecnologías de almacenamiento, centrándonos en parámetros como la eficiencia energética, vida útil y coste de la instalación (ver resumen en Tabla 1 [10-14]).

A. Almacenamiento en energía mecánica

La tecnología más utilizada es el bombeo, ligado a las centrales hidroeléctricas; una aplicación muy específica adecuada para almacenar elevadas cantidades de energía eléctrica.

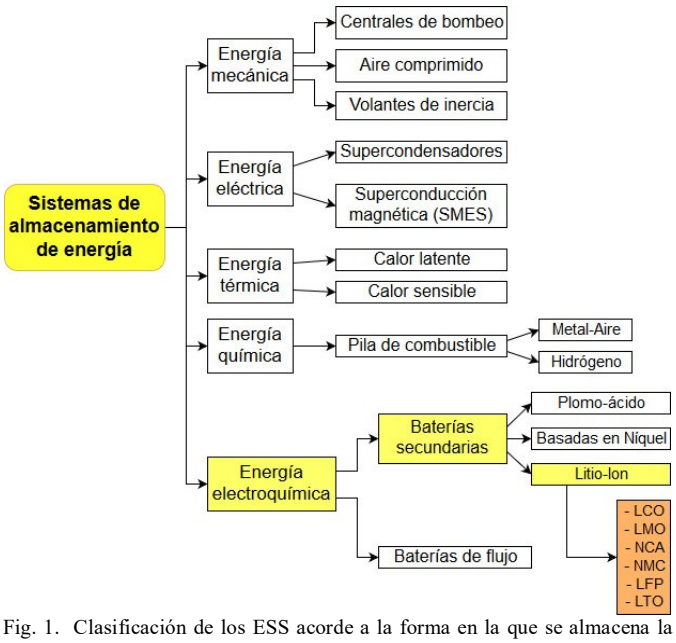

Fig. 1. Clasificación de los ESS acorde a la forma en la que se almacena la energía (Fuentes: [5][6][8][10])

El bombeo es la tecnología de almacenamiento energético más longeva y existen multitud de instalaciones que la utilizan en todo el mundo. En España, la más importante es la central de La Muela (Valencia), con una potencia instalada de 2GW [6][7][8].

Por otro lado, se encuentra la tecnología de almacenamiento en volantes de inercia. La cantidad de energía que pueden almacenar es muy baja; aun así, su nivel de eficiencia es muy elevado, en torno al 90%. El alto coste de la inversión inicial y su elevada autodescarga son sus principales desventajas. [5]

En cuanto a los sistemas de aire comprimido, tienen la capacidad de manejar niveles de potencia elevados y grandes cantidades de energía. Su principal inconveniente es una baja velocidad de respuesta, dado que consisten en un sistema de turbinas y compresores con una dinámica muy lenta. Además, su coste de inversión inicial es alto, su eficiencia es relativamente baja (70%) y no pueden instalarse en cualquier sitio, ya que necesitan una estructura geológica como depósito de aire. Es una tecnología que aún se encuentra en una fase temprana de desarrollo. [5-7][10]

B. *Almacenamiento en energía eléctrica*

La tecnología más extendida son los supercondensadores. Sus principales ventajas son: rapidez de respuesta, elevada densidad energética y alta eficiencia (95%). Sin embargo, su autodescarga es muy elevada (5% al día) y su tensión por elemento muy pequeña. Su principal aplicación es la mejora de la calidad del suministro eléctrico (*power quality*). [6][12]

En segundo lugar se encuentra el almacenamiento supermagnético (*Superconducting Magnetic Energy Storage*, SMES). Su principal inconveniente es que el sistema debe mantenerse a temperaturas extremadamente bajas, cercanas al cero absoluto, para que la bobina alcance sus propiedades supermagnéticas. Por ello, los sistemas SMES tienen un coste de inversión y de operación extremadamente altos, demasiado como para que su uso en la red eléctrica sea factible hoy en día. [10][12]

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO

Tecnología	Densidad de energía (Wh/L)	Densidad de potencia (W/L)	Tiempo de descarga	Potencia (MW)
Bombeo	0.2-2	0.1-0.2	1-24 h	100-5000
Aire comprim.	2-6	0.2-0.6	1-24 h	5-300
Volantes inercia	20-80	5000	s-h	0.25
Supercondens.	10-20	120000	s-h	<1
SMES	6	2600	Hasta 8 s	0.1-10
Pila de H_2	0.2-20	600	1-24 h	50
Plomo ácido	50-80	90-700	s-h	<20
Ni-Cd	15-80	75-700	s-h	<30
Li-Ion	200-500	500-2000	s-h	<100
Baterías Flujo	20-70	0.5-2	s-10h	<30

C. *Almacenamiento en energía térmica*

Estas tecnologías utilizan sistemas termodinámicos que pueden calentar o enfriar un cierto material, que suele ser agua o sal fundida, generando o consumiendo energía eléctrica en el proceso. Se clasifican en sistemas de calor latente o calor sensible en función de si hay cambio de fase (estado de agregación) en el material o no. Su principal ventaja es que pueden almacenar una cantidad de energía muy importante, pero son sistemas lentos, sus costes de operación son altos y necesitan de una ubicación geográfica muy específica. Sus principales aplicaciones son la absorción de picos de demanda y el desfase energético (*time-shift*). En España se están utilizando sistemas de almacenamiento en sal fundida como soporte de centrales termosolares, destacando los proyectos del Grupo Cobra, como por ejemplo los sistemas ubicados en Extresol y Manchasol [6][8][10]

D. *Almacenamiento en energía química*

En estas tecnologías determinados compuestos químicos (el más empleado es el hidrógeno) se convierten en energía eléctrica, y viceversa, dando lugar a la denomina pila de combustible. Estos sistemas destacan por su gran densidad energética pero su eficiencia es muy pobre (40%). Además, es necesario mantener un suministro constante de agua y un nivel de presión adecuado en el tanque de hidrógeno, lo cual conlleva una serie de costes que encarecen mucho la aplicación de esta tecnología. [6][10][12]

E. *Almacenamiento en energía electroquímica*

Actualmente se emplean principalmente dos tecnologías: las baterías secundarias y las baterías de flujo. Las baterías de flujo operan mediante una reacción química de oxidación-reducción que tiene lugar en un tanque. Los diferentes compuestos que reaccionan se envían mediante una bomba. Las baterías de flujo más comunes son las basadas en vanadio; destacan por suministrar altos niveles de potencia con una alta eficiencia, y también por una vida útil muy prolongada. Además, su rapidez de respuesta es buena, del orden de un segundo. Sin embargo, son sistemas caros debido al uso de bombas y a la necesidad de una gran cantidad de sensores. En general, se utilizan en sistemas de muy alta potencia.

Por otro lado, las baterías secundarias almacenan la energía mediante medios químicos. En la descarga se genera energía a

partir de reacciones electroquímicas y, durante la recarga, mediante las reacciones inversas, se convierte la energía eléctrica en energía química. En los últimos años, las baterías se han convertido en uno de los sistemas más prometedores para los ESS. Su versatilidad, rapidez de respuesta y eficiencia energética son sus principales ventajas. [11-15]

Sin embargo, hay que tener en cuenta que existen muchos tipos de baterías, y que cada una presenta ventajas e inconvenientes que determinarán su rendimiento en la aplicación y su vida útil en servicio. Por ello, en el siguiente apartado se analizan las diferentes tecnologías de baterías utilizadas en los BESS actualmente, indicando sus principales ventajas/desventajas en función de la aplicación.

III. Sistemas de almacenamiento basados en Baterías

En la Figura 2 se indican las tecnologías de baterías utilizadas en los BESS. Las baterías de litio-ion acaparan un 70% del mercado mundial y el 30% restante se divide entre baterías de flujo, baterías de sodio y baterías de plomo.

A. Baterías de Plomo

Se trata de la tecnología más madura. Hoy en día se sigue utilizando por su bajo coste en comparación con las baterías de litio o de sodio; sin embargo, su rendimiento es inferior en términos de energía específica (15Wh/kg), vida útil y eficiencia. Además, presentan problemas de seguridad ya que emiten gas hidrógeno [15].

B. Baterías basadas en Sodio

Existen dos tecnologías: sodio-azufre (NaS) y sodio-cloruro de níquel (NaNiCl). La más utilizada es la tecnología de sodio-azufre, por su alta energía específica (200Wh/kg) y su buena vida cíclica (2.500 ciclos) [12]; en términos de rendimiento, son equiparables a las baterías de litio-ion. Su principal inconveniente es que el sodio necesita una temperatura de al menos 300°C. Además, el sodio es explosivo en contacto con el agua, pudiendo generarse problemas de seguridad sin un control adecuado. Todo ello incrementa el coste de estos sistemas.

C. Baterías de litio-ion

A pesar de que la aplicación principal de las baterías de litio-ion ha sido los dispositivos portátiles, en los últimos años se han comenzado a utilizar en aplicaciones de alta potencia, como los vehículos eléctricos y los ESS. Esto ha sido posible gracias a la aparición de nuevas tecnologías de baterías, que incorporan materiales avanzados, y al diseño de las celdas con nuevas formas constructivas, lo que facilita la realización de los packs (conjunto de celdas en serie y/o paralelo que conforman la batería). Hay que resaltar que los BESS precisan de una gran cantidad de celdas en serie y paralelo para aportar los niveles de energía y potencia que se les exigen, lo que incrementa la complejidad de los sistemas electrónicos de supervisión y control.

Dado que cada tecnología de baterías de litio-ion se basa en el empleo de diferentes combinaciones de materiales, exhibe diferentes prestaciones en términos de tensión de celda, energía

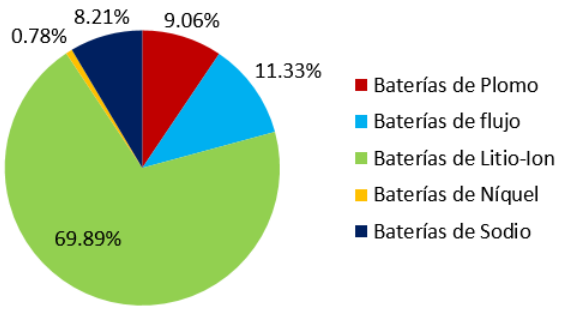

Fig. 2. Relación de las tecnologías de baterías más utilizadas en BESS (Fuente: [8])

específica, eficiencia y vida útil. En la actualidad, se están utilizando en los BESS tres de estas tecnologías: níquel-manganeso-cobalto (NMC), litio-hierro-fosfato (LFP) y litio-titanatos (LTO). Esto se debe fundamentalmente a su mayor rendimiento y vida útil, factor este último de gran importancia en los BESS, como ya se ha comentado. En la Tabla 2 se resumen las características, aunque hay que destacar que se trata de cifras orientativas, ya que el rendimiento y la vida útil dependen en gran medida de las condiciones de servicio.

Las baterías de NMC destacan por ser las que tienen mayor tensión nominal por celda y mayor energía específica, aunque su vida útil puede ser corta, en especial si se fuerza la batería fuera de sus límites de funcionamiento. Entre los principales fabricantes se encuentran *Samsung* y *Kokam*.

Por otro lado, las baterías de LFP tienen menor tensión y energía específica, pero son más seguras y su vida útil es mayor. Los principales fabricantes son *BYD*, *Alfen* y *A123*, entre otros.

Finalmente, las baterías de LTO tienen una tensión nominal muy baja y una energía específica también baja, pero su vida útil es muy alta y pueden funcionar adecuadamente a temperaturas extremadamente bajas [15]. Los principales fabricantes son *Toshiba*, *Altairnano* y *Leclanché*.

En la Figura 3 se muestra el porcentaje de potencia instalada mundial atribuido a cada una de las diferentes tecnologías de litio-ion. Aunque la tecnología más utilizada es la de LFP, en los últimos años las tecnologías de NMC y LTO están experimentando un crecimiento importante [8].

IV. Aplicaciones de los BESS basados en litio-ION

Existen múltiples aplicaciones para los BESS y no todas suponen el mismo esfuerzo para las baterías, al diferir los niveles de potencia y energía requeridos. En la Figura 4 se indican las principales aplicaciones de los BESS en la red eléctrica [6]. Por su parte, en la Figura 5 se muestra la relación de las aplicaciones más comunes de los BESS con baterías de litio-ion, en términos de potencia instalada a nivel mundial.

A. Integración de energías renovables en la red eléctrica

El uso de baterías se ha convertido en una de las formas más efectivas de ayudar a la integración de energías renovables en la red eléctrica, a través de dos tipos de aplicaciones: desfase energético y estabilización de capacidad.

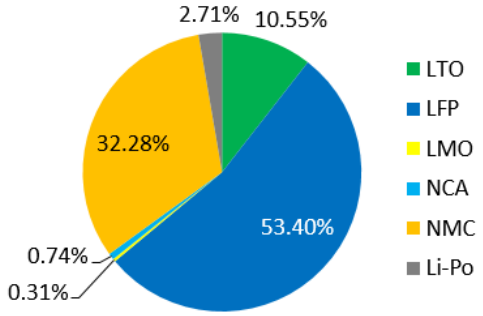

Fig. 3. Relación de las tecnologías de baterías de litio-ion más utilizadas en los BESS, en términos de potencia instalada (Fuente: [8])

TABLA II
TECNOLOGÍAS DE LITIO-ION USADAS EN BESS [15]

Tecnología	Tensión nominal	Energía específica	Vida cíclica	Temperatura de trabajo
NMC	3.6-3.7V	175-240 Wh/kg	~500 ciclos	0-45°C
LFP	3.2-3.3V	60-110 Wh/kg	~1000 ciclos	0-45°C
LTO	2.3-2.4V	~70 Wh/kg	~4000 ciclos	-20-45°C

El desfase energético consiste en almacenar energía cuando la demanda es menor que la generación y suministrar energía a la red cuando hay una demanda alta. Por otro lado, la función de las baterías en sistemas de energía renovable es estabilizar (uniformizar) su capacidad de aportar energía a la red, reduciendo el problema de la intermitencia en la generación. Ambas aplicaciones requieren niveles de potencia relativamente bajos y el tiempo de respuesta no es crítico, por lo que el esfuerzo a nivel de celda en el sistema de baterías no es particularmente elevado.

Un ejemplo relevante de un BESS como soporte de energías renovables es el ubicado en Minamisoma, Japón. Se trata de un sistema de baterías de LTO construido por Toshiba, de 40MW y 40MWh, que se utiliza para integrar un complejo de paneles solares en la red eléctrica. También cuentan con un sistema similar en la subestación de Nishi-Sendai, Japón, también compuesto por baterías de LTO y construido por Toshiba. Cuenta con una potencia máxima de 40MW (20MW nominales) y una capacidad de 20MWh [16].

B. *Servicios de soporte a la red*

Los BESS también se utilizan en servicios de soporte a la red eléctrica, para asegurar su fiabilidad. Aunque existen varias aplicaciones en este sentido, las más comunes son la regulación de tensión, el arranque autónomo de la red y la regulación de frecuencia.

Dada la rapidez de respuesta de los sistemas de baterías, están especialmente indicados para la regulación primaria de frecuencia, que es la que requiere un menor tiempo de respuesta, generalmente menor de 30 segundos (también pueden utilizarse para regulación secundaria y terciaria, menos exigentes en este aspecto). En la regulación primaria de frecuencia, los niveles de potencia que se manejan son altos, pudiendo incluso llegar a precisarse la descarga de las baterías en 15 minutos [12]. Además, es una aplicación que demanda múltiples cargas y descargas en un corto espacio de tiempo, por lo que es una de las aplicaciones más exigentes.

Un ejemplo importante de aplicación de un BESS para

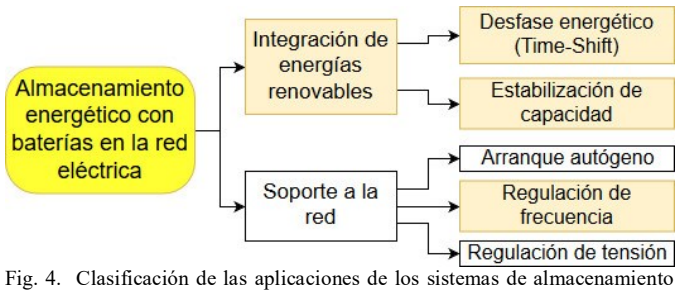

Fig. 4. Clasificación de las aplicaciones de los sistemas de almacenamiento energético en la red eléctrica (Fuentes:[5][6][8][10])

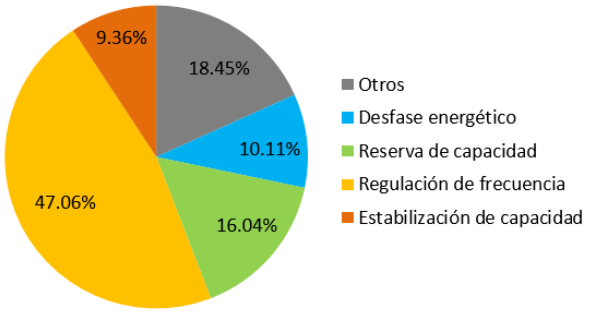

Fig. 5. Relación de las aplicaciones de los BESS basados en baterías de litio-ion, en términos de potencia instalada (Fuente: [8])

regulación de frecuencia es el sistema ubicado en Glassenbury, Reino Unido. Se trata de un sistema de 40MW compuesto por 3640 celdas de NMC fabricadas por LG. Desde 2016 forma parte del sistema de regulación de frecuencia de la red eléctrica británica (EFR) [17].

También son destacables los proyectos de almacenamiento energético para regulación de frecuencia llevados a cabo en Corea del Sur. El de mayor potencia se encuentra ubicado en la subestación de Ulsan. Cuenta con una potencia máxima de 32MW y 12MWh de capacidad. Se trata de un sistema fabricado por la compañía KEPCO y compuesto por baterías de NMC tipo Samsung SDI [18].

C. *Sistemas con varias funciones*

Algunos BESS se utilizan para varias funciones, destacando como ejemplo el sistema de la *Hornsdale Power Reserve*, en Australia, que utiliza baterías de NMC (Tesla). Se trata del BESS con mayor potencia del mundo, 100MW, y se emplea para facilitar la integración de una planta eólica en la red eléctrica, además de ofrecer un servicio de regulación de frecuencia a la red eléctrica [19].

A nivel nacional, España aún no cuenta con instalaciones BESS importantes. El sistema de mayor potencia se encuentra en Gran Canaria; cuenta con una potencia de 1MW y se utiliza con la función de desfase energético. Forma parte del proyecto Endesa Store [8].

Aunque las baterías de litio-ion tienen el rendimiento necesario para utilizarse en las aplicaciones más exigentes de los BESS, aún se desconoce cómo responden a largo plazo y en condiciones de temperatura extremas. Por un lado, si bien los fabricantes pueden garantizar el funcionamiento correcto de sus baterías a temperaturas de entre 0 y 40°C, ciertos mecanismos de envejecimiento se aceleran a temperaturas extremas, tanto altas como bajas [20]. Por otro lado, los perfiles de potencia a los que se somete a las celdas dependen de la aplicación

específica para la que se diseña el BESS, y de momento no existe información suficiente sobre la respuesta real de las tecnologías en las diferentes aplicaciones de BESS.

Un tercer factor a tener en cuenta es la estrategia que se sigue para preservar la vida útil del sistema sin incrementar demasiado el coste inicial de la inversión. La estrategia más común consiste en sobredimensionar el sistema de baterías, reduciendo los regímenes de corriente de carga y descarga a nivel de celda individual, para extender la vida de servicio del BESS [20]. No obstante, esto aumenta el coste del sistema y, por tanto, el número de años para su amortización. En sentido contrario, se puede optar por reducir costes aumentando el esfuerzo a nivel de celda, lo cual reduce la vida de servicio del BESS si no se dispone de la tecnología de baterías adecuada (hay que tener en cuenta el mayor coste que puede tener esta tecnología). Optar por una u otra estrategia tiene gran influencia a la hora de seleccionar la tecnología de baterías.

V. Evaluación de Baterías para BESS

A día de hoy no existe un consenso sobre qué tecnología de baterías de litio-ion es la más adecuada para cada aplicación de los BESS, siendo la mayor incógnita a resolver la determinación de la vida de servicio de las tecnologías en función de los requerimientos específicos de la aplicación. De ahí que uno de los principales objetivos de la investigación en este campo sea conocer la respuesta a largo plazo de las tecnologías en las diferentes aplicaciones.

Para ello, es necesario definir protocolos y perfiles de ensayo específicos. El problema es que según nuestro conocimiento, no existe ningún estándar normalizado para evaluar el rendimiento de una batería en una aplicación de BESS. Por ello, los grupos de investigación en este campo están planteando diferentes tipos de ensayos, con el objetivo de crear un estándar.

A. Caracterización y obtención de perfiles de ensayo

Existen varios trabajos donde se analizan BESS reales, y se muestran perfiles de potencia que son indicativos del esfuerzo real que experimenta una celda durante el funcionamiento del sistema [21-23]. Uno de los principales objetivos es el de caracterizar los perfiles, indicando los niveles de corriente a los que se someten las celdas y durante cuánto tiempo. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de un perfil de una aplicación de regulación de frecuencia, extraído de un sistema real ubicado en Dietikon, Suiza [21].

Destacar el trabajo realizado en la Universidad Técnica de Múnich, donde se han caracterizado algunas de las aplicaciones más importantes de los BESS, indicando los niveles de corriente y de estado de carga (SOC) a los que se someten las baterías. Se demostró que los niveles de corriente registrados apenas llegan a alcanzar el valor de 1C en ninguna de las aplicaciones estudiadas. En cuanto al estado de carga, los sistemas de regulación de frecuencia operan la mayoría del tiempo a un 50% de carga. Por otro lado, los sistemas para integración de renovables pasan la mayoría del tiempo plenamente cargados o plenamente descargados [9].

Se trata de un estudio similar al realizado en el *Hawai'i Natural Energy Institute*, donde se han analizado datos de un

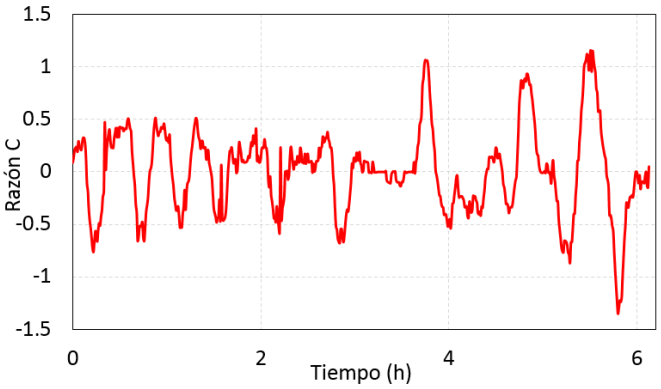

Fig. 6. Perfil de corriente en una batería utilizada en un sistema real utilizado para regulación primaria de frecuencia (Fuente: [21])

BESS utilizado como soporte para la red eléctrica. Los perfiles de potencia obtenidos fueron caracterizados como trenes de diferentes pulsos de corriente. El 90% de dichos pulsos no alcanzaron el valor de 1C. No obstante, valores de corriente de hasta 4C fueron alcanzados de forma puntual. También se midió la temperatura de las baterías en todo momento, mostrando un promedio de 30°C, una temperatura superior a la temperatura ambiente habitual en los ensayos realizados en laboratorio (23°C). Asimismo, los investigadores han planteado ensayos utilizando una versión simplificada del perfil de potencia real, probando diferentes baterías a diferentes temperaturas y diferentes niveles de intensidad del perfil, aunque solo se ha evaluado un tipo de batería y no se ha realizado una comparación de diferentes tecnologías [24-26]. Por ello, es de esperar que en los próximos años se plantee el uso de la metodología propuesta como estándar para ensayos de baterías de BESS, pudiendo aplicarse sobre baterías de diferentes tecnologías para realizar una comparativa.

B. Uso de baterías de "second life"

Una tendencia que está apareciendo en el mercado de los BESS es el uso de baterías de *second life*, es decir, baterías que se han utilizado previamente en otra aplicación. Generalmente, estas baterías provienen de vehículos eléctricos, ya que la vida de servicio de las baterías en esta aplicación finaliza cuando alcanzan el 80% de su capacidad y/o potencia inicial. Sin embargo, estas baterías aún se pueden aprovechar en otras aplicaciones como los BESS.

El problema del empleo de las baterías de segunda vida en un nuevo sistema es que los diferentes packs que se ensamblan deben tener unas prestaciones lo más parecidas posible. Si no, el pack más degradado reducirá la capacidad total del sistema y aumentará la posibilidad de un fallo crítico al sobrecargar al resto de packs. Si un pack de celdas se va a utilizar en un BESS como aplicación de segunda vida, es muy importante diagnosticar el grado de envejecimiento de cada una de las celdas. Si alguna de las celdas presenta un envejecimiento superior al resto, especialmente si se da en forma de electrodepósito (*lithium plating*), reducirá las prestaciones del pack y podrá generar situaciones peligrosas, ya que la celda podría llegar a fallar de forma catastrófica [27][28].

A día de hoy, las baterías de segunda vida solo están siendo utilizadas en aplicaciones domésticas y a pequeña escala, pero

no en BESS [29]. No obstante, si se mejoran las técnicas de evaluación del estado de salud de las celdas y packs, será posible conformar packs de grandes dimensiones para almacenamiento masivo.

VI. Conclusiones y Trabajos Futuros

En este artículo, se han revisado las principales tecnologías de almacenamiento energético, en particular aquellas basadas en sistemas de baterías de litio-ion. Se han estudiado las principales aplicaciones de los BESS, que son fundamentalmente la regulación de frecuencia y el soporte a las energías renovables.

Además, se han analizado las principales tecnologías de baterías de litio-ion utilizadas en los BESS (NMC, LFP y LTO). En cuanto a los estudios de caracterización de baterías en BESS, en la actualidad todavía no se ha realizado una comparación entre las diferentes tecnologías de baterías. Si bien se conocen sus características básicas, aún se desconoce cuál puede ser su respuesta a largo plazo. El tipo de perfil de potencia aplicado y la temperatura han demostrado ser los dos factores fundamentales que determinan la evolución del comportamiento de una batería en un BESS. De todos modos, serán necesarios nuevos estudios en los próximos años donde se demuestre la respuesta de diferentes tecnologías ante diferentes perfiles, niveles de corriente y temperaturas, todo esto a largo plazo, dado que los BESS han de tener una vida útil lo más prolongada posible.

En el caso del uso de baterías de segunda vida, se ha demostrado que es fundamental tener un control adecuado del estado de salud de las baterías en el momento en el que finaliza su primera vida. Dado que esta labor es difícil actualmente, los BESS como aplicación de segunda vida solo se usan en sistemas a pequeña escala. El uso de técnicas de diagnóstico y pronóstico avanzadas puede ayudar en el futuro a asegurar que las baterías se encuentren en un estado de salud adecuado para su reutilización en sistemas de almacenamiento masivo a gran escala.

Agradecimientos

Este artículo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España y los fondos FEDER de la Comunidad Europea a través de los proyectos con códigos FC-IDI/2018/000226, TEC2016-80700-R (AEI/FEDER, UE) y TIN2017-84804-R y por el Principado de Asturias a través del Programa Severo Ochoa de Ayudas Predoctorales (PA-18-PF-BP17-134).

Referencias

[1] Wei, F.; et. Al., "A review of microgrid development in the United States – A decade of progress on policies, demonstrations, controls, and software tools" *Applied Energy*, vol. 228, pp. 1656-1668, Junio 2018

[2] Hirsch, A.; et Al., "Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 402-411, Septiembre 2017

[3] Peker, M.; et Al., "Benefits of transmission switching and energy storage in power systems with high renewable energy penetration", *Applied Energy*, vol. 228, pp. 1182-1197, Junio 2018

[4] Akinyele, D.; Rayudu, R.; "Review of energy storage technologies for sustainable power networks", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 8, pp. 74-91, Diciembre 2014

[5] Haoran, Z.; et Al., "Review of energy storage system for wind power integration support", *Applied Energy*, vol. 137, pp. 545-553, Enero 2015

[6] Palizban, O.; Kauhaniemi, K.; "Energy storage systems in modern grids – Matrix of technologies and applications", *Journal of Energy Storage*, vol. 6, pp. 248-259, Mayo 2016

[7] Luo, X.; et Al., "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation", *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511-536, Enero 2015

[8] Energy Storage Database. [Online] http://energystorageexchange.org/

[9] Hesse, H.; et Al., "Lithium-Ion Battery Storage for the Grid – A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids", *Energies*, vol. 10, iss. 12, Diciembre 2017

[10] Faisal, M.; et Al., "Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35143-35164, Mayo 2018

[11] Azzuni, A.; Breyer, C.; "Energy security and energy storage technologies", *Energy Procedia*, vol. 155, pp. 237-258, Noviembre 2018

[12] Aneke, M.; Wang, M.; "Energy storage technologies and real life applications – A state of art review", *Applied Energy*, vol. 179, pp. 350-377, Octubre 2016

[13] Chen, H. et. Al.; "Progress in electrical energy storage system: A critical review", *Progress in Natural Science*, vol. 19, pp. 291-312, Marzo 2009

[14] Boicea, V.; "Energy storage technologies: The past and the present", *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, iss. 11, pp. 1777-1794, 2014

[15] Linden, D.; Reddy, T.B. (2010); Linden´s Handbook of Batteries, Fourth Edition: McGraw Hill

[16] Toshiba Corporation Website [Online] https://www.toshiba.co.jp/sis/en/topics/2016/20160226.htm

[17] Low Carbon Company [Online] https://www.lowcarbon.com/our-portfolio/portfolio-overview/our-projects/glassenbury-storage-park/

[18] LSIS Co., Futuring Smart Energy Leaflet, Octubre 2016

[19] Hornsdale Reserve [Online] https://hornsdalepowerreserve.com.au/

[20] Vetter, J. et. Al.; "Aging mechanisms in lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, vol. 147, pp. 269-281, Septiembre 2005

[21] Schmutz, J.; "Primary Frequency Control Provided by Battery", Tesis semestral, *Swiss Federal Institute of Technology,* Zurich, 2013

[22] Danish Technological Institute; "BESS Project: Smart grid ready Battery Energy Storage System for future grid", ForskEL Proyecto nº 10739, Final Report, Enero 2017

[23] Namor, E. et. Al; "Load Leveling and Dispatchability of a Medium Voltage Active Feeder through Battery Energy Storage Systems: Formulation of the Control Problem and Experimental Validation", *PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2016 IEEE, Ljubljana, Octubre 2016

[24] Dubarry, D.; Devie, A.; "Battery durability and reliability under electric utility grid operations: Representative usage aging and calendar aging"; *Journal of Energy Storage*, vol. 18, pp. 185-195, Agosto 2018

[25] Dubarry, M. et. Al.; "Battery Energy Storage System battery durability and reliability under electric utility grid operations: Analysis of 3 years of real usage", *Journal of Power Sources*, vol. 338, pp. 65-73, 2017

[26] Devie, A.; Dubarry, M.; "Altairnano Single Cell Battery Testing. Report 2: Test Plan", *Hawaii Natural Energy Institute (HNEI),* Julio 2015

[27] Saez-de-Ibarra, A. et. Al.; "Sizing Study of Second Life Li-ion Batteries for Enhancing Renewable Energy Grid Integration", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, pp- 4999-5007, Julio 2016

[28] Martinez-Laserna , E. et. Al; "Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of art", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, pp. 701-718, Octubre 2018

[29] Canals Casals, L.; Barbero, M.; Corchero, C.; "Reused second life batteries for aggregated demand response services", *Journal of Cleaner Production*, vol. 212, pp. 99-108, Marzo 2019