



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica aplicadas en generación con fuentes renovables, una revisión sistemática de literatura**

Carlos Andrés Andrade Gómez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de minas, Departamento de ciencias de la decisión

Medellín, Colombia

2018

# **Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica aplicadas en generación con fuentes renovables, una revisión sistemática de literatura**

Carlos Andrés Andrade Gómez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Director (a):

Ph.D. Juan David Velásquez

Línea de Investigación:

Fuentes no convencionales de energía

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión

Medellín, Colombia

2018

# Resumen

Se seleccionan y analizan sistemáticamente los últimos artículos científicos respecto a las tecnologías de almacenamiento de energía con baterías. Se responden las preguntas de investigación relacionadas con la aplicación de las tecnologías de baterías como solución ante el reto de la integración de sistemas de generación renovable no convencional de gran escala a los sistemas eléctricos. Se encuentra gran dominio de las tecnologías de litio en la actualidad y se encuentra que, aunque todavía hay potencial de desarrollo y mejora, hay un futuro prometedor para las tecnologías de sodio y *Redox flow*.

**Palabras clave:** almacenamiento de energía, BESS, baterías de litio, baterías de sodio, baterías *redox-flow*, red inteligente

# Abstract

The last scientific papers about battery energy storage technologies are selected and analyzed. Research questions are answered in relations with the application of battery technologies as a solution for the integration of non-conventional renewable large-scale generation plants with the electric systems challenge. Currently, it's been found a big dominion of lithium technologies and has been found that even though there is still a big potential for development and improvement, there is a promising future for sodium and *Redox flow* Battery technologies.

**Keywords:** Energy storage, BESS, lithium batteries, sodium batteries, redox-flow batteries.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>IV</b>
<b>Contenido.....</b>	<b>i</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>iv</b>
<b>1 Introducción.....</b>	<b>5</b>
<b>2 Marco teórico.....</b>	<b>7</b>
2.1 Problemática de la integración de las ERNC a la red.....	7
2.2 Smart Grid.....	9
2.3 Sistemas de almacenamiento de energía.....	9
<b>3 Metodología.....</b>	<b>13</b>
3.1 Criterios de inclusión y exclusión.....	13
3.2 Fuentes de información.....	14
3.3 Cadena de búsqueda.....	14
<b>4 Resultados de búsqueda.....</b>	<b>15</b>
4.1 ¿Qué autores y qué países lideran la investigación?.....	15
4.2 ¿Cuáles son los artículos y autores más citados?.....	16
4.3 ¿Cuáles son los principales revistas y congresos?.....	17
4.4 ¿Cuál es el tipo de literatura a analizar?.....	17
4.5 ¿Cuáles revisiones de literatura han sido publicadas?.....	18
4.6 ¿Cuáles son las limitaciones de la investigación actual?.....	18
<b>5 Discusión.....</b>	<b>21</b>
5.1 ¿Cuál es el desempeño de las tecnologías estudiadas en relación con los servicios de la Smart Grid?.....	21
5.2 ¿Cuáles son las fortalezas de las tecnologías estudiadas?.....	29
5.3 ¿Cuáles son los retos y brechas de las tecnologías estudiadas que ralentizan la integración de las energías de fuentes renovables a la Smart Grid?.....	32
5.4 ¿Cuáles son las tecnologías de baterías más adecuadas para la integración de plantas de gran escala con fuentes renovables?.....	37

5.5	¿Existe alguna diferencia en la arquitectura de las soluciones de almacenamiento de energía para los sistemas de energía eólica y fotovoltaica? ¿si existe, en qué consiste? .....	43
5.6	¿Cuáles son las tendencias actuales en la aplicación de las tecnologías estudiadas?.....	50
5.7	¿Alguna tecnología de baterías se perfila como la solución dominante en aplicaciones de almacenamiento e integración de generación con fuentes renovables en la Smart Grid?.....	60
<b>6</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>70</b>
<b>1</b>	<b>Anexo 1. ESS y BESS.....</b>	<b>78</b>
1.1	Sistemas de almacenamiento de energía .....	78
1.2	Arquitectura de un BESS .....	79
1.3	Características de un BESS.....	81
1.4	Sistemas híbridos .....	83
<b>2</b>	<b>Anexo 2. Tecnologías de baterías.....</b>	<b>84</b>
2.1	Plomo Ácido .....	84
2.2	Basadas en Níquel.....	84
2.3	Basadas en Litio.....	85
2.4	Basadas en metal líquido (LMB) .....	85
2.5	Baterías basadas en Sodio .....	86
2.6	Aire-Metal.....	87
2.7	Redox flow (RFB).....	88
<b>3</b>	<b>Anexo 3. Definición de los servicios ESS.....</b>	<b>89</b>
3.1	Arbitramento de energía eléctrica .....	89
3.2	Suministro de capacidad eléctrica.....	89
3.3	Seguimiento de carga .....	89
3.4	Regulación de frecuencia .....	90
3.5	Capacidad de reserva de suministro eléctrico .....	90
3.6	SopORTE de voltaje.....	91
3.7	SopORTE de transmisión.....	91
3.8	Alivio de congestión de transmisión .....	91
3.9	Diferimiento de actualización de transmisión y distribución (T & D).....	91
3.10	Potencia en sitio para subestación.....	91
3.11	Gestión del costo de energía tiempo-de-uso (TOU) .....	92
3.12	Gestión de la carga de la demanda.....	92
3.13	Confiabilidad del servicio eléctrico .....	92
3.14	Calidad de la potencia del servicio eléctrico.....	92
3.15	Arbitramento de energía de fuentes renovables .....	92
3.16	Afirmado de la capacidad de energía de fuentes renovables .....	93
3.17	Integración a red de la generación renovable.....	93

# Lista de figuras

Figura 1 Clasificación de documentos por áreas de conocimiento .....	19
Figura 2 Energía específica Vs. Potencia específica. Imagen tomada de [64], a su vez está basado en el Energy Storage Handbook de 2011 .....	24
Figura 3 Costos de la solución BESS según el tipo de servicio. tomada de [75]. Años de publicación (2013-2010) .....	28
Figura 4 Diagrama de Ragone de las principales tecnologías de almacenamiento de energía. *Datos base tomados de [77], última consulta: abril de 2018. ....	39
Figura 5 Arquitectura híbrida de un BESS que integra un RES solar fotovoltaico y un supercapacitor .....	49
Figura 6 Diagrama de dispersión potencia-duración para los distintos tipos de tecnologías. ....	61
Figura 7 Clasificación de sistemas de almacenamiento de energía. Imagen tomada de [51] .....	78
Figura 8 Arquitectura simplificada de un sistema de almacenamiento de baterías, imagen tomada de [12] .....	79
Figura 9 Diagrama esquemático de una batería plomo-ácido, imagen extraída de [26] .....	84
Figura 10 Diagrama esquemático de una batería ion de litio, imagen extraída de [40] .....	85
Figura 11 Diagrama esquemático de una batería LMB, imagen extraída de [40].....	85
Figura 12 Diagrama esquemático de una batería de NaS, imagen tomada de [73].....	86
Figura 13 Diagrama esquemático de batería de Redox flow, imagen tomada de [57].....	88

# Lista de tablas

Tabla 1 Servicios que puede proveer un ESS .....	10
Tabla 2 Requerimientos de los servicios ESS.....	12
Tabla 3 Resultados de las búsquedas y artículos seleccionados .....	15
Tabla 4 Autores que lideran la investigación.....	16
Tabla 5 Países que liderarán la investigación .....	16
Tabla 6 Artículos más citados.....	16
Tabla 7 Principales revistas y congresos.....	17
Tabla 8 Tipo de literatura a analizar .....	18
Tabla 9 Artículos de review más citados .....	18
Tabla 10 Desempeño de las principales tecnologías de baterías para almacenamiento de energía de gran escala.....	23
Tabla 11 Ventajas de las tecnologías de baterías de ion de litio .....	29
Tabla 12 Ventajas de las tecnologías de baterías plomo-ácido, níquel-cadmio, níquel-metal hidruro .....	30
Tabla 13 Ventajas de las tecnologías de baterías sodio-sulfuro, ZEBRA, ion de sodio .....	30
Tabla 14 Ventajas de las tecnologías de baterías Redox flow de vanadio, zinc-bromuro y hierro-cromo .....	31
Tabla 15 Retos y dificultades de la tecnología de batería plomo-ácido.....	33
Tabla 16 Retos y dificultades de la tecnología de batería ion de litio.....	34
Tabla 17 Retos y dificultades de las tecnologías de batería níquel-cadmio, níquel-metal hidruro ..	34
Tabla 18 Retos y dificultades de la tecnología de batería sodio-sulfuro.....	35
Tabla 19 Retos y dificultades de las tecnologías de batería ZEBRA y ion de sodio .....	35
Tabla 20 Retos y dificultades de la tecnología de batería Redox flow de vanadio.....	36
Tabla 21 Retos y dificultades de las tecnologías de batería Redox flow de zinc-bromuro y hierro-cromo .....	36
Tabla 22 Idoneidad de las tecnologías de baterías respecto a los servicios de almacenamiento de gran escala.....	40
Tabla 23 Similitudes y diferencias de las arquitecturas de BESS para la integración de plantas eólicas y fotovoltaicas a la red .....	44
Tabla 24 Desempeño de tecnologías de baterías.....	60
Tabla 25 Distribución de las tecnologías según el tipo de servicio o aplicación. ....	63

# 1 Introducción

En septiembre de 2015, la asamblea general de las Naciones Unidas adoptó la meta de desarrollo sostenible 7, enfocada en asegurar energía sostenible para todos. En diciembre del mismo año, 195 países, entre ellos Colombia, firmaron el acuerdo de París para resolver el cambio climático, en la que se comprometen a incrementar el uso de fuentes renovables y la eficiencia energética con el propósito de limitar el incremento de la temperatura global [57]. Estas señales son claras respecto a las políticas energéticas que se están implementando y regirán el curso del desarrollo energético del mundo, a su vez, que son coherentes con las señales actuales que está dando el mercado respecto al foco de desarrollo de proyectos energéticos nuevos.

De acuerdo con la *International Energy Agency*, desde 1990 las instalaciones de generación con fuentes solar fotovoltaica y eólica han crecido a una rata promedio anual de 45.5% y 24% respectivamente. En el 2015, las fuentes de energía renovable representaban un 13.4% del total del suministro mundial de energía [79].

En países desarrollados, en el 2016 la producción de electricidad con fuentes renovables representó el 23.8% de la producción total, la mayor participación hasta el momento. Este incremento en producción fue causado principalmente por generación eólica y solar PV. La producción eólica ha crecido en participación de 0,3% en 1990 a 23.2% entre todas las fuentes renovables. La participación de generación solar fotovoltaica ha pasado de 0,0% a 8,4%. Finalmente, hay una fuerte tendencia a que los proyectos de generación eólica sean proyectos libres de carbono, hoy día las instalaciones de generación renovable representan el 77% del total de nuevas instalaciones de generación de energía en el mundo [79].

En el año 2016 se dieron varios cambios relevantes para el sector de las energías renovables como los *records* de los precios más bajos para contratos de largo plazo con energías renovables, y la capacidad instalada más grande registrada (147 GW). Las fuentes renovables están establecidas hoy día como las fuentes principales de suministro de energía en nuevas instalaciones [80].

En Colombia, se ha incrementado el interés en instalación de plantas de energías renovables no convencionales (ERNC), a Julio de 2017 había proyectos matriculados ante la UPME 478 MW de generación eólica, de los cuales más de 468 MW están relacionados con parques de más de 20MW y 2614 MW de energía solar fotovoltaica, de los cuales más de 1600 MW son parques de más de 20 MW [81].

Las fuentes renovables, aunque limpias, presentan una característica de alta variabilidad en la generación debido a la naturaleza intermitente de los vientos y la irradiancia. Esta variabilidad, ligada a grandes fuentes de generación renovable, representa un reto para la red de potencia eléctrica que interactúa con una fuente de potencia dinámica que pone a prueba su estabilidad, calidad de servicio y demás características de operación.

Ante este reto, la *Smart Grid*, como sistema integrador general, y los sistemas de almacenamiento de energía, como subsistemas específicos, se erigen como alternativa de solución. La *Smart Grid* propone una arquitectura de servicios en el sistema de potencia eléctrico soportado por sistemas físicos. Las tecnologías de almacenamiento de energía permiten la administración de la energía entre la oferta y la demanda [59].

Actualmente existe cierta participación de las tecnologías de almacenamiento electroquímico en el sector eléctrico. Uno de los mayores impulsores de los sistemas de almacenamiento de energía con baterías a gran escala es el crecimiento de las plantas de energía renovable alrededor del mundo. Bloomberg New Energy Finance proyectó en 2016 que en los próximos 5 años se instalarían en el mundo 644 GW de capacidad de generación eólica y solar [58].

Entre el 2011 y 2014 se dio una fuerte competencia entre las tecnologías de baterías dominantes del momento: ion de litio y plomo ácido. El departamento de energía (*Department of Energy DoE*) de Estados Unidos concluyó que la mayoría de instalaciones se usaron para afirmado de la capacidad de plantas renovables y servicios auxiliares [58].

El estudio propuesto tiene el interés en conocer el estado del arte de las aplicaciones de sistemas de almacenamiento de energía con baterías acoplados a plantas de generación de energía con fuentes renovables e integradas a la *Smart Grid*.

Al considerar que las tecnologías de energías renovables, *Smart Grid* y baterías de almacenamiento tienen un grado de avance suficiente para ser implementadas en instalaciones de generación existentes o potenciales y; que Colombia tiene entre sus planes la instalación de infraestructura de generación renovable varios proyectos con capacidad de más de 20 MW; se hace interesante saber cómo estas tecnologías se interrelacionan y pueden llegar a ser una alternativa al reto de la integración de energías renovables en el sistema de potencia eléctrico Colombiano. Por consiguiente, se propone en el presente estudio realizar una revisión sistemática de la literatura para resolver las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el desempeño de las tecnologías estudiadas en relación con los servicios de la *Smart Grid*?
2. ¿Cuáles son las fortalezas de las tecnologías estudiadas?
3. ¿Cuáles son los retos y brechas de las tecnologías estudiadas que ralentizan la integración de las energías de fuentes renovables a la *Smart Grid*?
4. ¿Cuáles son las tecnologías de baterías más adecuadas para la integración de plantas de gran escala con fuentes renovables?
5. ¿Existe alguna diferencia en la arquitectura de las soluciones de almacenamiento de energía para los sistemas de energía eólica y fotovoltaica? ¿si existe, en qué consiste?
6. ¿Cuáles son las tendencias actuales en la aplicación de las tecnologías estudiadas?
7. ¿Alguna tecnología de baterías se perfila como la solución dominante en aplicaciones de almacenamiento e integración de generación con fuentes renovables en la *Smart Grid*?

## 2 Marco teórico

A continuación se expondrá en qué consiste el fenómeno de la variabilidad desde el punto de vista técnico de las plantas eólicas, solares fotovoltaicas y desde el punto de vista técnico-económico del sistema eléctrico. Luego, desde la visión de *Smart Grid*, se mostrará a nivel conceptual cómo un sistema de almacenamiento de energía (*Energy Storage System* ESS) puede ser la solución a estos problemas. Se caracterizarán los distintos servicios que puede ofrecer un ESS acoplado con una planta ERNC a la red y sus requerimientos básicos. Con este contexto, el lector tendrá los elementos teóricos para entender los conceptos y soluciones propuestas en la literatura científica seleccionada, al reto de integrar las ERNC a la red.

### 2.1 Problemática de la integración de las ERNC a la red

Los sistemas eléctricos de potencia están en la confluencia de un nuevo paradigma, la integración masiva a la red eléctrica de plantas de generación con fuentes renovables (*Renewable Energy System* RES) y la liberalización de los mercados. Una alta participación de RES intensifica la variabilidad e intermitencia de las fuentes de potencia, al afectar la operación óptima de los sistemas de potencia convencional y la confiabilidad de la red [3,43,42,66,68,9]. A medida que incrementa la participación de RES en el sistema, se acentúan estos efectos [21].

Con la proliferación de nuevas instalaciones de RES y subsecuente eliminación de generadores síncronos tradicionales, Wang y Yue [10] notan que se producen dos efectos, eliminación de respuesta inercial y pérdida de capacidad de estabilización del sistema.

Dadas las características de operación de un RES, no toda la energía podrá ser aprovechada instantáneamente por la demanda, ya sea porque la demanda no la requiere, o porque las líneas de transmisión no tienen capacidad de evacuar toda la generación instantánea que se esté generando en algún momento (*curtailment*).

- **Problemas de integración de los sistemas eólicos**

El principal recurso de los parques eólicos es el viento, pero la naturaleza intermitente del viento hace difícil predecir, programar y controlar de manera eficiente la generación de potencia eléctrica a partir de este [12,76].

Una de las mayores preocupaciones relacionadas con la alta penetración de parques eólicos es el impacto en la estabilidad del sistema de potencia relacionado con la regulación de frecuencia y estabilidad de voltaje. La generación de potencia activa de un parque eólico depende del flujo de viento y el diseño de la turbina generador, mientras que la respuesta de potencia reactiva depende de los dispositivos de conversión de electrónica de potencia. El parque eólico usualmente se instala en áreas remotas, y la potencia reactiva tiene que ser transportada por largas distancias, resultando en pérdida de potencia. Los parques eólicos conectados a la red causan fluctuación de

potencia y redistribución de la potencia reactiva que algunas veces lleva a desbalances del voltaje [76], especialmente en redes débiles (con grandes impedancias) [38].

Dados los problemas de la integración de parques eólicos, hay varias técnicas que se pueden utilizar para suavizar la salida de potencia del parque: 1. instalar un sistema de almacenamiento de energía ó 2. restringir la potencia de la planta eólica realizando control inercial de la energía cinética, control de *pitch* y ángulo, y control de voltaje del enlace DC [38]. Desde un punto de vista energético, el sistema de almacenamiento aprovecha en todo momento la energía del parque eólico, la opción 2 operaría el parque en un punto no óptimo. Adicionalmente, solo es posible hacer el control de forma asimétrica, es decir, reducir la potencia máxima que puede generar el parque, pero si eventualmente se requiere incremento en la potencia, no es posible hacerlo ya que la turbina es completamente dependiente del recurso disponible, la velocidad del viento [69].

### ● **Problemas de integración de los sistemas solares**

De manera análoga al caso eólico, en las plantas solares fotovoltaicas (PV) la salida de potencia de estas es muy impredecible y puede verse afectada por nubes pasajeras, hasta un 80% en cuestión de segundos según Hill, Such, Chen, Gonzalez y Grady [37]. La adición de RES PV a gran escala contribuirá a más fluctuación de la frecuencia y del voltaje (*flicker*) en el sistema eléctrico interconectado [68].

Las plantas PV no tienen masas rotativas como ocurre en la generación eólica, por lo que un parque solar no produce respuesta inercial cuando hay una perturbación en la red. Esta situación se empeora al retirar capacidad de generación tradicional, reduciendo inercia en la red [10]. Adicionalmente, una tasa de cambio tan alta en la generación exige que la reserva de capacidad programada también tenga una respuesta rápida, lo que es un servicio costoso y que desgasta más rápido las máquinas de generación tradicional [37].

A nivel de generación distribuida, Hill et al. [37] reportan que la integración de generación PV cambia el perfil de carga de la red, por lo que al incrementar la penetración se generarán oscilaciones repentinas de voltaje, activaciones de sistemas legados de protección diseñados para una red unidireccional y cambios en la generación ligados al régimen climático.

### ● **Problemática económica de la integración de ERNC**

Otro efecto indeseado que se ha manifestado con la integración de los RES en algunos mercados liberalizados, consiste en que, al salir despachadas las plantas RES con mayor prioridad y sin ningún tipo de reserva, obliga al sistema eléctrico a incrementar los requerimientos de reserva operativa, con plantas de energía convencional, siendo estas cada vez más llamadas a prestar servicios auxiliares en vez de servicios de energía [1,49,9]; esta situación no es sostenible, por lo que la regulación eléctrica de algunos países ya exige que los RES provean algunos servicios auxiliares que refuercen la confiabilidad y seguridad de la red [12,39]; sin embargo, los RES solas no pueden asumir estas funciones.

Según Katsanevakis, Stewart y Lu [66] y Akinyele y Rayudu [75], la integración de generación eólica tiene un costo para el sistema eléctrico; por cada 10% de incremento en la penetración de potencia en el sistema, se requiere el ingreso de otro 2-4% de la capacidad de potencia de energía renovable en generadores convencionales para ayudar en el balance y estabilidad del sistema eléctrico interconectado.

Una situación que se da en varios mercados eléctricos consiste en que el insumo de potencia reactiva no se paga como servicio diferenciado; por esta condición las plantas PV, aun con la capacidad de proveer potencia reactiva, solo proveen potencia activa que es la que genera beneficios económicos. Si la estructura del mercado fuera diferente, los sistemas RES que cuentan con sistemas de electrónica de potencia con facilidad podrían ayudar en el servicio auxiliar de soporte de potencia reactiva [37].

## 2.2 Smart Grid

Desde un punto de vista generalizado, la *Smart Grid* es el sistema macro que permitirá solucionar de manera armónica la integración de todas las ERNC a la red eléctrica. La *Smart Grid* comprende todo lo relacionado con los sistemas eléctricos entre cualquier punto de generación y cualquier punto de consumo [82]. La *Smart Grid* utiliza productos y servicios que, junto con monitoreo inteligente, control, comunicaciones y tecnologías de autoreparación permiten 1) facilitar la conexión y operación de generadores de todos los tamaños/tecnologías y 2) proveer niveles mejorados de confiabilidad y seguridad del suministro energético.

Desde su conceptualización inicial, tanto las fuentes de generación con fuentes renovables como los sistemas de almacenamiento de energía han hecho parte de la *Smart Grid* y según lo propuesto por Ravikumar, Rathod, Jaiswal, Patil y Shukla [57], la mejor opción para integrar fuentes de energías renovables a la red es desarrollar redes locales que involucren RES con sistemas de almacenamiento de energía.

## 2.3 Sistemas de almacenamiento de energía

La electricidad en su forma natural no es almacenable. La única forma por medio de la cual puede ser almacenada es convirtiéndola a una forma de energía que sea almacenable de manera tal que se pueda convertir en electricidad cuando se necesite [73,51]. Tal proceso permite producir electricidad en momentos de ya sea: baja demanda, bajo costo de generación o de fuentes de energía intermitente y ser usada en momentos de alta demanda, alto costo de generación o cuando no hay otro medio de generación disponible [3]. El almacenamiento de energía es una tecnología de integración que permite la administración de la energía entre la oferta y la demanda [9, 61]. En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede encontrar una expansión de conceptos básicos de los sistemas de almacenamiento de energía.

Los ESS agregan flexibilidad al sistema y pueden proveer servicios auxiliares como: arbitramento de energía eléctrica, suministro de capacidad eléctrica, seguimiento de carga, regulación de frecuencia, capacidad de reserva de suministro eléctrico, soporte de voltaje, soporte de transmisión, alivio de congestión de transmisión, diferimiento de actualización de transmisión y distribución (T & D), potencia en sitio para subestación, gestión del costo de energía tiempo-de-uso (TOU), gestión de la carga de la demanda, confiabilidad del servicio eléctrico, calidad de la potencia del servicio eléctrico, arbitramento de energía de fuentes renovables, afirmado de la capacidad de energía de fuentes renovables, integración a la red de la generación renovable [78,56,12,1]. Con la concreción de estos servicios se hace realidad la visión de la *Smart Grid* como habilitadora de aplicaciones de bajo costo, duraderas y eficientes [59,32]. En el Anexo 3. Definición de los servicios ESS se encuentran las descripciones de cada uno de los servicios ESS anteriormente listados.

La producción de energía se puede hacer de manera independiente de la demanda por medio de los ESS. Con una gran capacidad de almacenamiento disponible de electricidad, la capacidad de generación eléctrica se puede diseñar en términos de necesidades promedio en vez de necesidades pico [59,56,3].

Dado que aún con los esfuerzos de reducir emisiones hay plantas que utilizan combustibles fósiles para atender la demanda pico, esta cuota de generación, al cambiarse por ESS, puede ayudar a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y mitigar el impacto ambiental del sector energético [73,3]

Entre las distintas tecnologías de almacenamiento de energía, específicamente la tecnología de almacenamiento electroquímico con baterías secundarias (*Battery Energy Storage System* BESS) se considera una opción prometedora para el almacenamiento de electricidad de gran escala debido a la flexibilidad, alta eficiencia de conversión de energía y mantenimiento simple [70].

## ● Servicios de los ESS a la red

No existe una lista única de servicios de ESS a la red, a lo largo de la revisión de literatura se encontraron listas de los servicios según el nicho de aplicación sin ser exhaustivos. En este estudio se toma como base la lista de Eyer [78] y se enriquecieron las definiciones con la información provista en [74,42,66,49,71,75]. En la Tabla 1 se listan los servicios que puede proveer un ESS. Para mayor profundidad en la definición de cada servicio ESS, se puede consultar el Anexo 3. Definición de los servicios ESS.

Integrar servicios de almacenamiento de energía en el sistema de potencia permite tener los siguientes beneficios: despachabilidad, cubrimiento al riesgo, arbitramento de energía, alto aprovechamiento de la energía, estabilidad y mejor calidad de la potencia. Si las redes con alto nivel de penetración de RES no tienen almacenamiento, serán susceptibles de: impredecibilidad, bajo aprovechamiento de la energía, congestión, problemas de seguridad, calidad y confiabilidad en la red [76,75].

Tabla 1 Servicios que puede proveer un ESS

Categoría del servicio	Servicio
Suministro eléctrico	1. Arbitramento de energía eléctrica
	2. Suministro de capacidad eléctrica
Servicios auxiliares	3. Seguimiento de carga
	4. Regulación de frecuencia
	5. Capacidad de reserva de suministro eléctrico
	6. Soporte de voltaje
Sistema de red (T&D)	7. Soporte de transmisión
	8. Alivio de congestión de transmisión
	9. Diferimiento de actualización de transmisión y distribución (T & D)
	10. Potencia en sitio para subestación
Usuario final /Cliente de la <i>utility</i>	11. Gestión del costo de energía tiempo-de-uso (TOU)
	12. Gestión de la carga de la demanda
	13. Confiabilidad del servicio eléctrico
	14. Calidad de la potencia del servicio eléctrico
Integración energía renovable	15. Arbitramento de energía de fuentes renovables
	16. Afirmado de la capacidad de energía de fuentes renovables
	17. Integración a red de la generación renovable

---

- **Requerimientos de los servicios ESS en la red**

Tampoco existe una especificación formal de los requerimientos de los servicios ESS, en la revisión de literatura se encontraron las definiciones de requerimientos en forma de tablas [57] y [42] y en forma gráfica como en [73]; sin embargo, se adopta lo propuesto por Eyer [78] al considerarse más completo respecto a la cantidad de servicios descritos y ser la única referencia que cuantifica con claridad los rangos de capacidad demandada y duración de los servicios ESS.

La Tabla 2 resume los requerimientos de los servicios ESS, entendidos en el contexto del sistema eléctrico de Estados Unidos extraídos de [78]. La Tabla 2 contiene la caracterización básica de cada tipo de servicio ESS con una descripción del rango de potencia aplicable y el rango de duraciones esperadas del servicio.

Los distintos requerimientos o niveles de desempeño de los servicios de energía eléctrica están estrechamente ligados con el código de red de cada país de aplicación. En Colombia existe un código de red que está en revisión, allí se propondrán los aspectos a exigir a los RES que se integrarán al Sistema Interconectado Nacional. Sin embargo, no se espera que las diferencias de la nueva normatividad Colombiana sean representativas respecto al referente bibliográfico; dado que el desempeño a exigir lo definen las tecnologías disponibles en el mercado mundial y los demás códigos de red existentes de países desarrollados, como el definido por CAISO de Estados Unidos y NEM de Australia en las cuales los entes reguladores del sector eléctrico Colombiano se referencian [83].

Tabla 2 Requerimientos de los servicios ESS

Servicios	Duración de la descarga *		Capacidad kW, MW		Referente
	Bajo	Alto	Bajo	Alto	
1. Arbitramento de energía eléctrica	2	8	1 MW	500 MW	[78]
2. Suministro de capacidad eléctrica	4	6	1 MW	500 MW	[78]
3. Seguimiento de carga	2	4	1 MW	500 MW	[78]
4. Regulación de frecuencia	15 min.	30 min.	1 MW	40 MW	[78]
5. Capacidad de reserva de suministro eléctrico	1	2	1 MW	500 MW	[78]
6. Soporte de voltaje	15 min.	1	1 MW	10 MW	[78]
7. Soporte de transmisión	2 sec.	5 sec.	10 MW	100 MW	[78]
8. Alivio de congestión de transmisión	3	6	1 MW	100 MW	[78]
9. Diferimiento de actualización de transmisión y distribución (T & D)	3	6	250 kW	5 MW	[78]
10. Potencia en sitio para subestación	8	16	1.5 kW	5 kW	[78]
11. Gestión del costo de energía tiempo-de-uso (TOU)	4	6	1 kW	1 MW	[78]
12. Gestión de la carga de la demanda	5	11	50 kW	10 MW	[78]
13. Confiabilidad del servicio eléctrico	5 min.	1	0.2 kW	10 MW	[78]
14. Calidad de la potencia del servicio eléctrico	10 sec.	1 min.	0.2 kW	10 MW	[78]
15. Arbitramento de energía de fuentes renovables	3	5	1 kW	500 MW	[78]
16. Afirmado de la capacidad de energía de fuentes renovables	2	4	1 kW	500 MW	[78]
17.1 Integración a red de la generación renovable. Corta duración	10 sec.	15 min.	0.2 kW	500 MW	[78]
17.2 Integración a red de la generación renovable. Corta duración	1	6	0.2 kW	500 MW	[78]

\* Horas a menos que se indique lo contrario. Min=minutos, sec.= segundos.

## 3 Metodología

### 3.1 Criterios de inclusión y exclusión

#### 3.1.1 Criterio de inclusión

Se seleccionaron los artículos que intersectan los tres temas de interés: generación con fuentes renovables, *Smart Grid* y sistemas de almacenamiento de baterías en plantas de generación con potencias nominales mayores a 1 MW. La definición de un rango “*utility scale*” no es única; sin embargo, para un sistema de almacenamiento de energía se elige 1 MW de potencia como la potencia a partir de la cual se centrará el estudio de revisión sistemática.

Inicialmente se hicieron búsquedas abiertas que recuperan todo el historial de los artículos resultantes de las cadenas de búsqueda; cuando se encontró una referencia interesante a artículos de *review* amplios, se limitó el año inicial de los resultados de búsqueda al año de publicación del artículo de *review*, en este estudio se eligió el año 2012, esto con el fin de no recolectar mucha información redundante ya sintetizada en dichos tipos de artículos.

#### 3.1.2 Criterio de exclusión

Se eliminaron referencias a los siguientes campos de aplicación que, aunque eventualmente relacionados, desvían el objetivo del estudio:

- Sistemas aislados (*isolated*), en “islas” (*island*), *off-grid*
- Sistemas de baterías para vehículos eléctricos
- Sistemas tipo *microgrid*, *residential*, *low voltaje*, referencia a sistemas con potencias nominales inferiores a 1 MW, en el orden de los KW.
- Sistemas de pronóstico
- Sistemas de almacenamiento térmico (*Thermal storage*)
- Algoritmos, pruebas o diseños específicos a subsistemas de los sistemas de almacenamiento de baterías, *Smart Grid* o plantas de generación que no se relacionan  
Análisis de costos o factibilidad de las tecnologías de estudio.

La exclusión de artículos se realizó de dos formas: 1) utilizando palabras clave de exclusión en las cadenas de búsqueda y 2) exclusión manual de artículos obtenidos de la consulta de la cadena de búsqueda. La exclusión manual consistió en la lectura y análisis del *abstract* del artículo y evaluación

de la pertinencia del artículo aplicando los criterios de exclusión descritos. La segunda forma de exclusión se debe a que, con facilidad en un artículo potencialmente relevante, se puede mencionar algún término que no sea de interés, sin implicar que por la existencia de dicha palabra sea necesario descartar el artículo. Por ejemplo, es muy fácil encontrar mención de las otras aplicaciones de sistemas de almacenamiento de energía como microrredes, o vehículos eléctricos sin que los artículos se centren en estas aplicaciones.

## 3.2 Fuentes de información

Dada la cobertura de publicaciones indexadas y revisadas por pares, se usó la base de datos *Scopus* como fuente de literatura científica e ingenieril para el estudio.

Para el referenciamiento de aplicaciones actuales con BESS se utilizó el “*DOE Global Energy Storage Database*” [77], principalmente para responder las preguntas de investigación 7 y 4 con información actualizada.

## 3.3 Cadena de búsqueda

Se utilizaron las siguientes cadenas de búsqueda para definir la base de selección de los artículos que se revisaron manualmente para su posterior estudio:

**Cadena 1:** TITLE ( "energy storage" AND review ) AND TITLE-ABS-KEY ( ( renewable OR wind OR solar OR photovoltaic OR pv ) AND ( grid ) )

**Cadena 2:** ( TITLE ( battery ) AND TITLE-ABS-KEY ( "energy storage" AND ( large OR utility ) AND ( renewable OR wind OR solar OR photovoltaic OR pv ) AND ( grid ) ) )

**Cadena 3:** ( TITLE ( nas OR "Lithium" OR "Flow Batteries" OR "Advanced Lead-Acid" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "energy storage" AND ( large OR utility ) AND ( renewable OR wind OR solar OR photovoltaic OR pv ) AND ( grid ) ) )

**Cadena 4:** ( TITLE ( ( "energy storage" AND NOT ( micro OR \*icrogrid\* OR \*icro-grid\* OR island OR residential OR house\* OR small OR \*hermal ) ) ) AND TITLE-ABS-KEY ( ( batter\* AND integrat\* AND ( large OR utility ) AND ( renewable OR wind OR solar OR photovoltaic OR pv ) AND ( grid ) ) ) ) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2017 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2016 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2015 ) )

**Cadena 5:** ( TITLE-ABS-KEY ( ( batter\* AND integrat\* AND ( large OR utility ) AND ( grid ) ) ) AND TITLE ( "energy storage" AND ( renewable OR wind OR solar OR photovoltaic OR pv ) AND NOT ( micro OR \*icrogrid\* OR \*icro-grid\* OR island OR residential OR house\* OR small OR \*hermal ) ) )

## 4 Resultados de búsqueda

Al aplicar las cadenas de búsqueda se recuperaron de manera automática 583 artículos. Algunos de dichos artículos son redundantes respecto a cadenas de búsquedas anteriores, por lo que se consolidan en registros únicos por cadena de búsqueda; luego, se realizó una selección manual, como se describe en la sección de metodología, finalmente se seleccionaron 76 artículos. En la Tabla 3 se presenta el resumen de la cantidad inicial de artículos encontrados, artículos únicos, artículos seleccionados según los criterios de inclusión y exclusión.

Tabla 3 Resultados de las búsquedas y artículos seleccionados

<b>Cadena de búsqueda</b>	<b>Recuperados automáticamente</b>	<b>Registros únicos por cadena</b>	<b>Seleccionado utilizando criterios de inclusión y exclusión en revisión manual</b>	<b>Descartados utilizando criterios de inclusión y exclusión en revisión manual</b>
Cadena 1	39	39	18	21
Cadena 2	361	342	46	296
Cadena 3	60	4	1	3
Cadena 4	50	28	7	21
Cadena 5	73	26	4	22
Artículos sujetos de análisis en la revisión sistemática			76	

### 4.1 ¿Qué autores y qué países lideran la investigación?

En la Tabla 4 se listan los autores con mayor cantidad de publicaciones; sin embargo, esto no es indicador del grado de impacto que tengan en el medio científico. Se resalta el trabajo de Chen, L y Hu, Y.S. con investigaciones centradas en baterías de ion de sodio, son los autores del artículo más citado en toda la bibliografía de análisis (929 citaciones), este hecho refleja de manera directa el interés actual de la comunidad científica en el desarrollo de baterías de ion de sodio a temperatura ambiente. Los trabajos de Bayne, S.B.(10 citaciones), con investigaciones enfocadas a analizar la interrelación de sistemas eólicos acoplados a sistemas de almacenamiento con baterías; Cai (3 citaciones), con sistemas de control que integran sistemas eólicos y de almacenamiento de energía a la red eléctrica y Jiang,K (60 citaciones), con investigaciones en baterías de metal líquido; aunque

sobresalen por la cantidad de publicaciones, el volumen total de citas no indica un impacto tan alto en la comunidad científica. En la siguiente sección se complementa la identificación de los autores más relevantes.

Respecto a los países que lideran la investigación, China tiene la mayor cantidad de publicaciones recientes, seguida de Estados Unidos y Australia.

Tabla 4 Autores que lideran la investigación

<b>Autores</b>	<b>Artículos</b>
Bayne, S.B	3
Chen, L.	3
Cai, G.	2
Hu, Y.S.	2
Jiang, K.	2

Tabla 5 Países que liderarán la investigación

<b>Países</b>	<b>Artículos</b>
China	17
Estados Unidos	15
Australia	10
India	6
España	6

## 4.2 ¿Cuáles son los artículos y autores más citados?

De acuerdo con los registros de *Scopus*, los artículos más citados se relacionan en la Tabla 6, sobresale por amplia ventaja el estudio de baterías de ion de sodio, más adelante se entenderán las razones de dicha tendencia. Los siguientes artículos más citados están relacionados con la integración de sistemas de almacenamiento de baterías con sistemas solares o eólicos, 3 artículos son de *review* y 2 son artículos de investigación en el sector energético.

Tabla 6 Artículos más citados

<b>Autores</b>	<b>Artículos</b>	<b>Citaciones</b>
Pan H., Hu Y.-S., Chen L.	Room-temperature stationary sodium-ion batteries for large-scale electric energy storage [27]	897
Hill C.A., Such M.C., Chen D., Gonzalez J., Grady W.M.	Battery energy storage for enabling integration of distributed solar power generation [37]	224
Zakeri B., Syri S.	Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis [3]	173
Zhao H., Wu Q., Hu S., Xu H., Rasmussen C.N.	Review of energy storage system for wind power integration support [2]	152
Soloveichik G.L.	Battery technologies for large-scale stationary energy storage [16]	137

### 4.3 ¿Cuáles son los principales revistas y congresos?

Las principales revistas del grupo de artículos seleccionado son: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* y *Applied Energy*. En la Tabla 7 se presentan las principales 5 revistas y congresos.

Tabla 7 Principales revistas y congresos

Revista	Artículos por revista en literatura seleccionada
Renewable and Sustainable Energy Reviews	6
Applied Energy	3
2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015	2
Dianwang Jishu/Power System Technology	2
Electric Power Systems Research	2

A nivel de congresos, solo sobresale el: “*IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*” con 3 artículos del grupo.

Se identifican algunos patrones entre las distintas publicaciones. El 65 % de las publicaciones seleccionadas fueron publicadas por 38 revistas y eventos relacionados directamente con la palabra clave “Energía” o “Potencia”. El campo de estudio de la energía es muy amplio y las distintas publicaciones pueden cubrir múltiples disciplinas como la ingeniería de eléctrica, de materiales, química; sostenibilidad, análisis financiero, ciencias de la decisión, etc. El campo de estudio de “Potencia” está altamente relacionado con sistemas eléctricos de potencia y las publicaciones de este campo normalmente se enfocan en aspectos ingenieriles propios de los sistemas eléctricos.

El 18 % de las publicaciones seleccionadas fueron publicadas por 6 revistas o eventos relacionados directamente con la palabra clave “Sostenibilidad” o “Renovable”. En estas publicaciones se presenta una variabilidad de disciplinas similar a la encontrada en las publicaciones del campo “Energía”.

### 4.4 ¿Cuál es el tipo de literatura a analizar?

Respecto a las categorías de documentos, en la selección de artículos se identifican publicaciones científicas primarias y secundarias. Entre las primarias están los artículos y *papers* de conferencia que totalizan aproximadamente el 79% de las publicaciones. Debido al ciclo ordinario de producción de las publicaciones científicas y, haciendo la salvedad de que existen casos particulares con revistas y conferencias de alto prestigio que tienen protocolos propios y rigurosos de revisión de pares; es de esperar que los artículos hayan pasado por un proceso más arduo de selección comparados con las publicaciones hechas en conferencias debido a dos razones: 1) una publicación en revista indexada puede pasar por varios ciclos de revisión antes de ser considerada meritoria de publicación, con tiempos de revisión relativamente extensos; mientras que las publicaciones para conferencias y congresos tienen la presión implícita de consolidar la base de publicaciones para las fechas de realización del evento, lo que motiva a tener ciclos más ágiles de revisión de las publicaciones. 2) Las

conferencias o congresos se enfocan en una temática que esté vigente en el campo científico y será un filtro natural para las producciones que solo tengan un aporte marginal al tema central.

Las publicaciones científicas secundarias son artículos de *review* y capítulos de libros recientes que totalizan el 21% de la literatura seleccionada. El valor que agrega al estudio contar con las publicaciones secundarias es la de tener información sintetizada, que sirva como base a partir de la cual se pueda cimentar el marco de conocimiento que se busca construir con el análisis de la literatura científica. A continuación, se presenta la Tabla 8 Tipo de literatura a analizar.

Tabla 8 Tipo de literatura a analizar

Tipo de documento	Cantidad de artículos
Artículo	34
Paper de conferencia	26
Review	14
Capítulo de libro	2
Total general	76

## 4.5 ¿Cuáles revisiones de literatura han sido publicadas?

En la selección de literatura realizada, dado que se cubren varios campos de conocimiento que se integran en la aplicación de generación de energía con fuentes renovables, se identifican alrededor de 14 artículos categorizados por SCOPUS como de tipo *review*.

Hay alta diversidad entre los tipos de *review* encontrados, como por ejemplo: aplicaciones prácticas, sistemas de baterías de distintas tecnologías, *review* de integración a la red de sistemas de almacenamiento para energía eólica e integración para energía fotovoltaica.

Tabla 9 Artículos de *review* más citados

Artículo de <i>review</i>	Año	Citaciones
Room-temperature stationary sodium-ion batteries for large-scale electric energy storage [27]	2013	897
Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis [3]	2015	173
Battery technologies for large-scale stationary energy storage [16]	2011	137
Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review [64]	2013	114
Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review [73]	2016	42

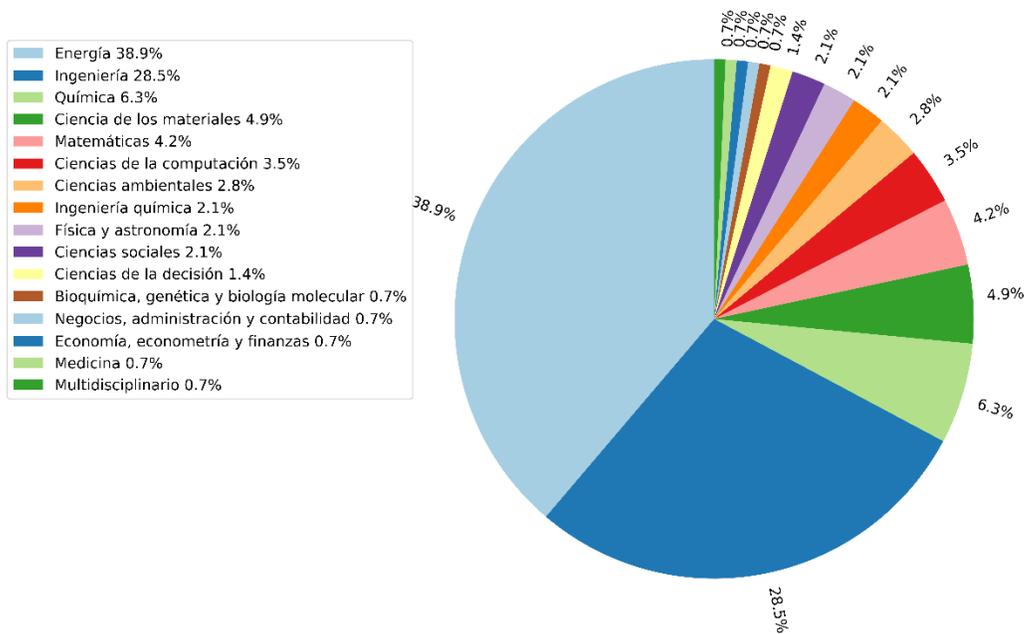
## 4.6 ¿Cuáles son las limitaciones de la investigación actual?

El tema de estudio es extenso y multidisciplinario, se cubren aspectos de mercados energéticos, electroquímica, modelos matemáticos, ciencia de los materiales, ingeniería eléctrica, electrónica, ciencias de la computación, todos centrados alrededor del tema común de la energía.

En la Figura 1 se construyó un gráfico circular que permite apreciar la distribución de áreas de conocimiento respecto a los artículos seleccionados. Aproximadamente dos tercios de la selección se categorizan en las áreas de conocimiento de la energía e ingeniería, el resto de áreas ocupan el otro tercio.

Se realizó el mejor esfuerzo de seleccionar la mejor literatura disponible a partir de una base de 439 referencias bibliográficas únicas; a pesar de esto, con algunos cambios a la cadena siempre es posible encontrar artículos potencialmente interesantes que podrían engrosar la base de literatura a estudiar. Sin embargo, fue necesario acotar el alcance del estudio, así surgiera la posibilidad de que no se haya abordado el 100% de la literatura pertinente, en especial la que utiliza palabras claves poco ortodoxas en el área de conocimiento.

Figura 1 Clasificación de documentos por áreas de conocimiento





## 5 Discusión

A continuación, se responderá cada una de las respuestas de investigación.

### 5.1 ¿Cuál es el desempeño de las tecnologías estudiadas en relación con los servicios de la Smart Grid?

La respuesta a esta pregunta se analizará desde dos aspectos, las tecnologías específicas de las baterías y las tecnologías de los sistemas periféricos del BESS. Adicionalmente, las tecnologías de baterías se subdividirán en dos categorías de acuerdo con el nivel de madurez: 1) tecnologías maduras, probadas comercialmente y con amplia difusión y; 2) tecnologías emergentes, que están en un grado de desarrollo de laboratorio o con implementaciones de proyectos piloto.

#### 5.1.1 Desempeño de tecnologías de baterías maduras

En la Tabla 10 se presenta la consolidación del desempeño reportado por las distintas publicaciones analizadas [57,74,26,40,60,73,32,38,5,3,51,75,25,16], a pesar de las situaciones descritas en la sección de calidad de datos, se hace el mejor esfuerzo por consolidar la información más confiable.

- **Calidad de los datos**

En el proceso de consolidación se encuentran diferencias entre las magnitudes de las características de desempeño, esto es debido a varios factores que hay que notar:

- **Tiempo en el que fue registrada la característica técnica.**

Los datos de desempeño consolidados vienen de fuentes de información primarias y secundarias. Las fuentes primarias suelen estar actualizadas, pero suelen medirse para una fuente específica. Las fuentes secundarias tienen la ventaja de consolidar la información a nivel más amplio, pero tiende a ser información más antigua. El resultado final es que, aunque la publicación sea del último año, los datos de desempeños reportados no están actualizados. Por ejemplo, las fuentes de Alhamali, Farrag, Bevan y Hepburn [74], una de las más completas, fue construida a partir de publicaciones que se dieron en el período 2009-2013, al tener en cuenta que, si la fuente de información es un “*handbook*”, los datos reportados son aún más antiguos.

Se encontró en la literatura varios referentes [73,3,51,75] a una capacidad nominal de potencia de las baterías de litio de 100 kW, esto se debe a que son referentes antiguos, ya que hoy día existen comercialmente sistemas de más de 100 MW.

- **Criterios de definición de la característica técnica**

Aunque existe cierto nivel de entendimiento de lo que significa una característica técnica, las condiciones y formas en las que se mide y reporta pueden tener muchas variantes. Por lo que los valores reportados se deben interpretar como indicativos generales. Por ejemplo, las características técnicas de tiempo de descarga, ciclos de vida y eficiencia están muy ligados al tipo específico de uso que se haga de las baterías, su desempeño no se describe con un número. Es frecuente encontrar en la literatura diferentes grados de precisión reportada. Por ejemplo, la característica ciclos de vida se encontró reportada con tres grados de exactitud: un número, un rango y un número especificando las condiciones particulares de operación (e.g. *Depth of Discharge DoD*). Si una batería de ion de litio es operada a 90% DoD, se puede esperar que tenga un ciclo de vida de 2000 ciclos, por el otro lado, si el DoD es más superficial, e.g. 70%, la expectativa es 2800 [66]. Otro ejemplo de esta afirmación es lo expresado por Fu, Le, Wang, Liu y Jia [40], en la que reportan que las tecnologías plomo-ácido puede lograr 4500 ciclos de vida, igualándola a la tecnología de litio. Aunque esta situación es factible, solo en situaciones muy particulares, no es el caso típico.

Para el caso de la característica eficiencia, existen múltiples formas de medirla y conceptualarla, puede ser para todo el sistema o la eficiencia Coulombica, por lo que hay que considerarla con cuidado.

- **Agregación de múltiples variantes de una misma tecnología en la misma categoría**

Otra situación que explica las diferencias entre los distintos valores reportados es que pueden existir múltiples variantes tecnológicas y el reporte se puede hacer por la característica promedio o la más optimista. Por ejemplo, el reporte de eficiencia para las baterías de plomo-ácido de Ravikumar et al. [57] es de 70-76% mientras que Aneke y Wang [73] reportan más de 85%, sin embargo, la trazabilidad completa de los tipos específicos de tecnología y condiciones de operación, no se tienen.

- **Gazapos o errores**

Eventualmente se encuentran errores evidentes que dan una señal de ligereza en la revisión de los artículos en las revistas indexadas. En Zhao, Wu, Hu, Xu y Rasmussen [51] se encuentran afirmaciones de cantidades muy desproporcionadas con el rendimiento típico de las baterías. Por ejemplo, para el caso de baterías de ion de litio se reportan densidades de potencia entre 1300-10.000 W/l y ciclos de vida entre 5 y 100 años, contrastando con una vida útil en ciclos entre 600-1200. Esta situación hace dudar de la confiabilidad de las fuentes o el rigor en la recolección de los datos.

- **Diferencias dentro de la misma publicación prosa vs. tablas**

Es frecuente encontrar afirmaciones en prosa propias o citando algún artículo que referencia alguna característica de desempeño y luego, en el mismo artículo encontrar en alguna tabla sumario referencia a otras cantidades para la misma característica. Se toma como ejemplo ilustrador el artículo de Zakeri y Syri [3], en la sección de baterías de ion de litio se referencia un desempeño de más de 10.000 ciclos de vida útil de la tecnología; pero en la tabla anexo se referencia que el rango de vida útil de la tecnología está entre 2000-4500. Esta situación es una consecuencia de que, por conservar la fidelidad de las fuentes citadas, se sacrifica algo de consistencia en las cantidades reportadas en los artículos para una misma característica, lo que genera cierta ambigüedad.

Tabla 10 Desempeño de las principales tecnologías de baterías para almacenamiento de energía de gran escala

	plomo-ácido	B. níquel		B. litio		B. sodio	B. Redox flow	
		níquel-cadmio	níquel metal-hidruro	Li-ion	NaS	ZEBRA	vanadio	zinc-bromuro
Eficiencia*	70-90	60-80	70-75	90-98	75-90	90	75-85	65-75
Potencia nominal [MW]	0-20	0-40	~0-0.2	0.1-5	0.5-50	<1	0.37-7	0.5-2
Energía nominal [MW]	~0-100	~0-1.5	~0-0.5	~0-100	~60	0.12-5	0.1-10	0.05-40
Densidad de potencia [kWh/m3]	90-700	75-700	500-3000	1300-10000	120-160	250-270	0.5-2	01-25
Densidad de energía [kWh/m3]	50-80	60-150	<350	250-620	<400	150-200	20-35	30-60
Potencia específica [W/kg]	75-300	150-300	700-756	230-340	90-230	130-160	96	50-150
Energía específica [Wh/kg](lim 170)	30-50	50-75	60-120	100-250	150-250	100-120	28	60-80
Tiempo de descarga [h]	s-h	s-h	h	mín-días	s-h	s-h	s-10h	s-10h
Tiempo de respuesta	ms	ms	ms	ms-s	ms	ms	<1ms	<1ms
Tiempo de vida [ciclos]**	200-1500(80% DoD)	1500-3000	300-500	4500	4500	1000-2500	12000	2000
Tiempo de vida [años]	3-15	10-20	5-10	5-15	12-20	12-20	5-20	5-10
Duración del almacenamiento []	min-días	min-días	-	min-días	s-h	s-h	h-meses	h-meses
Autodescarga por día [%]	0.1-0.3	0.2-0.6	0.4-1.2	0.1-0.3	20	15	0.1	0.1
Tiempo de recarga	8-16h	1h	2-4h	min-h	9h	6-8h	min	3-4h
Costo de inversión potencia [USD/kW]	200-650	350-1000	120% NiCd	700-3000	700-2000	150-300	600-1500	100-2500
Costo de inversión energía [USD/kWh]	200-400	200-1000	120% NiCd	200-1800	200-900	100-200	150-1000	150-1000
Mantenimiento	Requiere [57,26,74,60,73,32,38,5,51,7]	Requiere [26,74,60,38,5]	Requiere	No requiere	-	-	Requiere	Requiere
Referencia	[5,25,38,3,16]	[1,75,25,16]	[74,26,32]	[57,74,60,73,3]	[57,74,73,32,3]	[74,60,73,5,3,7]	[74,60,73,5,3,5]	[74,60,73,3,51,25,38,5,75,16]

● **Hallazgos**

Respecto a las baterías plomo-ácido, Posada et al. [26] y Masebinu, Akinlabi, Muzenda, Aboyade y Mbohwa [60] resaltan que puede haber mejoras en el desempeño con la tecnología de válvula regulada y la adición de carbono al material del electrodo negativo. Adicionalmente, Masebinu et al. [60] resaltan la mejora en desempeño con el uso de aditivos como el selenio y el antimonio. Son la tecnología más barata en costo de inversión por kWh. Las baterías de plomo ácido tradicionales requieren mantenimiento. Las Ultrabaterías, una variante de la tecnología plomo-ácido, son capaces de eliminar la sulfatación en los electrodos al utilizar tecnologías de capacitor asimétrico para alargar la vida de la batería de manera consistente.

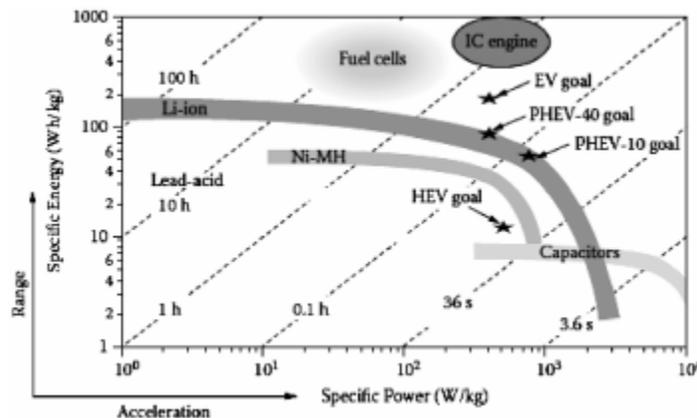
Las baterías de *Redox flow* tienen un nivel de autodescarga muy bajo, las baterías de plomo-ácido, níquel-cadmio y ion de litio exhiben un nivel de autodescarga intermedia y las baterías NaS presentan un alto nivel de autodescarga [74].

Las baterías de zinc-aire tienen alta densidad de energía, pero sufren de baja eficiencia [73]. Las baterías de Li-ion, NaS y ZEBRA tienen las mayores densidades de energía, las baterías de *Redox flow* tienen una densidad de energía menor.

De acuerdo con Zaghbi, Mauger y Julien [5] las baterías de níquel (níquel-cadmio, níquel-hidruro de metal, níquel-zinc) son las segundas más utilizadas en el mercado, después de las baterías de plomo-ácido. Sirven un mercado especial en el que se debe almacenar energía en un clima extremo, ya que su temperatura de operación se extiende hasta -40°C, mientras que las baterías de ion de litio solo operan hasta -20°C. Como diferenciador, las baterías de níquel hidruro no tienen el efecto de memoria de las baterías níquel-cadmio [16].

Otra forma de apreciar el desempeño de los sistemas de almacenamiento es a través del diagrama *Ragone*. En el mismo gráfico se pueden observar las características de potencia y energía de las tecnologías específicas [35]. En la Figura 2, se puede apreciar la interrelación que hay entre la Energía-Potencia específica y el tiempo de descarga. Tomando como ejemplo las baterías ion de litio, se aprecia que, si se deseará un mayor nivel de descarga, con una potencia específica mayor, se sacrificaría la energía específica, por lo que el desempeño óptimo de la tecnología en la actualidad es lo reportado en la Tabla 10.

Figura 2 Energía específica Vs. Potencia específica. Imagen tomada de [64], a su vez está basado en el Energy Storage Handbook de 2011



Se resalta que la potencia se modifica incrementando el área de contacto del electrodo, el número de electrodos en un *cell stack* y el número de *stacks* en el sistema. La capacidad de almacenamiento se incrementa con el volumen del electrolito y/o la concentración de especies activas [33].

### 5.1.2 Desempeño de tecnologías de baterías emergentes

En la literatura revisada se encuentra gran variedad de tecnologías que se están investigando en múltiples estados de madurez. Específicamente, las investigaciones realizadas o reportadas por [26, 32, 33, 40, 46, 70, 71], se consideran tecnologías emergentes ya que centran sus investigaciones en el desempeño de celdas de laboratorio en las que no se parametrizan todas las características técnicas descritas en la Tabla 10. Principalmente, se describe el desempeño con base en las densidades de potencia y energía y capacidades en mAh/cm<sup>2</sup> ó mAh/g; sin embargo, estos indicadores no reflejan directamente como se desarrollará la implementación final, a gran escala, con las implicaciones ingenieriles de un montaje real. Por ejemplo, las baterías sodio-sulfuro tiene buen desempeño respecto a la autodescarga, virtualmente cero; sin embargo, el hecho de tener que alimentar el sistema a temperaturas relativamente altas genera un consumo de energía en el sistema que se podría interpretar como una “auto-descarga” que llega a los niveles de 20% por día, hecho que tiene implicaciones fuertes en el desempeño final del sistema.

#### • Baterías ion de sodio (SIB)

La SIB están en un nivel incipiente de desarrollo; sin embargo, tienen un alto potencial debido a varias características que perfilan esta tecnología a tener un futuro prometedor como son: la alta disponibilidad del sodio como material principal en vez del litio que es mucho más escaso y la posibilidad de operar a temperatura ambiente [70].

Se ha logrado encontrar materiales de electrodo positivo (compuesto tipo O3) y negativo (carbón duro) que logran un desempeño aceptable. Entre las compañías CNRS y RS2E se desarrolló y están comercializando una celda que garantizará 2000 ciclos con una densidad energética de 90 Wh/kg; estas baterías son pequeñas, para aplicaciones portátiles, todavía no hay desarrollos a escala de red [70]. Adicionalmente, a nivel de laboratorio, las celdas demuestran alta seguridad al no generar fuego o humo ante las pruebas de seguridad que incluyen: penetración con clavos, corto circuito y sobrecarga.

#### • Baterías de metal líquido (LMB)

Respecto a las celdas LMB estudiadas en [40], se han probado tres variantes sodio-bismuto (Na-Bi), magnesio-antimonio (Mg-Sb) y litio-plomo-antimonio (Li-Pb-Sb), todas son baterías que trabajan a muy altas temperaturas, para poder fundir los electrodos metálicos.

La batería Na-Bi ha resultado demasiado costosa (770\$ kWh<sup>-1</sup>) en su elaboración, esta es justificación suficiente para no explorar su desarrollo, en vista que se tienen otras alternativas.

La celda de Mg-Sb aunque se podría construir con materiales disponibles y baratos, adolece en varios factores como limitación de la densidad de corriente, y disminución de la capacidad de la celda con el incremento de ésta; problemas de corrosión con el ciclado (después de 30 ciclos) abriendo la celda; problemas de operación a altas temperaturas que adicionalmente pueden tener el problema de evaporar el electrolito de sales fundidas [40].

La celda de Li-Pb-Sb tiene problemas debido a la alta solubilidad del electrodo negativo en su sal fundida y la alta temperatura de operación que afecta el LMB. Para bajar el punto de fusión se usa Pb; sin embargo, es la variante que mejor desempeño muestra [40]. La habilidad de la celda para operar a altas densidades de corriente con impactos mínimos en el ciclo de vida de la celda la hace atractiva para proyectar su uso en servicios auxiliares, especialmente, regulación de frecuencia [71].

El calcio es abundante, pero su punto de fusión, de 842°C, es muy alto para ser usado en LMB. Presenta una alta electronegatividad, pero la temperatura de fusión tan alta invita a alear el calcio para bajarla. Se han hecho esfuerzos con múltiples aleaciones Ca-Mg, Ca-Bi, Ca-Sb, pero el desempeño todavía no es suficiente para una implantación a nivel comercial [32].

- **Desempeño de algunas baterías *Redox flow***

- **Baterías Redox flow totalmente orgánicas**

Hay un alto interés en desarrollar baterías RFB con materiales económicos que permitan llevar la solución a escala de red, es por lo que una de las opciones que despierta interés en la comunidad científica es el estudio de soluciones orgánicas acuosas y no-acuosas [33].

Para electrolitos acuosos y no acuosos la estabilidad química de las especies activas y los radicales que contienen carga es uno de los mayores retos para la estabilidad del almacenamiento y ciclado de largo plazo. La degradación de las especies activas está altamente relacionada con los electrolitos y sales, principal causa de la baja utilización de las especies activas en los electrolitos. Hay que identificar los mecanismos de degradación para diseñar las estructuras de los compuestos adecuadamente.

El paradigma de soluciones orgánicas requiere nuevos desarrollos en los componentes de las celdas, como electrodos y separadores, ya que actualmente se utilizan los componentes de celdas tradicionales como las de vanadio. La resistencia del electrolito hay que bajarla con un diseño avanzado de electrodo y controlar el cruzamiento de especies activas en el separador.

- **Baterías Redox Flow hierro-cromo**

Las baterías de hierro-cromo tienen cierto interés investigativo, pero tienen varios problemas de desempeño en su composición de celda que limita su implantación comercial. Las limitantes son: pobre reversibilidad química del cromo, migración cruzada de especies activas, pérdida de capacidad debido a la generación de hidrógeno y la necesidad de tener electrocatalizadores que ayuden a mejorar el desempeño del sistema [46].

- **Baterías níquel-hierro**

Posada et al. [26] reportan avances en la investigación con baterías níquel-hierro, el grupo reporta mejora en la eficiencia Coloumbica de las celdas, pero a costa de la capacidad en ciclos de vida de la celda (alcanzando solo 100-150 ciclos), el estado de madurez de los avances logrados todavía es muy incipiente para mostrar tendencias prometedoras a un desarrollo próximo de escala industrial.

### 5.1.3 Desempeño de sistemas periféricos de BESS

Zhang, Yuan, Hua, Cao y Qian [1] propusieron algoritmos de control para la aplicación de afirmado de energía eléctrica con algoritmos de gestión de la carga de las baterías.

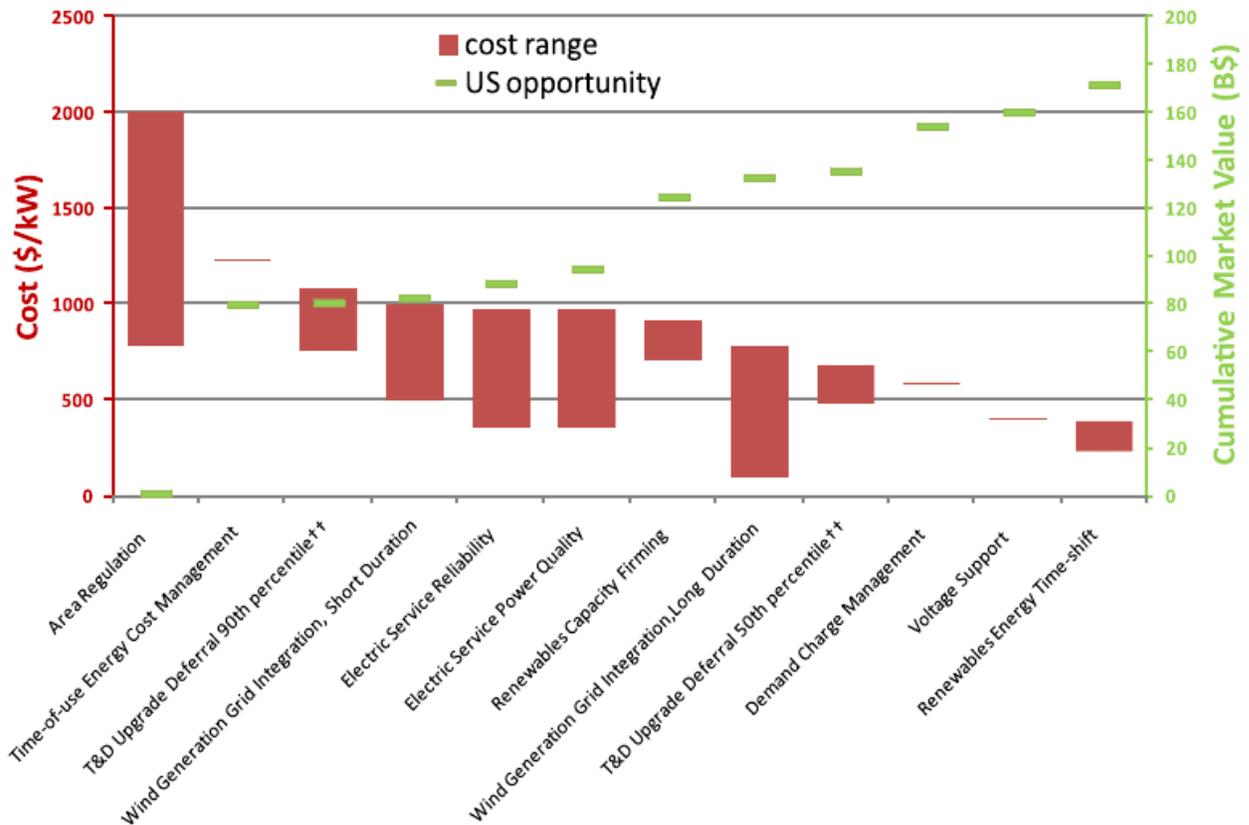
Dado que un parque solar fotovoltaico no aporta respuesta inercial al sistema, se han propuesto varias soluciones para abordar el asunto. Una posibilidad es incrementar las capacidades de reserva para regulación de frecuencia al agregar más generadores convencionales en línea, esta opción no es costo-efectiva, y su operación, dadas las intermitencias del sistema RES, agotan rápidamente los componentes de las plantas tradicionales. Otro enfoque es operar la planta PV no a la máxima salida de potencia nominal, sino a un nivel inferior. Esto implica sistemas de control más complejos y operación subóptima del sistema de generación. Finalmente, Wang y Yue [10] proponen utilizar un BESS para emular la respuesta inercial y así ayudar en la regulación de frecuencia primaria, sin sacrificar la operación óptima de la planta PV.

Stenzel, Koj, Schreiber, Hennings y Zapp [15] analizaron el desempeño ambiental del ciclo de vida de dos plantas que regulan frecuencia, un BESS y una planta de carbón, en el marco regulatorio alemán. Respecto a la evaluación del impacto ambiental en todo el ciclo de vida de la BESS, se concluye que ésta de manera representativa reduce el consumo de combustibles fósiles; adicionalmente, el impacto ambiental del BESS se reduce significativamente si se reciclan las baterías.

Dada la naturaleza estocástica del viento y la radiación solar, en cierto momento se puede dar la situación en la que, con el deber de cumplir regulación primaria y secundaria, incluso con un BESS, el sistema tenga un SOC bajo y simplemente no se pueda cumplir con el requerimiento de la regulación. Benini, Canevese, Cirio, y Gatti [49] proponen un algoritmo de “mejor esfuerzo” que permita cumplir parcialmente la regulación. En las simulaciones realizadas se encuentra que la regulación secundaria estresa mucho más el BESS que la regulación primaria. De acuerdo con las simulaciones, el nivel de exigencia del servicio de regulación secundaria es mucho mayor que la exigencia de regulación primaria. Para el caso analizado, se logra cumplir con la regulación primaria un 96% del tiempo y la regulación secundaria el 92%. También se encuentra que la regulación secundaria es la que económicamente recompensa más al BESS debido a que el volumen de energía transado es mayor y a que el servicio paga mejor.

La Figura 3, extraída de [75], muestra los costos de algunos sistemas de almacenamiento utilizados para aplicaciones estacionarias en los Estados Unidos. En el eje secundario se puede apreciar la oportunidad económica identificada de cada aplicación de almacenamiento en el mercado. Independiente de las magnitudes absolutas, debido a que los costos de instalación han bajado, el perfil de las aplicaciones es el mismo y se puede notar que, por ejemplo, la aplicación de regulación de frecuencia (*Area Regulation*) es la más exigente para los sistemas, porque exige más potencia que energía, pero a su vez ofrece menos retribución económica; mientras que la aplicación de arbitramento de energías renovables tiene gran potencial al tener costos modestos y un mercado muy amplio.

Figura 3 Costos de la solución BESS según el tipo de servicio. tomada de [75]. Años de publicación (2013-2010)



### 5.1.4 Hallazgos entre tecnologías

De acuerdo con Masebinu et al. [60] las tecnologías de sodio-sulfuro, *Redox flow* vanadio, zinc-bromuro, ZEBRA y plomo-ácido son apropiadas para aplicaciones de energía; los sistemas de ion de litio, para aplicaciones de potencia. Este es un reflejo de la realidad que se veía en dicha época, ya que se ha evidenciado que, en la actualidad, dada la fuerte promoción de plantas de almacenamiento de energía, los sistemas de ion de litio se están utilizando también en aplicaciones de energía.

Yang D. , Wen, Chan y Cai [7] aunque detallan la utilización de un BESS para aplicaciones de integración de RES a la red, no especificaron tecnología específica de batería.

## 5.2 ¿Cuáles son las fortalezas de las tecnologías estudiadas?

La respuesta a esta pregunta se abordará primero desde los elementos generales que aplican a cualquier tecnología de baterías; luego se presentan los elementos específicos de cada tecnología de manera tabulada en la Tabla 11, Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14.

A nivel general, en cualquier BESS se reconocen las siguientes fortalezas:

- Todos los BESS tienen una respuesta muy rápida ( $<s$ ) lo que permite desempeñarse muy bien respecto a aplicaciones de seguimiento de cargas para la estabilidad del sistema [51]. Esta característica se da tanto en potencia real como reactiva [64]. Esta característica permite cumplir con requerimientos de *low voltage ride through* (LRVT) al evitar el fenómeno de desconexión de carga durante perturbaciones a la red.
- Tienen una instalación muy rápida
- Tienen facilidad de instalación en cuanto a la ubicación y modularidad de la solución
- Puede mejorar el coeficiente de rendimiento de una planta fotovoltaica y eólica al evitar el fenómeno de restricción (*curtailment*) [4].
- Los BESS tienen la ventaja sobre las otras ESS de no ser dependientes de una ubicación específica.

Tabla 11 Ventajas de las tecnologías de baterías de ion de litio

<b>ion de litio</b>
[56,74,73,14,16] Baja autodescarga
[74] Altos voltajes de celda
[60,71,16] Capacidad de carga y descarga de altas potencias en corto tiempo
[56,26,73,71,14,16] Alta densidad de potencia, energía y eficiencia
[26,14] Ciclo de vida relativamente largo
[74] Bajo efecto de memoria
[14] Libres de mantenimiento
[5]. Electrodo positivo de hierro. No se disuelve en el electrolito.
[5]. Electrodo positivo de hierro. Termalmente estable.
[5]. Electrodo positivo de hierro. No es tóxico
[5] LFP/LTO. Más segura, permite operar hasta 90°C
[5] LFP/LTO. Soporta más de 30.000 ciclos de descarga profunda.

Tabla 12 Ventajas de las tecnologías de baterías plomo-ácido, níquel-cadmio, níquel-metal hidruro

<b>plomo-ácido</b>	<b>níquel-cadmio</b>	<b>níquel-metal hidruro</b>
[3]. Las baterías avanzadas VRLA equipadas con electrodos de carbón pueden alcanzar hasta 10 veces más ciclos de vida que las baterías convencionales.	[26]Alta velocidad de recarga	[26] Densidad de energía moderada
[25] Alta densidad de potencia y costo de capital	[26] Densidad de energía moderada y eficiencia Coulombica	[73] Recarga rápida
[64] Selladas, no hay fuga de líquidos	[5] Nuevas generaciones tienen baja auto-descarga	[73] Ciclo de vida largo
[64]No genera emisiones ácidas, corrosión del equipo.	[5] Materiales más seguros que el litio	[73] Tasa de descargas profundas sin pérdida de la capacidad
[64] VRLA. Libres de mantenimiento (No es necesario agregar agua o ácido)	[5]Buen desempeño en temperaturas de climas extremos (hasta -40°C)	[5] No requiere sistema de monitoreo de seguridad como las baterías ion de litio. Solo control de gases con válvula de alivio.
[26] Abundancia de materiales de fabricación	[71] Bajo mantenimiento	
[26,5] Bajo costo	[71]Muy económica en términos de costo por ciclo.	
[5,64] VRLA, Baja autodescarga		

Tabla 13 Ventajas de las tecnologías de baterías sodio-sulfuro, ZEBRA, ion de sodio

<b>sodio-sulfuro (NaS)</b>	<b>ZEBRA</b>	<b>ion de sodio (SIB o NIB)</b>
[26,74,71,64] Alta densidad de potencia y energía	[74] Pueden operar a temperaturas de -40° a 70° C sin requerir refrigeración.	[26] Alta densidad de potencia, energía y eficiencia <i>round-trip</i>
[26] Alta eficiencia	[74] Tienen un alto voltaje de celda 2.58 V	[26] Ciclo de vida relativamente largo
[26,74,71,64] Ciclo de vida relativamente largo	[74,16] Más seguras que NaS.	
[74] Respuesta rápida	[16] Pueden entregar más potencia que NaS.	
[60] Reciclabilidad del 99%	[74,16] Son más seguras que las baterías de NaS	
[60] Se perfila como una de las tecnologías más baratas para aplicaciones de gestión energética.		
[25,64] Materiales de fabricación son baratos		
[64] No requiere mantenimiento		
[64] funcional y estable en un gran rango de condiciones (potencia, profundidad de descarga, temperatura)		
[16] Cero autodescarga		

Tabla 14 Ventajas de las tecnologías de baterías *Redox flow* de vanadio, zinc-bromuro y hierro-cromo

<b>Vanadio</b>	<b>zinc-bromuro</b>	<b>hierro-cromo</b>
[57,60,33,73,71,46,64,16] Capacidad de energía es independiente de la capacidad de potencia. Cada una se puede especificar de manera independiente, esto mejora la escalabilidad.	[74] No tiene efecto de memoria	[16] El costo es tres veces menor que plomo-ácido
[57,74] Alta capacidad de potencia energía	[25] Puede estar descargada indefinidamente sin daño	[16] más de 10.000 ciclos de ciclo de vida
[74,60,73] Se puede descargar totalmente sin efectos colaterales a los componentes.	[46,25] Altas densidades de energía respecto a baterías plomo-ácido	[25] 100% de capacidad de descarga con frecuencia diaria
[74,60] Usa material no tóxico.	[25] 100% de capacidad de descarga con frecuencia diaria	[25] Altos ciclos de vida
[57,74,60] Opera a temperatura ambiente y puede operar a bajas temperaturas	[25] Después de período de servicio se puede extender vida útil con un mantenimiento.	[25] No tiene período de vencimiento en estado de stock.
[60,5,71] Baja tasa de autodescarga	[25] No tiene período de vencimiento en estado de stock.	[46]Bajo costo
[60] La capacidad de potencia es independiente de la profundidad de descarga		
[60] Largo ciclo de vida		
[60,73] Bajo costo de mantenimiento		
[57,33,73] Alta reversibilidad de las reacciones, alta eficiencia Coulombica		
[46] Almacenar los reactivos en distintos tanques, físicamente separados, la hace intrínsecamente más segura.		
[46] El SOC se puede determinar fácilmente con la lectura de los niveles de los reactivos.		
[25] Tolerancia a la sobrecarga		
[16] Impacto ambiental del vanadio es inferior comparada con la bat. plomo-ácido		

## 5.3 ¿Cuáles son los retos y brechas de las tecnologías estudiadas que ralentizan la integración de las energías de fuentes renovables a la Smart Grid?

Para responder esta pregunta se consideran los retos y brechas a nivel de tecnologías específicas de baterías y tecnologías de sistemas periféricos de BESS.

### 5.3.1 Tecnologías de baterías

Abraham et al. [50] reflexionan respecto a los fenómenos profundos que ocurren en las baterías y que son la causa raíz de no extraer el máximo potencial de los sistemas. Es necesario conocer las distintas escalas, desde la macroscópica hasta la atómica. Entender los procesos de la batería para cerrar el *gap* entre la potencia gestionable y su potencia teórica. Si se logra el objetivo, finalmente se podrán predecir y sintonizar estos sistemas a aplicaciones específicas satisfaciendo las necesidades actuales y futuras.

Las baterías de electrodos sólidos tienen una falencia inherente, la inestabilidad termodinámica de la estructura 3D debido a la expansión/contracción, reacción con el electrolito, y estratificación debido a diferentes densidades; esta inestabilidad lleva a la degradación de los electrodos y pérdida de calidad. La ingeniería de los materiales de los electrodos se puede mejorar, pero nunca se eliminará [16].

Respecto a las baterías acuosas hay múltiples investigaciones que buscan mejorar el desempeño de éstas; sin embargo, todavía hay retos grandes por resolver antes que las tecnologías acuosas se hagan atractivas. Aunque ha habido algunas mejoras puntuales reportadas, no se ven patrones que indiquen de manera esperanzadora un avance disruptivo en esta dirección.

En las Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19, Tabla 20, Tabla 21 se presentan las brechas, retos y dificultades específicas de cada tecnología de manera tabulada.

### 5.3.2 Tecnologías de sistemas periféricos de BESS

Un reto identificado por Koller, Borsche, Ulbig y Andersson [65] es la necesidad que tienen todas las aplicaciones de BESS de estimar el estado de carga (SOC). Dado que el SOC es un resultado de una estimación no lineal de estado que involucra la integración de medidas de corriente y voltaje, es típico encontrar grandes desviaciones respecto al valor real. Por lo que los sistemas de control deberían tener en cuenta estas incertidumbres manejando el SOC.

Abhinav, Member, Pindoriya y Member [76] identifican la necesidad de desarrollar mejores topologías de convertidores de potencia bidireccional para parques eólicos que permitan una mejor utilización del BESS. Se requieren mejores técnicas de control que permitan de manera eficiente hacer un manejo de la potencia activa y reactiva [1]. También se identifica el reto de utilizar el BESS para realizar control de potencia reactiva sin utilizar equipos auxiliares como FACTS. Es necesario estudiar las dinámicas que se dan en la interacción de sistemas RES, BESS y red eléctrica, ya que muchos análisis se hacen en condiciones de estado estable, y dicho conocimiento permite conocer y asegurar la estabilidad y seguridad del sistema eléctrico. El desempeño general

de las plantas RES integradas al sistema eléctrico mejorará mucho si se tienen mejores modelos de pronóstico que permitan mejorar la despachabilidad de las plantas RES.

---

**Tabla 15 Retos y dificultades de la tecnología de batería plomo-ácido**

---

**plomo-ácido**

---

[60,5,71] Pobre desempeño a baja temperatura. Reducir la temperatura en 2°C de la temperatura nominal (25°C) reduce la vida útil en un factor de 2.

[60,5,71] Las baterías convencionales tienen problemas en proveer ciclos de potencia frecuentes debido a que, si están frecuentemente en SOC parcial, se acelera el modo de falla de sulfatación.

[5] Operar baterías a temperaturas más altas (45°C) puede mejorar el desempeño de la batería en términos de capacidad, pero reduce el tiempo de vida del sistema.

[57,26,60,5,71,25,64] Ciclo de vida corto con descarga profunda, esto limita su implementación en sistemas de gran escala.

[26,60,5,71] Baja densidad de energía

[5] El esquema ideal de conexión sería más complicado para evitar problemas de *mismatch*.

[5,25] Velocidad lenta de carga

[71,25] Contaminante: plomo, ácido sulfúrico

[64] Inundadas. Riesgo de fugas tóxicas (emisión o líquidos)

[64] Inundadas. Requieren mantenimiento

[64] Inundadas. Autodescarga alta

[26] Sulfatación y formación de cristales de sulfato de plomo insolubles es el problema más típico que caracteriza el proceso de envejecimiento que afecta la eficiencia y vida útil de la batería. Se han atenuado con el uso de aditivos, pero hay lugar a mejora. Pueden llevar a falla prematura de la batería.

[9] Hace falta algoritmos de control que permitan optimizar la vida útil de las baterías.

---

Tabla 16 Retos y dificultades de la tecnología de batería ion de litio

<b>ion de litio</b>
[5] Respecto a los aspectos de seguridad de la batería no se han encontrado soluciones definitivas. Los compuestos laminares tienen las densidades energéticas más alta, pero su inestabilidad térmica y estructural es el origen de las explosiones en las baterías y no se encontrado una técnica efectiva que resuelva el problema.
[57,26,32,64] Altos costos (con tendencia a la baja)
[57,26] Riesgo de seguridad por riesgo de incendios y explosiones
[26,32,64] Poca abundancia del litio en la corteza terrestre y distribución no uniforme.
[3] Electrodo negativo. Limita la potencia de la batería
[32] Formación de dendritas en el ciclado, eventualmente pueden generar cortocircuitos.
[60,73,64] Requiere circuito de cargado y protección especial
[64] El sobrecalentamiento limita y degrada el desempeño de la batería, pierde capacidad, riesgo de "thermal runaway"
[57,60,73,71] Sufre degradación acelerada si se opera en altos niveles de carga, hay grandes variaciones en el estado de carga durante el ciclado o el uso de grandes corrientes de carga/descarga.
[42] Se pueden conseguir químicas de ion de litio más seguras, pero tienen costo adicional
[65] La vida útil de las baterías dependen del perfil de operación del BESS.
[16] Debido a los factores que incrementan la degradación, la investigación está enfocada en encontrar diseños de materiales de electrodo positivo costo-eficientes, con poca expansión y capacidad enriquecida, electrolitos mejorados en seguridad y conductividad y electrodos negativos mejorados en protección

Tabla 17 Retos y dificultades de las tecnologías de batería níquel-cadmio, níquel-metal hidruro

<b>níquel-cadmio</b>	<b>níquel-metal hidruro</b>
[26,60,65,75] Tienen efectos de memoria	[26] Ciclo de vida relativamente corto
[26,75] Ciclo de vida relativamente corto	[26] Baja eficiencia
[26,60,73,65,71,75] Toxicidad del níquel y el cadmio	[5] Se perfila un uso restringido de las tecnologías de níquel en aplicaciones <i>off-grid</i> .
[5] Primeras generaciones. Susceptibles a efectos de memoria	[71] Desempeño más limitado en descarga y ciclos de vida que Ni-Cd
[5] Primeras generaciones. Alta autodescarga, unas 10 veces más que ion de litio.	[71] Genera más calor cuando opera
[26,51] Ciclo de vida relativamente corto, dependiente de la profundidad de los ciclos.	
[26] Hay investigación activa en detener los mecanismos de autodescarga	
[74] Solo pueden ser usadas en aplicaciones estacionarias debido a la toxicidad del cadmio (regulación EU).	

---

<p>[26] Tienen una huella ambiental más grande que las baterías de ion de litio (en CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>)</p> <p>[60] Debido a los efectos de memoria y alta autodescarga, no se recomienda la aplicación en aplicaciones RES.</p> <p>[60,73,65,71] Diez veces más costosa que plomo-ácido</p> <p>[5] Se perfila un uso restringido de las tecnologías de níquel en aplicaciones <i>off-grid</i> y solo aplicaciones estacionarias.</p> <p>[16] Hay ciertas tendencias a reemplazar estas baterías debido a los efectos negativos de efecto de memoria, costo y ambientales.</p>	<p>[71] Las altas tasas de auto-descarga obligan a hacer continuo mantenimiento</p>
---	---

---

Tabla 18 Retos y dificultades de la tecnología de batería sodio-sulfuro

---

<b>sodio-sulfuro</b>	
[57,73,32,16] Alto costo de producción de tubo de alúmina y sellos	
[74,73,51,71,25,16] Temperatura de operación alta 300-340°C. No es lo ideal energéticamente. Ya que genera gasto para compensar la pérdida de calor.	
[60,71,64] Requiere diseño cuidadoso de encerramiento de reactivos para mantener la eficiencia energética.	
[60,73,64,16] Consideraciones de seguridad. Se debe controlar la reacción con materiales activos. El aislante se puede corroer en ambientes agrestes. El sodio es corrosivo y explota en contacto con el aire o humedad	
[32] Baja estabilidad de la alúmina con algunos electrodos positivos	
[32] Robustez mecánica débil para soportar vibraciones. No es tan importante para aplicación estacionaria.	
[16] Debido a la relativa baja potencia, se están investigando electrolitos, materiales de electrodos positivos y negativos, que mejoren el desempeño y las características de seguridad.	
[16] Requiere circuitería de protección para prevenir degradación de la celda y " <i>thermal runaway</i> "	

---

Tabla 19 Retos y dificultades de las tecnologías de batería ZEBRA y ion de sodio

---

<b>ZEBRA</b>	<b>ion de sodio</b>
[74] Menor densidad de potencia comparadas con NaS	[26] Tecnología inmadura
Limitaciones similares a NaS	[61] Densidad de energía más baja que las baterías ion de litio
	[70,61,22] Encontrar un material de electrodo negativo con el voltaje de almacenamiento apropiado, alta capacidad de reversibilidad y alta estabilidad estructural; el material candidato más cercano es el carbón duro ( <i>hard carbon</i> ). Hay investigación haciendo esta búsqueda activa.
	[70] Se necesita un electrólito más adecuado, tipo acuoso, ya que los electrolitos orgánicos generan preocupaciones de seguridad. Los electrodos negativos se corroen continuamente en la presencia de electrolitos orgánicos. Las investigaciones al respecto son escasas.

---

Tabla 20 Retos y dificultades de la tecnología de batería *Redox flow* de vanadio

<b>Vanadio</b>
[57,33,46] Alto costo de inversión, especialmente electrolitos. El vanadio y la membrana de intercambio de iones todavía son muy costosos.
[5,71,25,16] Baja capacidad o densidad de energía. No es tan relevante para aplicaciones estacionarias, simplemente se usa más espacio.
[16] Corta vida útil de la membrana separadora de iones
[74,16] Ingeniería compleja por el uso de tubería y bombas. El sistema puede ser susceptible de fugas.
[57] El sistema requiere mantenimiento mecánico, membranas, materiales de electrodo.
[46] Hay que hacerle mantenimiento al electrolito, debido al cruzamiento de especies en la membrana.
[71] Baja eficiencia <i>round-trip</i> por la utilización de bombas y pérdidas energéticas en reacciones químicas.
[71] Altos costos operativos debido a esquemas de control para tanques y bombas.
[71] Hay que hacer gestión de temperaturas por aspectos de seguridad
[46] El consumo de las bombas se perciben como si el sistema tuviera una autodescarga
[16] Se debe investigar para encontrar materiales electroactivos y membranas selectivas de iones con mejor efectividad y se detengan los efectos negativos de cruzamiento de especies.

Tabla 21 Retos y dificultades de las tecnologías de batería *Redox flow* de zinc-bromuro y hierro-cromo

<b>zinc-bromuro</b>	<b>hierro-cromo</b>
[16] Baja eficiencia energética	[57] Evolución de gas de hidrógeno en el electrodo de hierro es un problema serio
[46,25] Genera remanentes tóxicos.	
[46] Consideraciones de seguridad por presión del vapor	[57] La degradación de la membrana incrementa los costos de mantenimiento.
[46] El bromo es muy agresivo y corrosivo con muchos materiales.	
[46] Baja adopción del mercado	[73] Todavía está en etapa de R&D
[16] Ingeniería compleja por el uso de tubería y bombas. El sistema puede ser susceptible de fugas de materiales corrosivos y tóxicos.	
[57,16] Formación de dendritas	
[16] Alto costo de los electrodos	
[46] Ciclo de vida bajo	

## 5.4 ¿Cuáles son las tecnologías de baterías más adecuadas para la integración de plantas de gran escala con fuentes renovables?

La respuesta a esta pregunta se puede enfocar de dos formas, la primera es de acuerdo con los reportes de desempeño e información técnica reportada en la literatura científica; la segunda forma es mediante la utilización del gráfico de *Ragone* que en un solo plano plasma las características de desempeño en potencia y almacenamiento energético de un BESS.

En la Tabla 22 se consolida la idoneidad de las tecnologías con relación a los tipos de servicios ESS en la red, sustentada en la información encontrada en la literatura científica. La parte izquierda de la tabla lista los servicios o aplicaciones de almacenamiento de energía con sus respectivos requerimientos de potencia y duración de la descarga. En la parte central se hace una categorización básica del tipo de aplicación en función de su aspecto más relevante, si es intensiva en suministro rápido de potencia y de corta duración se considera una aplicación de potencia denominada con la letra P, si es una aplicación que tiene una duración relativamente larga en el tiempo se considera una aplicación de energía y se denomina con la letra E. En la sección superior-derecha de la tabla se listan las tecnologías de baterías, y en la zona de intersección con las filas que definen los servicios, se plasma una X en caso de que la tecnología pueda ser usada para dicho servicio. Para el caso de las tecnologías de níquel, se encuentra que estas son solo viables en condiciones de climas extremos en las que se ha documentado su éxito en la aplicación, en dicho caso se utiliza la cadena “Esp.”.

Las aplicaciones de red están agrupadas en cuatro bloques separados por líneas negras, en orden son: las aplicaciones típicas de soporte al código de red, aplicaciones del sistema de transmisión, aplicaciones de gestión de la demanda y aplicaciones enfocadas a la integración de plantas renovables.

Respecto a las aplicaciones de código de red y de integración de plantas renovables; las tecnologías plomo-acido, litio, sodio y *Redox flow* pueden asumir la operación de dichas aplicaciones; sin embargo, como se ha visto en el estudio, hay particularidades respecto a las condiciones y rangos de operación logrables hoy día con el estado del arte de cada tecnología por el grado de madurez de la ingeniería desarrollada. Las tecnologías de níquel solo pueden proveer servicios de suministro de potencia en condiciones especiales.

Respecto a las aplicaciones del sistema de transmisión; las tecnologías de plomo-acido y litio pueden asumir la operación de cada aplicación; las tecnologías de *Redox flow* y de sodio, al tener un perfil de implementación de gran capacidad de energía, no se ven tan adecuadas para las aplicaciones de “diferimiento de actualización de transmisión y distribución (T & D)” y “potencia en sitio para subestación” ya que implicarían plantas de gestión más compleja, comparadas con las plantas de las tecnologías de plomo-acido o litio. Las tecnologías de níquel no son adecuadas para este tipo de aplicaciones.

De manera similar, respecto a las aplicaciones de gestión de la demanda todas las tecnologías podrán ser implementadas en algún nicho específico; las tecnologías de *Redox flow* y sodio en plantas relativamente grandes de entorno industrial, no residencial debido a los requerimientos de seguridad y mantenimiento; las tecnologías de plomo-acido y litio en cualquier tipo de aplicación, industrial o residencial; las tecnologías de níquel en aplicaciones de ambientes extremos en aplicaciones de potencia.

A continuación, se presenta la Figura 4 Diagrama de Ragone de las principales tecnologías de almacenamiento de energía. La figura se graficó utilizando los datos de la base de datos “*Global Energy Storage Database*” del DoE de Estado Unidos [77]. La figura tiene 6 gráficos que caracterizan cada una de las tecnologías de baterías. El

---

gráfico completo permite percibir la idoneidad y tendencias en la utilización de las tecnologías de baterías. En cada gráfico, se plasman dos patrones, el patrón de cada tecnología (en rojo) y los patrones de la tecnología de litio (en azul) que se usa como referente de comparación. Este enfoque es necesario ya que los gráficos individuales de cada tecnología no permiten contrastar las otras tecnologías y; graficar simultáneamente todos los patrones, no es conveniente debido a la saturación de información en la misma área. Cada gráfico tiene los siguientes elementos:

**Ejes:** Dada la gran dispersión de los valores en potencia y energía de las plantas BESS, el gráfico de Ragone utiliza ejes logarítmicos.

**Diagrama de dispersión:** los puntos representan un BESS de la tecnología correspondiente implementado y operativo en alguna parte del mundo.

**“Huella” de la aplicación:** Se realizó un procesamiento algorítmico para definir un área convexa que defina la “huella” y caracterice los rangos límite en potencia y energía de cada tecnología de BESS. Cada gráfico visualiza la huella de la tecnología en estudio (rojo) y la huella de la tecnología de litio (azul).

**Líneas de duración de descarga:** Se graficaron líneas de referencia que están relacionadas directamente con la duración de la descarga del BESS a la potencia nominal, se utilizan 3 límites: 7.5 minutos, 1 hora y 1 día, estos límites coinciden aproximadamente con los límites de los BESS.

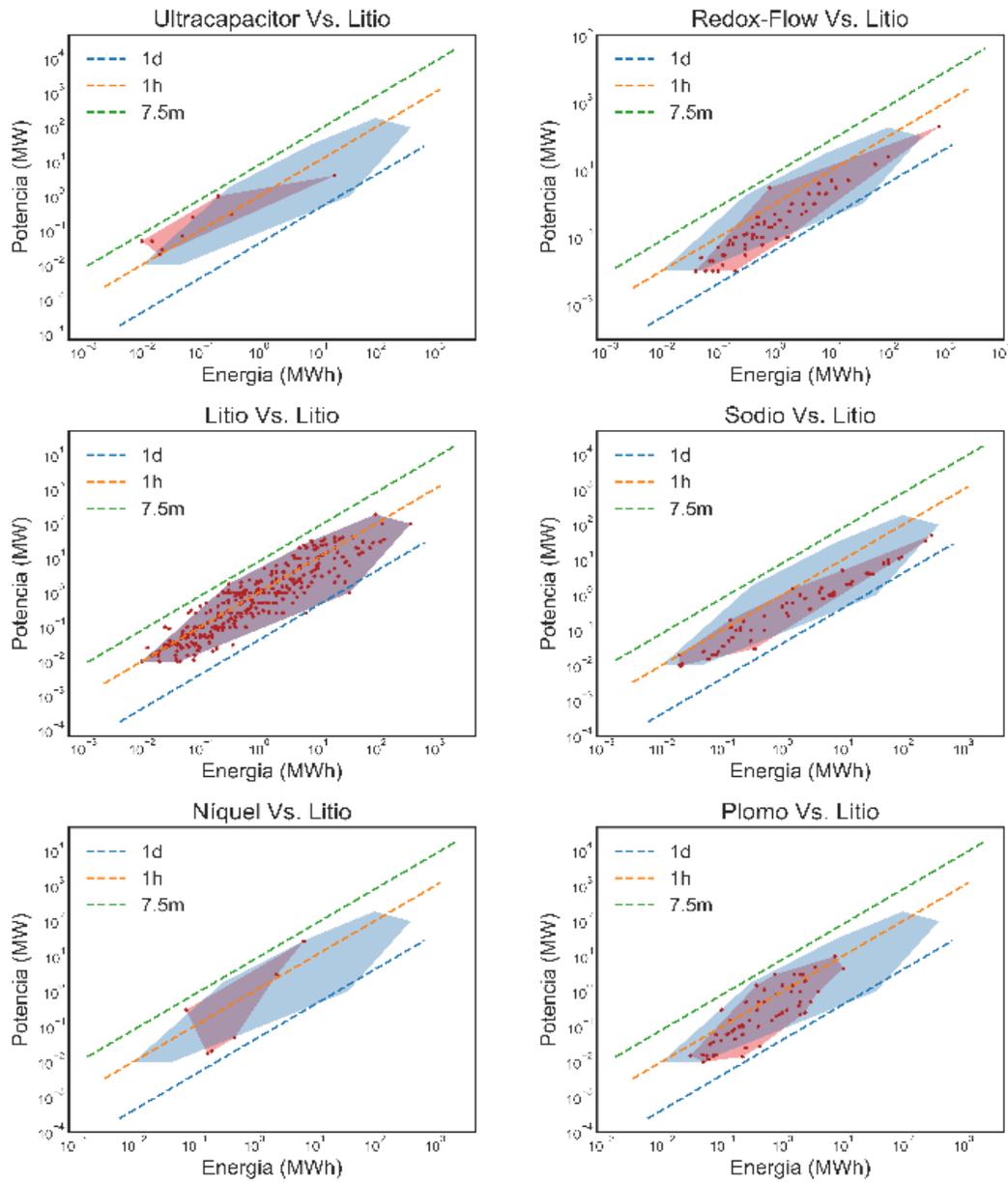
Lo primero que hay que notar es que la aplicación de litio es la aplicación dominante actualmente, en el sentido que cubre un espectro grande de aplicaciones, desde bajas potencias y bajas energías hasta altas potencias y altas energías, con tiempos de descarga desde unos cuantos minutos, hasta sistemas de un día de tiempo de descarga. Por lo que se concluye que es una tecnología apropiada tanto para aplicaciones de potencia como de energía.

Las tecnologías de *Redox Flow* y de sodio tienen un perfil muy similar de utilización, los sistemas están enfocados en ser aplicaciones de energía, intensivas en descarga, por lo tanto, tienen típicamente duraciones de descarga de más de una hora y menos de un día.

Las tecnologías de plomo-ácido y níquel están limitadas en el rango de energías y potencias que manejan, por lo que se observa una acumulación de puntos en la zona baja del diagrama de dispersión comparado con el área de aplicación de las tecnologías de litio. Las tecnologías de níquel muestran muy pocos proyectos implementados.

Las tecnologías de ultracapacitor, aunque no entran en el alcance inicial del estudio, hacen parte de la propuesta tecnológica de sistemas de almacenamiento híbridos que combinan los ultracapacitores con BESS. Se hace notorio el enfoque de esta tecnología en dar suministro de potencia más que energía, al tener tiempos de descarga inferiores a la hora.

Figura 4 Diagrama de Ragone de las principales tecnologías de almacenamiento de energía.



\*Datos base tomados de [77], última consulta: abril de 2018.

Tabla 22 Idoneidad de las tecnologías de baterías respecto a los servicios de almacenamiento de gran escala

Servicios o aplicaciones	Duración de la descarga *		Capacidad kW, MW		Tipo de Aplicación	B. plomo-ácido	B. Níquel	B. Litio	B. Sodio	B. Redox flow		
	Bajo	Alto	Bajo	Alto			níquel-cadmio	ión de litio	sodio-sulfuro	ZEBRA	vanadio	zinc-bromuro
1. Arbitramento de energía eléctrica	2	8	1 MW	500 MW	E	X		X	X	X	X	X
2. Suministro de capacidad eléctrica	4	6	1 MW	500 MW	E	X		X	X	X	X	X
3. Seguimiento de carga	2	4	1 MW	500 MW	E	X		X	X	X	X	X
4. Regulación de frecuencia	15 min.	30 min.	1 MW	40 MW	P	X	Esp.	X	X	X	X	X
5. Capacidad de reserva de suministro eléctrico	1	2	1 MW	500 MW	P	X	Esp.	X	X	X	X	X
6. Soporte de voltaje	15 min.	1	1 MW	10 MW	P	X	Esp.	X	X	X	X	X
7. Soporte de transmisión	2 sec.	5 sec.	10 MW	100 MW	P	X		X	X	X	X	X
8. Alivio de congestión de transmisión	3	6	1 MW	100 MW	E	X		X	X	X	X	X
9. Diferimiento de actualización de transmisión y distribución (T & D)	3	6	250 kW	5 MW	E	X		X				
10. Potencia en sitio para subestación	8	16	1.5 kW	5 kW	E	X		X				
11. Gestión del costo de energía Tiempo-de-uso (TOU)	4	6	1 kW	1 MW	E	X		X				
12. Gestión de la carga de la demanda	5	11	50 kW	10 MW	E	X		X				
13. Confiabilidad del servicio eléctrico	5 min.	1	0.2 kW	10 MW	P	X	Esp.	X	X	X	X	X
14. Calidad de la potencia del servicio eléctrico	10 sec.	1 min.	0.2 kW	10 MW	P	X	Esp.	X	X	X	X	X
15. Arbitramento de energía de fuentes renovables	3	5	1 kW	500 MW	E	X		X	X	X	X	X
16. Afirmado de la capacidad de energía de fuentes renovables	2	4	1 kW	500 MW	E	X		X	X	X	X	X
17.1 Integración a red de la generación renovable. Corta duración	10 sec.	15 min.	0.2 kW	500 MW	P	X		X	X	X	X	X
17.2 Integración a red de la generación renovable. Larga duración	1	6	0.2 kW	500 MW	E	X		X	X	X	X	X

\* Horas a menos que se indique lo contrario, min.= minutos, sec.= segundos.

### 5.4.1 Plomo – ácido

La tecnología plomo-acido, dada la madurez tecnológica que tiene es capaz de asumir todas las aplicaciones de almacenamiento; sin embargo, no son todas las variantes tecnológicas, sino las versiones VRLA avanzadas que tienen características de descarga profunda y extensión del ciclo de vida ligado a algoritmos de optimización. Sin embargo, sus instalaciones no sobrepasan los 20 MW.

Sano, Ito, Hirose, Takeuchi y Aone [21] desarrollan una variante de las baterías plomo-ácido conocida como VRLA-*Long Life* (VRLA-LL), los investigadores utilizan dicho tipo de baterías (un banco de 10MW) para probarla en aplicaciones de nivelación de carga e integración de un parque eólico de 12MW a la red. Este proyecto ha servido para conocer el comportamiento detallado y cómo se manifiesta el desgaste en las baterías según la aplicación.

Se concluye que la aplicación de integración RES es mucho más intensiva en desgaste de las baterías y requiere aplicar técnicas de mantenimiento con inyección de corrientes, conocida como equalización de las baterías, de esta forma se disminuye el fenómeno de corrosión del electrodo positivo de las baterías.

La utilización de las baterías en la aplicación de nivelación de carga es menos demandante para el sistema y por lo tanto pueden durar más. Con un perfil de uso con profundidades de descarga de 70% se logró tener una aplicación que dura 10 años con una utilización de 300 ciclos por año.

Sano et al. [21] desarrollaron un nuevo modelo de batería VRLA-LL-W que puede llegar a tener hasta 17 años de vida útil.

### 5.4.2 Basadas en níquel

Las tecnologías de níquel se ven limitadas en el futuro para el desarrollo de aplicaciones de gran escala en almacenamiento integrado a la red; sin embargo, sobresale el hecho de que puede soportar bajas temperaturas, son una solución atractiva para aplicaciones *off-grid* sometida a ambientes de temperatura extremos. Debido a estas características se usa en aplicaciones de calidad de la potencia y reserva de energía en aplicaciones de telecomunicaciones. Desde 2003, en Fairbanks, Alaska (USA), opera un sistema de Ni-Cd con 27MW de potencia [3].

### 5.4.3 Basadas en litio

La tecnología dominante en el momento son las tecnologías de litio, sus costos han bajado y sus características técnicas son en general superiores a las tecnologías de plomo-acido. La tecnología es capaz de proveer todas las aplicaciones de energía, hasta el momento los sistemas más grandes son el BESS de Hornsdale Power Reserve 100MW/129MWh en Australia y en Alemania hay un sistema distribuido de 188 MW/350MWh que soporta generación renovable residencial. Por el momento es la tecnología más sólida.

---

El BESS instalado en Zúrich Alemania de 1MW, cumplió con las expectativas de desempeño en tres aplicaciones: regulación primaria de potencia, *peak Shaving* (suministro de capacidad eléctrica menor) y trabajo en modo isla [65]. Entre los aspectos a resaltar esta:

Demostró lograr altos gradientes en el manejo de la potencia, logrando pasar de -1MW hasta +1MW en menos de un segundo, lo que demuestra la versatilidad que pueden tener estos sistemas para soportar y ayudar en la confiabilidad y seguridad de la red [65].

Respecto a la eficiencia total del sistema, hay que tener en cuenta que hay una interacción compleja entre los múltiples componentes, especialmente entre las baterías y el sistema de conversión de potencia. Las celdas de litio tienen una eficiencia creciente hacia los niveles bajos de potencia, el sistema de conversión tiene su máxima eficiencia en los valores nominales de potencia. Por lo que la eficiencia total del sistema es una relación compleja en función de la potencia que se esté operando. De acuerdo con la iniciativa de Koller et al. [65], a nivel ingenieril, puede ser mucho más provechoso diseñar sistemas que logren su máxima eficiencia alrededor de los puntos de trabajo, es decir, en puntos intermedios de las potencias de trabajo.

Los sistemas auxiliares de un sistema completo tienen un consumo base permanente, esto se puede modelar como una autodescarga del sistema. Este comportamiento afecta en gran proporción el cálculo de la eficiencia de *roundtrip* cuando se evalúan largos períodos de poca actividad de ciclado o estado de espera. Los otros factores como voltaje, temperatura y SOH influyen la eficiencia, pero tienen un menor impacto.

Ikni, Camara y Dakyo [36] analizan el desempeño de un BESS hecho con baterías de litio para operar en la aplicación de regulación de frecuencia en un parque de generación eólica. Los análisis realizados concluyen que el BESS mejora la calidad de la potencia inyectada a la red sin degradar el desempeño y vida útil de las baterías de litio.

El BESS analizado por Dubarry et al. [43] estuvo operacional más de 90% realizando funciones de integración a la red (función de suavizado) y regulación de frecuencia. El objetivo del estudio era identificar un modelo completo del desempeño de las baterías.

Li, Yao y Hui [31] analizan un sistema híbrido con un BESS de 14 MW/63MWh con baterías ion de litio y un BESS de 2 MW/8 MWh con baterías *Redox flow*. El estudio confirma el buen desempeño de los dos sistemas para respaldar los servicios de soporte de voltaje y el afirmado de potencia de RES a la red. Se afirma que el BESS puede estabilizar las fluctuaciones del sistema de potencia, reducir el impacto de las fluctuaciones de potencia de plantas eólicas o PV, mejorar la estabilidad y crear un mejor ambiente para la integración a la red de plantas RES de gran escala.

Zhao et al. [51] presentan una visión sesgada respecto a la utilización de las baterías de ion de litio en aplicaciones de gran escala para servicios de gestión de energía, se comenta que la tecnología tiene posibilidades limitadas para la aplicación en integración de generación RES eólica en la red. Sin embargo, el tiempo ha descartado dicha afirmación ya que la tecnología de ion de litio es de las más populares en este momento.

#### 5.4.4 Basadas en sodio

Las baterías de sodio tienen la particularidad de requerir esquemas de seguridad industrial debido a sus características de operación, diferente a los sistemas de ion de litio que tienen versiones para instalaciones residenciales. Dado esto, aunque los BESS basados en sodio pueden asumir aplicaciones de potencia o energía, no se proyecta su uso en el nicho de aplicaciones de la demanda minorista. Las potencias instaladas han llegado hasta los 50MW y 300 MWh

#### 5.4.5 Redox flow

Los sistemas de baterías de *Redox flow* se perfilan como tecnologías fuertes en aplicaciones de potencia y energía y, al igual que los sistemas de sodio, se enfocarán en instalaciones de gran capacidad, no de gestión de la demanda. Las instalaciones históricamente han llegado hasta los 15 MW/60MWh y tienen potencial de seguir creciendo.

La tecnología de zinc-bromuro, aunque tiene el potencial de aplicación que hoy día tienen los BESS *Redox flow* de vanadio; no tiene muchas aplicaciones en demostración actualmente.

Chalamala et al. [46] reportan que sistemas de vanadio de 50 kW/200 kWh hasta 4 MW/6 MWh se han instalado y operado exitosamente. Para el caso del sistema de 4 MW/6 MWh, se han demostrado más de 200.000 ciclos en la granja solar Tomomae de Japón [46].

### 5.5 ¿Existe alguna diferencia en la arquitectura de las soluciones de almacenamiento de energía para los sistemas de energía eólica y fotovoltaica? ¿si existe, en qué consiste?

A nivel general no existe una diferencia profunda en los tipos de arquitecturas que se integran a plantas eólicas o fotovoltaicas. A lo largo de la revisión de literatura, es notoria la flexibilidad que tienen las arquitecturas de los BESS, en el sentido que pueden ser aplicadas a cualquier tecnología de generación de energía. Las arquitecturas de los BESS no se diferencian principalmente en función de la fuente del recurso (e.g. eólico, solar fotovoltaico), sino en función de la aplicación final en la que se utilizará el sistema de almacenamiento, ya que es la aplicación la que tiene un perfil de exigencia diferente en el desempeño esperado del sistema de almacenamiento, en aspectos de tipo de potencia (activa, reactiva) y tiempos de duración [66].

Con esto no se afirma que los sistemas BESS que se implementen en sistemas eólicos serán idénticos a los implementados en sistemas fotovoltaicos; en aspectos particulares de los BESS, hay elementos diferenciadores, por el tipo de recurso que cada tecnología aprovecha; sin embargo, las implicaciones de ajustes son de un orden menor que no es sustancial a la arquitectura del sistema; por ejemplo, el ajuste de los algoritmos de control del SOC y SOH expuesto por Fathima y Palanisamy [71].

En la Tabla 23 Similitudes y diferencias de las arquitecturas de BESS para la integración de plantas eólicas y fotovoltaicas a la red, se resumen los hallazgos encontrados en la revisión de literatura, en las siguientes secciones se explica cada uno de ellos.

Tabla 23 Similitudes y diferencias de las arquitecturas de BESS para la integración de plantas eólicas y fotovoltaicas a la red

Característica técnica	Similitud	Diferencia
Requisitos de código de red	X	
Caracterización de la potencia de entrada	X	
Dimensionamiento	X	
Ubicación	X	
Bus DC/ BUS AC	X	
Control	X	
Sistema de conversión de potencia	X	
Sistemas híbridos de almacenamiento	X	
Simulación de inercia para regulación de frecuencia.		X
Regulación de potencia con control de ángulo de <i>pitch</i>		X
Administración de ciclos de carga		X

### 5.5.1 Similitudes de un BESS acoplado a plantas eólicas o solares

A lo largo del estudio de las arquitecturas de BESS son notorias las similitudes que existen entre las aplicaciones eólicas y solares, mucho más que las diferencias. Entre las similitudes de las arquitecturas se encontraron: el cumplimiento de requisitos de código de red, la caracterización de los patrones de potencia de entrada, el procedimiento de dimensionamiento del BESS, definición de la ubicación, forma de utilización de los buses DC/AC, los sistemas de control, los sistemas de conversión de potencia (PCS) y el enfoque a usar sistemas híbridos de almacenamiento de energía (HESS).

- **Requisitos de código de red**

Un BESS debe considerar como requisito de diseño los diferentes requerimientos exigidos por el código de red para la tecnología eólica o solar. De hecho, si la implantación se hace en un país en vía de desarrollo, puede haber vacíos regulatorios, especialmente en la tecnología solar fotovoltaica que tiene un desarrollo más reciente que el de la tecnología eólica.

Gaztanaga et al. [39] plantean una solución de 1MW/560kWh con baterías de ion de litio para un parque solar fotovoltaico. Se propone una arquitectura con un controlador de planta central que contiene la programación del código de red de manera que la planta solar genera en búsqueda del punto de máxima potencia; si es necesario algún requerimiento de control de frecuencia, soporte de voltaje o de potencia rampa, el sistema de ESS realiza la función.

Los requerimientos de control de potencia reactiva típicos de los códigos de red, los puede proveer completamente un convertor de potencia. Sin embargo, los requerimientos de potencia activa deben ser gestionados por el BESS [39]. De acuerdo con Abhinav et al. [76], existe alta flexibilidad en los subsistemas que se pueden utilizar para gestionar la potencia reactiva. En general los equipos que se han propuesto son STATCOM, SVC, DVR, OLTC, SDBR, FACTS, UPFC, UPQC o alguna

combinación con otros dispositivos. En enfoques recientes los investigadores también han utilizado BESS para hacer la gestión de potencia reactiva en plantas eólicas.

Salgado, Sharma, Ranatunga, Moroz y Thomas [22] advierten que un ESS integrado a un parque solar no generará inmediatamente mejores rendimientos, aunque inicialmente reducirá las penalizaciones resultantes de la violación de las rampas de potencia.

- **Caracterización de la potencia de entrada**

Un elemento clave en el diseño de un BESS es la caracterización de la potencia de entrada. Esta es energía que se arbitrará para cualquier aplicación de red. Los patrones de ingreso de dicha potencia son los que afectarán directamente el SOC y SOH del BESS.

Zhao et al. [51] explican los criterios que hay que tener en cuenta en el planteamiento de soluciones ESS para sistemas eólicos que en cierto grado se pueden aplicar a soluciones solares PV. Es necesario considerar el espectro de variación de la potencia en diferentes escalas de tiempo, este factor es clave para satisfacer los propósitos de la aplicación. Las fluctuaciones de baja frecuencia, que duran entre minutos y horas, se relacionan con la reserva de generación y la energía que despachará el sistema; las fluctuaciones de alta frecuencia, en la escala de segundos y minutos, tienen implicaciones en el control de frecuencia del sistema. Por lo tanto, con base en el espectro de densidades de potencia de los vientos, es posible determinar los requisitos técnicos para diseñar un ESS que soporte la aplicación de integración a la red. Un sistema diseñado con esta técnica lo ejemplifica Zhao et al. [51] en el que finalmente se seleccionan baterías NaS con propósitos de despacho diario.

Uno de los problemas típicos de los sistemas eólicos y solares fotovoltaicos es el de la variabilidad e incertidumbre en la generación del corto plazo comparada con la generación tradicional. Hay una tendencia generalizada a que el despacho energético se haga en períodos cortos y se realicen pronósticos de muy corto plazo (5 ó 15 minutos), las desviaciones respecto a la potencia consignada en el sistema es penalizable por el operador de red; por lo tanto, la unión de pronósticos de muy buena calidad, con un BESS bien diseñado, pueden minimizar el costo de la infraestructura a instalar. El BESS puede ser el elemento que ayude a complementar el pronóstico del recurso variable. Wood [9] muestra las bondades de un BESS que no está ligado a ninguna generación específica, está en medio de una red del operador PJM, y en dicho ambiente aporta servicios de regulación de frecuencia y gestión de demanda pico. En este caso, los perfiles de potencia de entrada serán de una naturaleza más controlable que las fuentes RES.

- **Dimensionamiento**

El elemento que más trascendencia tendrá en el costo final del BESS será su dimensionamiento en capacidades de energía y potencia. Existen distintas metodologías usadas para determinar la capacidad de potencia y energía necesaria de un BESS; por ejemplo, se pueden utilizar los perfiles históricos de viento o irradiancia o métodos probabilísticos basados en el error del pronóstico de dichas variables, como los descritos anteriormente. En general, es un problema de optimización que

---

puede utilizar diversos tipos de función de costo que considera adicionalmente restricciones técnicas, reglas de mercado y precio de la energía [76,51,41].

En la revisión de literatura fue frecuente encontrar arquitecturas enfocadas a resolver la aplicación más sencilla de un BESS [59,12,21,7], integración de RES de corto plazo, son sencillas porque no están enfocadas en dar una firmeza de potencia despachable, su función es más bien la de suavizar y limitar las variaciones de las rampas de generación. En dichos casos, el enfoque del dimensionamiento de la solución es estudiar las frecuencias de los perfiles de viento, diseñar un filtro pasa bajas y utilizar el BESS para limitar dichas tasas de cambio.

Islam, Nimmagadda, Subburaj y Bayne [69] concluyen que debido a la limitada capacidad de ciclado de las baterías de plomo-ácido tradicionales y la baja eficiencia, no son adecuadas para aplicaciones de integración de energía eólica. Se recomienda la tecnología de ion de litio como la más apropiada para un BESS que sirva para la integración RES a la red.

Respecto al dimensionamiento en potencia se encontró en varias publicaciones la elección de una potencia de aproximadamente el 20% de la capacidad del parque [69,51]; en algunos casos se justificaba, en otros se elegía como regla heurística.

## ● Ubicación

Los proyectos RES de gran escala suelen estar instalados en sitios remotos y ocupan áreas grandes y dispersas. Una de las preguntas de diseño que surge en la fase de planeación es la ubicación óptima del BESS, adicionalmente, puede surgir la pregunta de si dividir el BESS en múltiples subsistemas en un esquema jerárquico que mejore la controlabilidad del parque de generación o las interacciones con la red eléctrica.

Zhao et al. [51] tratan el aspecto de la ubicación óptima del ESS en un parque eólico. Hay dos enfoques, en el punto de acople común con la red y en cada turbina eólica. El primer enfoque es más típico, porque es un BESS único que atiende las necesidades de todo un parque de generación, mientras que el enfoque de ubicarlo en cada turbina, aunque incrementa la flexibilidad de cada turbina de viento, es una solución costosa y no aprovecha el efecto de suavizado que genera todo un parque de generación eólico distribuido en un área geográfica amplia. A priori, efectos similares se podrían dar en parques solares fotovoltaicos, pero no se encontró literatura al respecto.

Ertugrul [42] aborda la pregunta de cuáles son los beneficios de tener un BESS en un parque eólico comparado con las distintas aplicaciones de red en función de su ubicación. El BESS se puede ubicar en la subestación de energía cerca al punto de conexión, se puede ubicar en cada aerogenerador o se pueden ubicar en algunos puntos óptimos, elegidos según modelación. Finalmente, se concluye que puede haber un punto medio entre una única instalación de un BESS y múltiples BESS que cumplan con todos los objetivos de almacenamiento y despachabilidad de energía, el resultado esperado será un sistema optimizado en desempeño y costo.

---

- **Bus DC/Bus AC**

Una de las características que más variabilidad presenta en la revisión de literatura es la forma de conexión de la fuente RES y el banco de baterías. La conexión se puede hacer a nivel de bus DC, compartiendo un único convertor DC/AC; o los sistemas se pueden conectar en AC, después de sus respectivas etapas de conversión DC/AC. Cada esquema tiene sus ventajas y desventajas, Islam et al. [69] resaltan las ventajas del primer esquema que evita las pérdidas de una etapa de conversión, ya que típicamente un convertor mientras trabaje en un punto de mayor potencia respecto a su capacidad, será más eficiente.

- **Control**

Los sistemas de control son el componente de un BESS que más variantes puede tener, ya que existen gran cantidad de enfoques, objetivos y técnicas utilizadas para lograr los propósitos de la aplicación.

Un patrón continuo que se observa es la jerarquización del control en la medida que se complejiza la dimensión del BESS. Los sistemas pequeños pueden tener un control central simple, pero a medida que crece el tamaño, las funciones de control se pueden desagregar en controles locales encargados de hacer funciones muy ligadas al hardware, mientras que los controles de alto nivel se encargan de funciones más abstractas o estratégicas para el BESS, entre ellas, la de maximizar la vida útil del sistema de batería por medio de balances complejos de cargas, reconfiguraciones dinámicas de la topologías serie-paralelo, interrelación con la red, etc. Gaztanaga et al. [39] ejemplifican un caso de control jerárquico.

Otro enfoque interesante encontrado en la literatura está relacionado con los sistemas ESS distribuidos. Zhao et al. [51] reportan que hay estudios que proponen la coordinación de múltiples sistemas ESS controlados como un ESS virtual; al tener más recurso de almacenamiento agregado, con la correcta estrategia de control, será mucho más eficiente que la eficiencia combinada de los sistemas desagregados. En Japón se está probando una aplicación conocida como *Battery SCADA* que integra múltiples sistemas ESS dispersos en un área grande para controlarlos como un gran ESS; esta aplicación tiene la ventaja de soportar un portafolio de aplicaciones mucho más amplio que lo que podría hacerlo un sistema individual, debido a la gran capacidad de energía de reserva que se puede consolidar, permitiendo realizar las aplicaciones más exigentes en energía, como el arbitramento [51].

- **Sistema de conversión de potencia (PCS)**

Respecto a los sistemas PCS, también se pueden encontrar variantes en el enfoque de diseño de la etapa de conversión de la electrónica de potencia, pero estas variantes obedecen más a criterios del desempeño electrónico o de costos, que a diferencias causadas por el tipo de fuente RES utilizada.

Tradicionalmente se hacen conversiones DC/AC para la integración a la red eléctrica por medio de un transformador que eleva los voltajes de niveles medios a altos; Wang y Yue [10] reportan la

---

implementación de sistemas inversores sin transformador, utilizando técnicas sofisticadas de electrónica de potencia, sin embargo, son sistemas de alto costo por el momento.

Wang y Yue [10] y Miñambres, Guerrero, Barrero y Milanés [59] también abordan el problema de integración de múltiples fuentes de generación de potencia, los artículos argumentan que cada fuente de potencia puede tener una etapa de conversión DC/DC en la cual todas las fuentes finalmente se unen en DC. Dicho enfoque de convertidores adicionales DC/DC permite tener grados de libertad adicionales de control de la potencia generada de un parque RES fotovoltaico o mixto, comparado con el esquema de un solo convertidor DC/DC. Este enfoque de diseño es de aplicación general, independiente de la tecnología RES.

- **Sistemas híbridos de almacenamiento de energía (HESS)**

Un enfoque reiterado de las arquitecturas propuestas para la integración RES, es la de aprovechar el factor diferenciador de los supercapacitores, *Superconducting Magnetic Energy Storage system* (SMES) o *Flywheel energy storage system* (FESS) para complementarlos con BESS y así maximizar el tiempo de vida útil de las baterías. El BESS se usa para realizar las funciones de mitigar las fluctuaciones de baja frecuencia y los dispositivos con alta densidad de potencia como supercapacitores, SMES o FESS para fluctuaciones de alta frecuencia.

Islam et al. [69] afirman que utilizar sistemas híbridos de BESS-supercapacitor puede traer ventajas como la de tener respuesta más rápida a altos requerimientos de potencia para regular frecuencia y generar respuestas suaves. Adicionalmente, ayudan a disminuir la inyección de la cantidad de armónicos que se inyectarían solo con un BESS de capacidad similar.

Helwig [38] y Zhao et al. [51] enfatizan el beneficio de combinar las fortalezas de tecnologías que se complementan en suministro de energía y de potencia, al combinarlas se obtiene lo mejor de cada una. Se referencian varios ejemplos de dimensionamiento de sistemas híbridos a partir de los perfiles espectrales de viento e irradiancia; adicionalmente, utilizando los perfiles de carga, se desarrolla un modelo para dimensionar un BESS que funcione para el peor escenario, el día de más carga y menos generación.

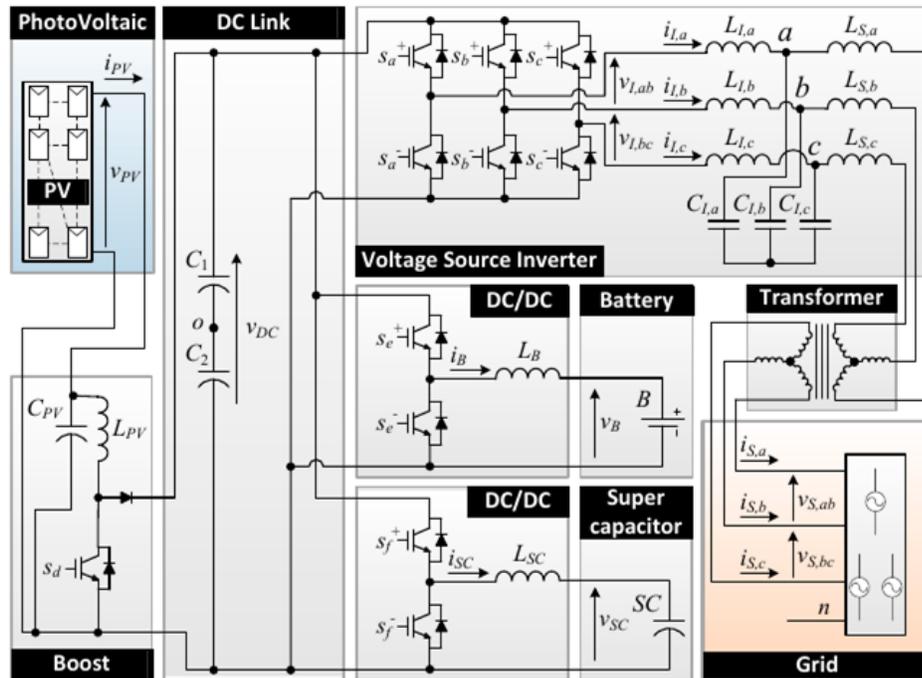
Miñambres et al. [59] proponen un control de un HESS compuesto de un BESS y un supercapacitor, como estrategia de control se prioriza la maximización de la vida útil de las baterías y entregar una potencia constante (*schedulability*). Se propone un método de dimensionado del sistema para cumplir con los objetivos de potencia y energía. En el análisis de este artículo, se detecta una carencia del método y es que no considera todos los elementos de la vida útil del sistema a  $n$  años proyectados de vida útil, se ve más como un modelo de corto plazo.

En general, las interrelaciones potencia/energía de un sistema de baterías puro implican un sistema no optimizado de tamaño de batería, que provee la cantidad adecuada de energía con exceso de potencia o capacidad adecuada de potencia con insuficiencia de energía. La tecnología de supercapacitores provee alta densidad de potencia. Además, los supercapacitores tienen un mejor desempeño carga/descarga que cualquier batería, implicando una disminución en las pérdidas del sistema que incrementan la vida del sistema debido a la baja temperatura de operación.

En la Figura 5 se observan los elementos constitutivos de una arquitectura híbrida para sistema solar fotovoltaico con supercapacitores.

Sudha y Senroy [12] resaltan la utilidad de utilizar modelos estocásticos del viento para diseñar la capacidad de un BESS al perfilar el ingreso de energía al sistema. Adicionalmente, plantean la estrategia de usar un FESS y un BESS, el FESS asume los componentes de potencia de alta frecuencia y el BESS los componentes de baja frecuencia, en el diseño del controlador se filtran componentes de potencia con ciertos criterios que prolonguen la vida del sistema de baterías.

Figura 5 Arquitectura híbrida de un BESS que integra un RES solar fotovoltaico y un supercapacitor



### 5.5.2 Diferencias de un BESS acoplado a plantas eólicas o solares

Respecto a las soluciones técnicas implementadas para atenuar la oscilación de potencia en plantas eólicas, Abhinav et al. [76] reportan múltiples técnicas que se pueden implementar en los dos tipos de plantas RES. Sin embargo, existe una estrategia que es única a las plantas eólicas, la utilización de un BESS junto con el control del ángulo de *pitch* de los aerogeneradores.

Debido a que los aerogeneradores no tienen respuesta inercial como la tienen los generadores síncronos debido a la electrónica de potencia intermedia, los sistemas de control pueden simular este comportamiento para aportar algo en la regulación de frecuencia [76]. Esta característica también se ha implementado en sistemas fotovoltaicos [10]; sin embargo, los sistemas eólicos son sistemas

mecánicos mientras que en los sistemas fotovoltaicos la simulación de la inercia es una abstracción total.

Otra diferencia entre los sistemas RES eólicos y fotovoltaicos, consiste en que en general el perfil de vientos no tiene un cambio ente el ciclo diurno-nocturno como el experimentado por las plantas solares fotovoltaica. Esta diferencia en el flujo de potencia de generación puede cambiar las estrategias de administración de los ciclos de carga de las baterías. Por ejemplo, un parque eólico, continuamente generará un flujo de potencia variable, y las baterías permanentemente pueden estar en un SOC parcial. En el sistema solar fotovoltaico, en la noche no generará, por lo que las baterías, por cada ciclo de 24 horas tendrán más de 10 horas para cargarse, con energía barata, hasta un SOC del 100% para el nuevo día, esta característica tendrá efectos en el desempeño de las estrategias específicas que se definan de gestión del SOC y SOH. Adicionalmente, se ha encontrado que en un sistema mixto eólico-solar fotovoltaico, el sistema solar PV afecta más el SOC del sistema de baterías, por lo que hay campo abierto para la investigación en esquemas de control que mejoren el desempeño de los BESS en este aspecto [71].

## 5.6 ¿Cuáles son las tendencias actuales en la aplicación de las tecnologías estudiadas?

En la revisión de la literatura se encontró gran variedad de estudios en múltiples aspectos de los BESS tanto en tecnologías de baterías como en sus arquitecturas. En las tecnologías de baterías resalta la búsqueda de nuevas químicas que mejoren las características de desempeño como la potencia y densidad de energía, extender el ciclo de vida, reducir los tiempos de carga y descarga, asegurar una operación segura y reducir costos[72]; en las arquitecturas de BESS se exploran múltiples facetas de topología, sistemas y algoritmos de control, la electrónica de potencia; finalmente, se identifican tendencias a nivel de aplicaciones reales realizadas para medir el desempeño de los BESS integrados a la red con algún énfasis especial según el tema de investigación. A continuación, se muestran los detalles de dichos hallazgos.

### 5.6.1 Tecnologías de baterías

- **Plomo-Ácido**

El electrodo positivo de las baterías VRLA típico es susceptible de corrosión, lo que acorta el ciclo de vida de las baterías, varios materiales se están evaluando para mejorar la resistencia a la corrosión. Las investigaciones también se centran en los electrolitos y la válvula de seguridad [72].

A pesar de las limitaciones de la tecnología plomo ácido anteriormente estudiadas, todavía se ven esfuerzos por viabilizar u optimizar la tecnología, como lo muestran Sano et al. [21] y Wood [9] con el desarrollo de baterías de válvula reguladora de larga vida (*Long Cycle Life Valve-Regulated Lead-Acid Battery* [21] y *UltraBattery* [9]), que reportan resultados alentadores en la posibilidad de utilización de este tipo de tecnologías en parques RES al trabajar en estados de carga parcial y mejoras en la densidad de energía .

Soloveichik [16] reporta múltiples mejoras; como mejora en la resistencia a la corrosión del colector de corriente haciéndolo de una espuma de carbón de gran área y mejora en la resistencia a la corrosión del electrodo negativo con recubrimiento de grafito. También reporta el uso de aleación plomo-antimonio para mejorar la resistencia a la corrosión, pero tiene la desventaja de la toxicidad del antimonio. Se está investigando el uso de selenio y otros elementos para sobrepasar esta deficiencia. Respecto a los electrolitos y separadores, reporta el uso de un electrolito gel de polisiloxano con una estructura de red 3D que mostró alta capacidad de descarga y mejor tolerancia a la temperatura que el electrolito tradicional de gel sílice pirógeno.

El cambio del electrodo negativo de plomo por doble ánodo, uno que contiene una cubierta metálica de plomo y otro con segunda cubierta de material a base de carbón, permite a la batería operar con alta potencia debido al comportamiento de supercapacitor y extender su ciclo de vida al no estresar la batería [26].

- **Basadas en litio**

Dadas las limitaciones de las baterías de litio comentadas anteriormente, surge la oportunidad de buscar elementos de bajo costo, altamente seguros y de alta reversibilidad que sustituyan el nicho que ocupan las baterías de litio. Comparado con el litio, el sodio tiene propiedades físicas y químicas similares; sin embargo, el sodio es abundante y de bajo costo [27].

- **Electrodos**

Uno de los grandes campos de desarrollo de las baterías de litio es la búsqueda de mejor estabilidad y desempeño de los electrodos, esto con el fin de encontrar materiales que inhiban o disminuyan la generación de dendritas, uno de los principales problemas de seguridad de estas baterías. Según Li et al. [32] algunos de los materiales investigados son:

Litio-telurio: el telurio es de los materiales más electronegativos con un OCV de 1.75 V. y potencial para aplicaciones de alta densidad de energía. Sin embargo, dada la poca abundancia del telurio, es una solución costosa para la implementación en BESS.

Litio-Bismuto. Baterías operadas a 550°C han reportado un ciclado ultra largo, sin pérdida aparente después de los 1000 ciclos. A pesar del buen desempeño, al tener un costo de más de 220 USD/Kwh en materiales de electrodo, hace prohibitivo su uso para almacenamiento de energía de gran escala, 2.7 veces más que el antimonio.

Ánodo de litio-antimonio o litio-plomo-antimonio: El antimonio tiene alta electronegatividad y bajo costo. El antimonio sería una buena opción si trabajara a una temperatura de fundición mucho más baja. La celda debe operar a una temperatura de 630°C, que incrementa altamente los costos de los materiales de la batería y los problemas de corrosión. Utilizando la aleación de plomo, dado que el punto de fusión del plomo es más bajo, baja la temperatura de operación de la celda a 450°C y podría llegar incluso a menos de 400°C si se optimiza la composición del electrolito. También muestra facilidad de escalado para la fabricación, lo que reduce el costo de las celdas. El costo de los ánodos es de 69 USD/KWh, mucho menor que con sólo antimonio.

---

El electrodo Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ha atraído interés en las baterías de litio para aplicaciones de gran escala debido a su alta abundancia, bajo costo y baja toxicidad [50].

- **Electrolito**

Soloveichik [16] reporta que la seguridad de las baterías de litio se puede mejorar utilizando electrolitos acuosos como LiNO<sub>3</sub>, Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; sin embargo, hay limitantes como el voltaje de la celda y los ciclos de vida de tales baterías es limitado.

- **Comercialización**

De acuerdo con múltiples autores [70,61,30,22,64], el panorama de desarrollo y comercialización de las baterías basadas en litio se verá restringido en el futuro dada la disponibilidad del litio en la corteza terrestre y ser considerada una tierra rara, por lo que se justifican los esfuerzos de investigación en baterías basadas en materiales más abundantes como el sodio.

- **Aplicación**

Dado los altos costos del desarrollo de BESS para sistemas de gran escala, Koch-Ciobotaru et al. [34] proponen el desarrollo de sistemas de almacenamiento con baterías de segunda vida, específicamente las baterías desmanteladas del primer ciclo de vida en servicio de carros eléctricos aplicadas en integración de RES a la red. Adicional a los impactos en reducción de costos, se minimiza el impacto ambiental al extender el ciclo de vida de las baterías.

De los 14 sistemas de ion de litio reportados por Zaghbi, Mauger y Julien [5], 12 sistemas han sido destinados para la aplicación de regulación de frecuencia, los dos restantes se usan para aplicaciones de arbitramento de energía.

Dado que todavía hay un gap de conocimiento respecto a múltiples aspectos del desempeño de los BESS en aplicaciones de integración RES, la investigación de Dubarry et al. [43] busca monitorear, cuantificar y analizar la degradación de las baterías instaladas en el BESS y testear celdas individuales en un entorno de laboratorio para entender los patrones de envejecimiento de la celda, reproducir patrones observados en la vida real y acelerar la degradación para habilitar el diagnóstico de fin de vida de la batería. Uddin, Gough, Radcliffe, Marco y Jennings [55] reportan un estudio y desarrollo de un modelo exhaustivo de degradación de baterías que contiene todos los elementos conocidos (más de 50) que afectan la degradación como el envejecimiento de calendario, temperatura ambiente, estado de descarga, profundidad de descarga, etc.

- **Basadas en sodio**

Dadas las limitaciones inherentes de las baterías sodio-sulfuro por trabajar a altas temperaturas y los riesgos de seguridad que ello acarrea. Se motiva la investigación de baterías de sodio a temperatura ambiente, aquí es donde las baterías de ion de sodio (SIB) se convierten en una alternativa a considerar, especialmente en las aplicaciones de BESS de gran escala [61].

Una de las tendencias identificadas en la naciente corriente de desarrollo de SIB es, por analogía, utilizar la gran base de la investigación de las baterías de litio que potencialmente pueden funcionar. De hecho, se han logrado progresos rápidos en la identificación de materiales del electrodo positivo

---

como óxidos de metal laminado y compuestos poli aniónicos que muestran resultados alentadores. Sin embargo, en cuanto al material de electrodo negativo todavía hay oportunidad de mejora, se ha utilizado el grafito con resultados decepcionantes dada la baja capacidad energética. Por otro lado, se han logrado resultados alentadores utilizando carbón duro aleado con otros materiales.

- **Electrodos SIB**

Hwang, Myung y Sun [70] de manera exhaustiva muestran los intentos que está haciendo la comunidad científica por encontrar los materiales que permitan escalar las soluciones a una implementación masiva. Detallan el desempeño de al menos 29 materiales para el electrodo positivo, 23 materiales para el electrodo negativo y 12 entre compuestos y aditivos para el electrolito. Li et al. [30] exploran los materiales que se están investigando para los electrodos positivos ya que son los que representan más reto. Las conclusiones son similares a las de Hwang et al. [70] en el que se observa buen desempeño en los electrodos negativos fabricados con carbón duro (*pyrolyzed anthracite*), material prometedor por sus características de costo y seguridad.

- **Seguridad**

La empresa NGK Insulators, principal productora de baterías de sodio-sulfuro ha comenzado la producción de nuevas baterías que han sido modificadas para evitar la dispersión del fuego, agregando fusibles entre las celdas de batería y elementos anti-fuego entre los módulos de batería para mejorar la seguridad [5].

- **Redox-flow**

Las baterías de vanadio son las más desarrolladas; sin embargo, hay una gran cantidad de combinaciones de diferentes parejas de electrodos positivos y negativos que se están investigando. Por ejemplo, hierro-cromo, polisulfuro-bromuro [57].

- **Electrolitos**

Entre los electrolitos acuosos se están investigando: electrolito con complejos metálicos disueltos, electrolito totalmente orgánico, electrolito basado en litio, electrolito acuoso basado en polímeros [57,46].

Las baterías con electrolitos no acuosos tienen potencial electroquímico más grande que el electrolito acuoso. Estos electrolitos tienen la habilidad de ofrecer alto voltaje de celda y pueden ofrecer densidad de energía más alta; por ejemplo, el acetonitrilo y carbonato de propileno pueden lograr voltajes superiores a 5V; sin embargo, las densidades de energía todavía son bajas [33].

Sin embargo, al menos en el corto y mediano plazo se espera que las baterías con electrolito acuoso sean la opción de elección dado el bajo costo del solvente, la alta conductividad del electrolito, la robustez de las mezclas metal-sales y la compatibilidad con la membrana de intercambio de iones.

Las baterías orgánicas tienen proyección debido a la limitante actual de utilizar materiales costosos (e.g. vanadio) como la especie activa del electrolito. El uso de parejas *Redox* orgánicas en electrolitos acuosos y no acuosos son prometedoros para la reducción del costo de desarrollo en el largo plazo, ya que estos materiales pueden ser de bajo costo y abundantes. El desempeño de las parejas *Redox*

---

se puede sintonizar modificando su estructura química. En los años recientes, ha habido un desarrollo significativo de moléculas orgánicas altamente solubles, capaces de proveer un voltaje de celda y capacidad de carga comparable con los sistemas convencionales basados en metales [33].

Chalamala et al. [46] reportan que hay un creciente nivel de investigación básica y aplicada en baterías de *Redox flow* enfocada en mejorar la densidad de energía de los electrolitos, la densidad de potencia de los *stacks* de la batería, la eficiencia energética del sistema completo, a lo largo de un amplio rango de condiciones operativas, y con componentes de alta confiabilidad. Adicionalmente, hay esfuerzo significativo en reducir los costos de manufactura y operación de estos sistemas. Todas estas mejoras eventualmente incrementarán la probabilidad de una penetración temprana en el mercado para aplicaciones BESS.

- **Níquel- hierro**

Posada et al. [26] reportan que las baterías de níquel-hierro han obtenido resultados interesantes con la eliminación de la descomposición del electrolito utilizando grandes concentraciones de sulfuro de hierro en el electrodo; sin embargo, a cambio de la capacidad y el ciclo de vida.

- **Baterías con electrodo líquido**

Las baterías con electrodos en estado líquido tienen la ventaja de no verse sometidas a deformaciones mecánicas al ser operadas en regímenes de alto consumo de potencia, lo que garantiza de manera inherente un largo ciclo de vida, son simples de fabricar ya que la estructura se auto organiza por la densidad de sus componentes líquidos. La batería de litio-antimonio-plomo sobresale en este tipo de baterías [11]

Los electrolitos y sales fundidas en baterías de metal líquido deben cumplir con los siguientes criterios: bajo punto de fusión, alta conductividad iónica, densidad apropiada, no tener reacciones espontáneas entre los electrodos y el electrolito, inmiscibilidad con los electrodos de metal líquido [11]. De todos los requerimientos, la solubilidad del metal líquido en el electrolito de sales fundidas es el principal reto. El sodio y calcio se disuelven en cierto grado en las sales fundidas, conduciendo electrones a través del electrolito, por lo tanto, se produce autodescarga y baja eficiencia *round-trip*. El uso de sales fundidas multi-cationes puede ayudar a reducir la solubilidad del metal líquido y bajar la temperatura del punto de fusión de la sal fundida. Para estos materiales, los que mejor desempeño de conducción de iones presenta son las sales de litio y yodo. Debido al problema de solubilidad de metales líquidos en las sales fundidas, los electrolitos de estado sólido se presentan como una alternativa [32].

---

## 5.6.2 Arquitecturas de BESS

- **Topología**

- **Múltiples sistemas de almacenamiento**

Por el momento no existe una fórmula o topología única establecida para resolver las necesidades específicas de las aplicaciones de integración de RES a la red. Aunque manejan los mismos subsistemas: banco de baterías, controlador, convertor de potencia; hay gran cantidad de variantes en las formas de concebir el BESS.

Una de las tendencias es la integración de supercapacitores, FESS o SMESS a los BESS para conformar un sistema híbrido de almacenamiento de energía (HESS) como en [59,12,6,71]. El HESS reduce el ciclado y profundidad de descarga del BESS, y alarga la vida útil de las baterías.

Se pueden encontrar variantes de integración de las fuentes híbridas de forma pasiva, semi-activa y totalmente activa. El esquema híbrido pasivo es el más simple y económico, pero trae desventajas, ya que no tiene control. La versión totalmente activa mejora el desempeño, pero la etapa de potencia requiere dos convertidores DC/DC y su respectivo sistema de control.

El sistema propuesto por Miñambres et al. [59] utiliza supercapacitores, los dispositivos más populares en la literatura revisada para constituir un HESS. Sudha y Senroy [12] utilizan un FESS para proveer potencia.

- **Múltiples fuentes de energía**

Otra tendencia que se encuentra en la literatura es que integran múltiples fuentes de energía renovable simultáneamente, principalmente solar y eólico [8,31,71].

- **Diseño**

Las variables que se consideran en el diseño de los BESS pueden variar ligeramente dependiendo del propósito de la aplicación; sin embargo, sobresale que en general los principales criterios son: maximizar utilidad, maximizar la vida útil de las baterías, cumplir con el código de red, minimizar el costo de capital y operacional. Los otros parámetros que también son considerados son: la eficiencia *round-trip*, capacidad de potencia y almacenamiento, límites operativos del SOC, *C-rate*, patrones de entrada (series meteorológicas) [22].

- **Topología del banco de baterías**

Consiste en la reconfiguración dinámica de las conexiones entre arreglos serie-paralelo de las baterías de acuerdo con las condiciones actuales en términos de estado de carga y estado de salud de las baterías. Surgen como una solución a los problemas existentes en los bancos convencionales de baterías como son la baja eficiencia energética, bajo ciclo de vida, problemas de seguridad y baja confiabilidad. La reconfiguración trae como ventaja asegurar el estado balanceado de las celdas durante la carga y descarga proveyendo una tolerancia robusta a las fallas [45]. Aunque inicialmente este control puede ser costoso, resuelve un problema natural que ocurre con los bancos de baterías convencionales, con la masificación se hará más económico.

- **BESS Virtual de gran escala**

Consiste en crear una capa de abstracción para el control de múltiples BESS de distintas tecnologías y despacharlos como si fueran un solo BESS, este concepto se llama *software defined batteries*[45]. Adicionalmente, este sistema consideraría las diferencias específicas de cada sistema y combinaría los controles de manera tal que optimiza el desempeño de cada BESS utilizando las mejores características de cada tecnología.

Este concepto es cercano al de *Energy Internet*, en el que se utilizan abstracciones de redes de datos para usarlas en aplicaciones de energía, por ejemplo, se habla de enrutadores de energía que tendrían funciones homologas al enrutador de datos realizando transferencias de paquetes de datos entre redes.

El surgimiento de los carros eléctricos puede ser un vector de desarrollo de las tecnologías de baterías virtuales al integrar toda la capacidad de energía que representa un área geográfica en un gran BESS que provea servicios a la red eléctrica [17]

- **Sistemas de control**

Una de las grandes tendencias en investigación de sistemas de almacenamiento es la de encontrar formas inteligentes de operar los BESS. Dadas las dinámicas de los baterías en su ciclo de vida, una estrategia estática no es la solución para maximizar el retorno económico del uso del almacenamiento y a la vez minimizar la degradación del activo de almacenamiento, la estrategia debe ser dinámica [9,72]. El problema de control no es trivial. Los sistemas de baterías, por optimizar la vida útil de la batería, deben preferir hacer restricciones de carga (*curtailment*) envés de cargar las baterías, e incumplir con el ISO envés de descargar las baterías en el momento no adecuado y así reducir vida útil del BESS que en el largo plazo es más perjudicial. Este problema se convierte en un problema de optimización [35].

En la literatura se encuentran diseños de sistemas de control ligados a plantas RES. En varios casos analizados se encuentra que el dimensionamiento y diseño del sistema utiliza como insumo básico la serie de entrada de la variable velocidad de viento o irradiancia y, a partir de estas, se desarrollan simulaciones, los resultados obtenidos pueden ser diferentes según el tipo de tecnología.

En cuanto a los enfoques de investigación se encuentran desde investigaciones enfocadas en simulaciones puras, hasta esquemas experimentales que prueban las hipótesis de investigación en el mundo real. Caruana, Sattar, Al-Durra y Muyeen [47] utilizan herramientas de simulación y sistemas conocidos como *Hardware in the Loop* para tener mediciones del BESS en tiempo real y afinar las estrategias de control propuestas.

Daud, Mohamed y Hannan [72] reportan el modelamiento de las baterías utilizando un modelo dinámico de tercer orden para diferenciar de manera exacta los esquemas de control utilizados para el despacho de energía solar y de viento.

- **Diseños de sistemas de control ligados a plantas eólicas**

Zhang et al. [1], Yang D. et al. [7] desarrollan una técnica de diseño con el objetivo de alcanzar despachabilidad de las plantas eólicas utilizando un BESS. Zhang et al. [1] proponen la simulación Monte-Carlo secuencial, utilizada para simular las operaciones de los BESS integrados al parque eólico durante un año y cuantifican los beneficios, costos y ganancias. Yang D. et al. [7] diseñan un sistema utilizando pronósticos de viento que minimicen el costo de las acciones del BESS y garanticen el seguimiento a la programación del despacho.

Dado que por un lado hay necesidades energéticas para complementar la generación eólica, y por otro lado hay restricciones de operación del BESS para que las baterías no se degraden, Zhang et al. [1] proponen la separación del banco de baterías en dos partes que se utilizan para compensar desviaciones de potencia positivas y negativas respectivamente.

Es notorio el énfasis que hacen los investigadores en la necesidad de tener pronósticos de alta precisión, dado que el sistema se diseña como un balance delicado y optimizado entre los patrones de entrada de la variable meteorológica (viento, irradiancia) y las restricciones del BESS, las desviaciones del pronóstico incrementan las cargas sobre el BESS y subsecuentemente deterioran el desempeño del despacho de generación [1].

El algoritmo más utilizado en las aplicaciones de integración RES a la red de corto plazo, especialmente plantas eólicas, es el filtrado pasa bajas. Se define un objetivo de potencia de salida como la salida filtrada de la potencia actual, el BESS define como consigna la diferencia entre el valor de potencia filtrado y la potencia actual del parque eólico [7,51].

- **Diseños de sistemas de control ligados a plantas solares fotovoltaicas**

De La Parra, Marcos, García y Marroyo [44] definen un esquema de control para limitar las rampas de cambio de la generación y cumplir con el código de red aplicado a sistemas solares fotovoltaicos. La estrategia de control consiste en modificar de manera dinámica las rampas de descarga de potencia del BESS en función del SOC, si el sistema está en un nivel bajo de SOC, se modifican las pendientes para que el sistema pueda ser cargado con facilidad, si el SOC es superior al valor de referencia, las pendientes se modifican para descargarlo y llevarlo al punto de referencia de SOC, de esta forma se minimiza el uso del ESS.

Tradicionalmente los códigos de red exigen ciertos servicios de soporte a la red altamente relacionados con la respuesta inercial de los generadores síncronos, dada la naturaleza no mecánica de la generación solar fotovoltaica, algunas investigaciones se enrutaban en emular una respuesta inercial en parques solares fotovoltaicos, esta emulación tendrá una respuesta directa en las rampas de entrada y salida de potencia y la respuesta de regulación primaria que se pueden obtener del sistema PV-BESS [10].

Aunque las arquitecturas de BESS centralizadas tienen cierta ventaja al gestionar todo el recurso de almacenamiento de manera óptima, aprovechando las economías de escala; hay un argumento a favor de la descentralización de los sistemas de almacenamiento para plantas solares fotovoltaicas. En las plantas solares fotovoltaicas ocurre el fenómeno de sombreado parcial, esto se puede entender como fenómenos de intermitencias localizadas dentro de una gran planta. Essakiappan et al. [41]

---

proponen un sistema de almacenamiento distribuido al agrupar la generación en unidades más pequeñas, esto incrementa la granularidad de la mitigación de la intermitencia, diferentes secciones de la planta pueden ser controladas de manera independiente para mitigar los efectos de sombreado parcial. Con un dimensionamiento de 10% en potencia instalada, se atenúan los errores de pronóstico en un 80% reduciendo los costos de penalización por desviación.

- **Plantas Virtuales**

Riaz, Chapman y Verbic [24] en la línea de los sistemas de baterías virtuales, están desarrollando técnicas de optimización avanzadas de múltiples capas. Consiste en hacer una optimización a nivel del sistema global con ciertos objetivos, y luego, en una escala física más baja, se priorizan otros objetivos de optimización. Este enfoque tiene aplicación por ejemplo en la agregación de sistemas de almacenamiento caseros, pero coordinados como un gran BESS que pueda ofrecer servicios a la red. En la capa superior se optimiza el objetivo de reducir los costos de electricidad para todos los consumidores. En el nivel más bajo, a cada consumidor se le intenta maximizar el autoconsumo (Solar fotovoltaico-BESS). Sechilariu, Wang y Locment [19] reportan el uso de sistemas multiagente para hacer un control energético de alto nivel en aplicaciones de integración de energía renovable distribuida.

- **Electrónica de potencia**

Respecto a los sistemas de conversión de potencia, se pueden detectar tendencias hacia la utilización de convertidores inversores de tres niveles en vez de dos y, se encuentra que el paradigma de utilizar transformadores de línea en el diseño de convertidores DC-AC se puede reevaluar, al integrar convertidores que se puedan conectar directamente a la red de media tensión y así incrementar la eficiencia del sistema al eliminar un eslabón que tiene pérdidas [53]; sin embargo, estos sistemas todavía son costosos y será necesario esperar que las economías de escala reduzcan sus precios.

- **Aplicaciones RES-BESS**

A nivel de aplicaciones implantadas, Patel [58] reporta que las baterías de ion de litio dominaron el mercado mundial, en 2016 los sistemas de ion de litio tuvieron una participación del 97% de los proyectos en Estados Unidos, principalmente atribuible a la caída de precios y la aceptación creciente de la tecnología en términos de bancabilidad. Mientras tanto las tecnologías de plomo ácido solo obtuvieron el 1.6% de la capacidad instalada en Estados Unidos, se espera que esta tecnología alcance 990 MW instalados a nivel mundial para 2020, aunque ha habido mejoras en la tecnología, los sistemas de litio presentarán una fuerte competencia a nivel de precios y desempeño al no tener las limitaciones que la tecnología de plomo-ácido tiene. El segmento de las baterías de sodio-sulfuro también se espera que mejore, con un crecimiento de 1450 MW instalados mundialmente para 2020, ya que los costos de la tecnología están bajando continuamente. Respecto a las baterías de *Redox flow*, aunque las eficiencias han mejorado y los precios han bajado en los años recientes y a pesar de tener muchas de las características deseables para la implementación de BESS de gran escala, no se han notado avances de amplia implementación en el campo.

---

De acuerdo con Ertugrul [42] se espera que el mercado global de sistemas de almacenamiento tenga un crecimiento de 500MW en 2016 a 9 GW en 2025.

Patel [58] también reporta un hito interesante en la historia de los BESS al final del año 2016 respecto a las aplicaciones de almacenamiento; gran parte de las instalaciones nuevas en Estados Unidos se caracterizaron por instalar alta capacidad energética, no solo capacidad de potencia, en la que la capacidad típica es de 4 horas de autonomía.

A nivel regulatorio también se notaron tendencias que ayudarán a los BESS a prosperar. A finales de 2016, la *Electricity Storage Network* del Reino Unido otorgó contratos de 15 años a proyectos con componentes de almacenamiento. En la Unión Europea una iniciativa de diseño de mercado, busca proveer condiciones favorables para todas las soluciones de flexibilidad en la red, especialmente la integración de RES a la red. De acuerdo con la *International Finance Corporation*(IFC), China está en el proceso de reformar sus mercados de energía, abriendo oportunidades a productores independientes de potencia para proveer servicios auxiliares y capacidad con BESS, similares acciones se están tomando en Chile, Brasil y Méjico.

El gobierno de Alemania está haciendo esfuerzos para incentivar el desarrollo de los RES. De acuerdo con sus estudios, cuando los RES lleguen a un nivel de penetración del 40% en el sistema nacional, será necesario proveer una capacidad importante de BESS para dar estabilidad a la red y capacidad de reserva [38].

Jiang y Gong [67] hacen un análisis de la utilidad de los BESS en el soporte de las necesidades energéticas de los países. Se ha reconocido el valor de que existan interconexiones entre países con el propósito de proveer confiabilidad, respaldo y complementariedad entre los recursos energéticos entre dos países, pero pueden haber situaciones de índole geopolítico que limiten estas posibilidades. Estas limitaciones se pueden remediar parcialmente con la utilización de BESS que aporten servicios a la red de transmisión. Hay pocas investigaciones que planteen escenarios energéticos que capturen las diferentes configuraciones que se pueden establecer.

Jiang y Gong [67] también resaltan que aunque las tecnologías de almacenamiento son soluciones esperanzadores, el reto técnico de alcanzar alto grado de penetración de los RES para el 2050 es grande; critica el escenario optimista propuesto por BP (*technology Outlook*) de que es posible lograr penetraciones del 75% con los RES y resolver la intermitencia de las fuentes con tecnologías de almacenamiento, respuesta a la demanda, generación flexible y mejor conectividad, pero no se resuelve la brecha que habría en altos costos y más bajas eficiencias.

La *European Renewable Energy Council* (EREC) afirma que, aunque las tecnologías de almacenamiento son necesarias para acelerar la implantación de plantas solares fotovoltaicas en Europa, esta no es la única tecnología. La flexibilidad en la red se puede lograr a través de medidas tanto en el lado de la oferta como en el de la demanda; por ejemplo, con capacidad de generación flexible, almacenamiento en la red, tecnologías del lado de la demanda y expansión de la infraestructura de transmisión [67].

## 5.7 ¿Alguna tecnología de baterías se perfila como la solución dominante en aplicaciones de almacenamiento e integración de generación con fuentes renovables en la Smart Grid?

Para responder esta pregunta se utilizó la información consolidada por el *Department Of Energy* (DOE) de los Estados Unidos en una base de datos llamada: *DOE Global Energy Storage Database* [77], que hace seguimiento a los sistemas ESS instalados en todo el mundo, respecto a ubicaciones, capacidad en potencia, duración, servicios y aplicaciones. Esta base de datos está actualizada hasta el primero de abril de 2018 y es un referente de información más actualizado que la información reportada de la literatura científica.

La base de datos está compuesta de 1041 proyectos BESS, de los cuales 379 son proyectos mayores a 1 MW. El análisis se centró en dichos proyectos. A partir de la base de datos de proyectos, se sintetizaron los siguientes elementos de análisis para responder la pregunta de investigación en cuestión: Tabla 24 Desempeño de tecnologías de baterías. Tabla 25 Distribución de las tecnologías según el tipo de servicio o aplicación, Figura 6 Diagrama de dispersión potencia-duración para los distintos tipos de tecnologías..

Tabla 24 Desempeño de tecnologías de baterías.

Tipo Tecnología	Cant. de proyectos BESS	Potencia instalada	% Cant. Proyectos	% Potencia instalada
Litio	272	2768.195	71.77%	79.97%
Sodio	37	202.7	9.76%	5.86%
Plomo-Acido	22	100.625	5.80%	2.91%
<i>Redox flow</i>	21	308	5.54%	8.90%
Capacitor				
Electroquímico	20	31.68	5.28%	0.92%
Metal-Aire	4	18.4	1.06%	0.53%
Níquel	3	32	0.79%	0.92%
Total general	379	3461.6	100.00%	100.00%

\*Datos base tomados de [77], última consulta: abril de 2018.

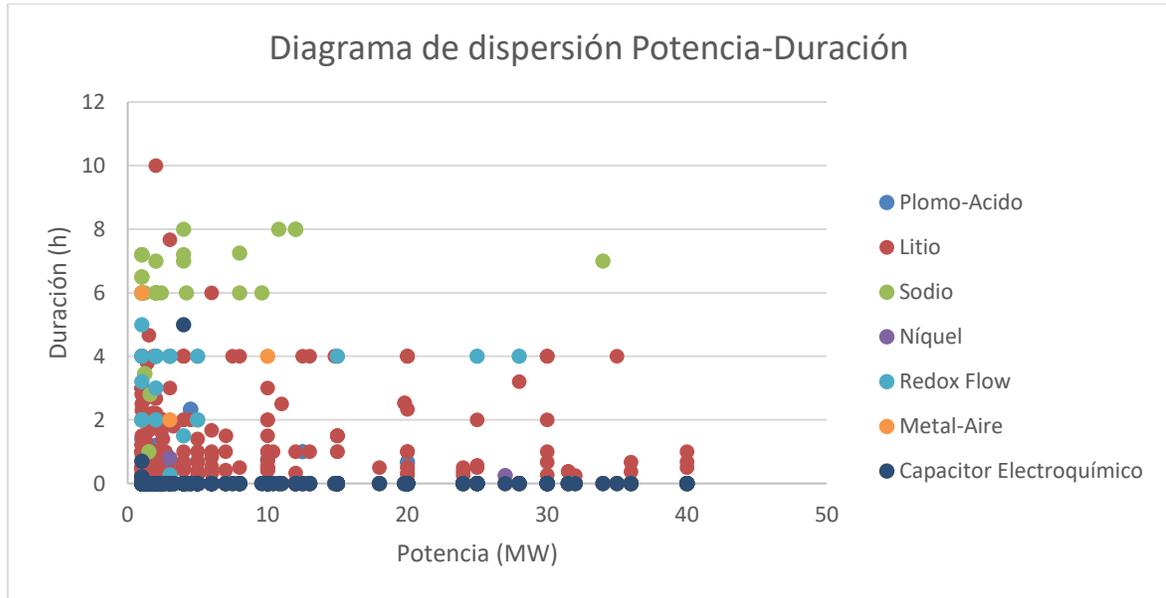
En la Tabla 24 se observa la cantidad y potencia instalada de los proyectos analizados. Se hace claro que la tecnología de litio es dominante tanto en cantidad de proyectos (71.7%) como en potencia instalada (79.97%).

En la Figura 6 se observan los patrones de instalaciones típicas según los tipos de tecnologías. Es notoria la aglomeración de BESS de toda clase hacia el origen, dados los costos de los BESS hace unos años, estas soluciones no eran muy grandes.

Las tecnologías de litio están en todo el espectro de la aplicación en duración y en capacidad de potencia. Las tecnologías de sodio están enfocadas en duraciones largas con gran cantidad de aplicaciones enfocadas en duraciones de más de 6 horas. Los sistemas capacitivos sobresalen por manejar un amplio rango de potencias, pero muy baja duración, virtualmente cero en el gráfico. Los sistemas *Redox flow* también se están enfocando en aplicaciones de al menos 4 horas de

almacenamiento y cada vez más grandes, sobresale el reporte de la construcción del sistema de 200 MW/800mWh de vanadio en China, el sistema que cuando esté terminado será el BESS más grande del mundo (No se muestra en el gráfico ya que distorsiona la visualización de los otros puntos).

Figura 6 Diagrama de dispersión potencia-duración para los distintos tipos de tecnologías.



\*Datos base tomados de [77], última consulta: abril de 2018.

La Tabla 25 Distribución de las tecnologías según el tipo de servicio o aplicación brinda una visión detallada del actual uso de cada tipo de tecnología.

Lo primero que hay que notar es que la lista consolidada por el *DoE* de Estados Unidos considera un abanico más desagregado de servicios; por ejemplo, discrimina específicamente las aplicaciones de distribución y las de transmisión; adicionalmente, discrimina algunas aplicaciones enfocadas en energías renovables con categorías separadas para plantas solares y eólicas. A pesar de esta diferencia, los servicios descritos en la “Tabla 1 Servicios que puede proveer un ESS” son en principio los mismos plasmados en tabla del *DoE*.

De acuerdo con estas estadísticas, a nivel general, independientemente de la tecnología, las aplicaciones más utilizadas con sistemas de almacenamiento de energía en orden de intensidad de uso son: regulación de frecuencia, afirmado de la capacidad de energía de fuentes renovables, arbitramento de energía eléctrica y soporte de voltaje.

A nivel de tecnologías específicas se nota lo siguiente:

Las tecnologías de litio actualmente se están utilizando en todo el espectro de aplicaciones de almacenamiento de energía y en casi todas las aplicaciones, son la tecnología dominante en cantidad de proyectos y volumen de energía gestionada.

Las tecnologías de sodio, aunque siguen el patrón general en cuanto a las principales aplicaciones de almacenamiento, la aplicación de arbitramento de energía eléctrica sobresale más, reiterando el perfil que tiene esta tecnología como una solución enfocada más al suministro de energía que de potencia eléctrica.

Las tecnologías de plomo y *Redox flow* siguen las tendencias generales de las aplicaciones. Las tecnologías de plomo denotan una utilización más enfocada al suministro de potencia eléctrica, mientras que las aplicaciones *Redox flow* se inclinan un poco más a las aplicaciones de suministro de energía.

Respecto a los capacitores electroquímicos, es notoria la ventaja de esta tecnología respecto a los BESS. Debido a las características de entregar potencia reactiva de manera muy rápida y por una cantidad de ciclos mucho más elevada que los BESS, hoy día es una opción atractiva para las aplicaciones que requieren las características descritas anteriormente como el soporte del voltaje y de la transmisión, de hecho, esta última es de las pocas aplicaciones en las que la tecnología de litio no es dominante.

Las tecnologías de metal-aire y níquel tienen una participación tímida en el mercado. Por lo estudiado en la revisión, se espera que las baterías de metal-aire tengan más desarrollo investigativo para mejorar su desempeño y ser soluciones atractivas; las baterías de níquel, a menos que tengan algún desarrollo en innovación importante, serán de utilidad solo en aplicaciones de climas extremos.

Tabla 25 Distribución de las tecnologías según el tipo de servicio o aplicación.

Tipo Tecnología	Regulación de frecuencia	Afirmado de la capacidad de energía de fuentes renovables	Arbitramiento de energía eléctrica	Arbitramiento de energía de fuentes renovables	Soporte de voltaje	Suministro de capacidad eléctrica	Capacidad de reserva de suministro eléctrico - rodante	Capacidad de microrred	Gestión del costo de energía tiempo-de-uso (TOU)	Resiliencia	Capacidad de rampas de potencia	Arbitramiento de energía de fuentes renovables en sitio	Calidad de la potencia del servicio eléctrico	Diferimiento de actualización de trans. y dist. estacionaria	Gestión de la cuenta de servicios eléctricos con renovables	Arranque en negro	Seguimiento de carga (Balance terciario)	Potencia en sitio para subestación	Alivio de congestión de transmisión	Soporte de transmisión	Gestión de la carga de la demanda	Servicios de transporte	Diferimiento de actualización de trans. y dist. transportable	Capacidad de reserva de suministro eléctrico - no rodante	Actualización del sistema de transmisión por plantas solares	Actualización del sistema de distribución por plantas eólicas	Actualización del sistema de transmisión por plantas eólicas	Confiabilidad del servicio eléctrico	Actualización del sistema de distribución por plantas solares
<b>Litio</b>	126	83	65	61	55	33	30	30	28	26	25	25	21	19	17	15	15	15	13	12	11	7	5	4	4	4	3	3	3
<b>Sodio</b>	14	7	18	5	10	5	7	1	8		2	2	4	1		5	3	1	4	4			4	1			4	2	1
<b>Plomo-Acido</b>	13	9	2	4	5	1	6	1	3	2	4	2	2		1		1	1			1			2					
<b>Redox flow</b>	6	12	4	6	4	1	2	2	2	3	2	4				3	1	1		1					1		1		1
<b>Capacitor Electroquímico</b>	2	1	15		18															1		17					1		
<b>Metal-Aire</b>		2	3	2				1			1	1	1	2															1
<b>Níquel</b>	1	2			1		2			1			1					1										1	
<b>Total general</b>	162	116	107	78	93	40	47	35	41	32	34	34	29	22	18	23	20	19	17	18	12	24	9	7	5	4	9	6	6

\*Datos base tomados de [77], última consulta: abril de 2018.

## 6 Conclusiones

- **¿Cuál es el desempeño de las tecnologías estudiadas en relación con los servicios de la Smart Grid?**

Aunque en los últimos años ha habido mejoras respecto al desempeño histórico de los BESS, aún hay potencial de mejora. Las baterías entregan actualmente el 20% del potencial volumétrico, respecto al potencial teórico. La capacidad de aprovechar todo el potencial de las baterías de manera óptima dependerá del entendimiento profundo de los procesos que ocurren desde la escala atómica hasta la macroescala.

No existe un indicador único para la evaluación del desempeño de las baterías o BESS, existen múltiples características técnicas que permiten evaluar aspectos puntuales del desempeño de las baterías. Entre los parámetros técnicos considerados como los más importantes están la eficiencia, densidad de potencia, densidad de energía, tiempo de descarga, tiempo de vida, autodescarga, costo y requerimientos de mantenimiento.

Al considerar el desempeño de las tecnologías emergentes reportado en la literatura, es necesario considerar los distintos tipos de indicadores de desempeño reportados y reconocer que el desempeño de la celda de laboratorio no permite inferir directamente el desempeño de un sistema BESS de gran escala, ya que el desempeño final de estos últimos tiene implicaciones ingenieriles adicionales.

Ninguna tecnología es igualmente aplicable a todas las aplicaciones, incluso para la misma aplicación en diferentes ubicaciones. Se debe hacer un análisis caso a caso para encontrar la mejor tecnología. La mejor elección de la tecnología para un BESS es una función de la escala y la aplicación. Por ejemplo, para una aplicación de potencia de pequeña escala la tecnología de ion de litio es la más indicada; para una aplicación de energía de gran escala, las baterías *Redox flow* son las más apropiadas. Las baterías de sodio pueden ser usadas en soluciones intermedias.

- **¿Cuáles son las fortalezas de las tecnologías estudiadas?**

Entre las fortalezas de los BESS como complemento de una planta RES se resalta que, en general todos los BESS, como sistemas eléctricos de potencia tienen una respuesta muy rápida, inferior a un segundo, lo que permite satisfacer las necesidades de la planta RES en el cumplimiento del código de red en las múltiples funciones que requieren de la entrega o absorción de potencia, activa o reactiva, con el propósito de suavizar la entrega de potencia a la red y de estabilizar el sistema eléctrico interconectado.

---

Otra fortaleza de las tecnologías de baterías en la constitución de BESS es que la construcción de las baterías en celdas (físicas) permite escalar las soluciones de potencia tanto como sea necesario, de manera muy fácil, simplemente con la agregación de arreglos serie-paralelo de unidades de celda.

La integración de los BESS a la red dan flexibilidad al sistema de potencia. No se requiere que los clientes cambien de patrones de consumo, el arbitramento en los BESS eventualmente posibilitará que el despacho energético sea mucho más barato de lo que es actualmente.

Los BESS han demostrado que pueden traer beneficios económicos, si la potencia de salida de una planta RES se puede programar de una manera similar a un generador convencional, el despacho económico óptimo se puede lograr sin mayores desviaciones.

Respecto a cada tecnología analizada, cada una sobresale por alguna razón y por esta razón hace parte del abanico de posibilidades en implementaciones actuales. Las tecnologías de ion de litio sobresalen respecto a las otras tecnologías por su baja autodescarga, alta densidad de potencia, energía y eficiencia. Las tecnologías de plomo-ácido sobresalen respecto a las otras tecnologías por el bajo costo y desempeño aceptable en entrega de potencia. Las baterías de níquel-cadmio se siguen perfilando como la mejor solución para proveer servicios de calidad de la potencia y afirmado de potencia en condiciones extremas. Las tecnologías de sodio-sulfuro sobresalen respecto a las otras tecnologías por la alta densidad de potencia y energía, ciclo de vida relativamente largo y materiales de fabricación abundantes y baratos.

Independientemente del nivel de avance que tenga la tecnología de *Redox flow*, la arquitectura de diseño de las baterías *Redox flow* ofrece una ventaja que se puede capitalizar en el futuro. Las baterías convencionales se basan en al menos un electrodo sólido como material activo, este hecho limita la conductividad de los electrodos y, por lo tanto, la cantidad de corriente que puede fluir a través de ellos, igualmente la cantidad de material activo que puede ser almacenado en cada electrodo. Dado que el material activo en las baterías de *Redox flow* está almacenado en los tanques, las baterías de *Redox flow* pueden tener grandes capacidades sin tener que usar electrodos gruesos. O sea que una batería *Redox flow* tiene el potencial de entregar alta potencia y alta capacidad energética en un solo dispositivo, mientras el diseño tradicional siempre tendrá que balancear entre alta energía (electrodo grueso) y alta potencia (electrodo delgado). Es cuestión de tiempo hasta que un sistema con los reactivos adecuados muestre los desempeños esperados para la integración de los RES a la red.

El acople de BESS a plantas RES incrementará la confiabilidad de la *smart grid*, habilitará un manejo de red más efectivo y creará un producto de potencia despachable a partir de los recursos disponibles. Otro beneficio indirecto es la de ciclar menos los activos de generación tradicionales, por lo que aumentarán su vida útil, y se utilizará mejor los RES acoplados a BESS en la provisión de servicios de red.

- **¿Cuáles son los retos y brechas de las tecnologías estudiadas que ralentizan la integración de las energías de fuentes renovables a la *Smart Grid*?**

Las tecnologías de plomo-acido con descargas profundas tienen un ciclo de vida corto, lo que limita su atractivo para aplicaciones de gran escala y las descargas profundas son comunes en aplicaciones de arbitramento. Tienen baja densidad de energía, desempeño reducido a baja temperatura y limitaciones para operar en un SOC parcial. Las baterías de plomo, para poder potenciarlas más requieren la modificación de las estructuras de electrodo para extender el ciclo de vida y las capacidades de entregar potencia. La técnica de agregar carbón es la más prometedora por el momento. Sin embargo, se espera que las mejoras sean marginales respecto a los avances que pueden tener otras tecnologías.

En las tecnologías de ion-litio todavía no existe una técnica definitiva que controle la inestabilidad térmica y estructural de los compuestos laminares que causan los problemas de seguridad en la batería, la poca abundancia del litio en la corteza terrestre lo hace un material costoso, sufre degradación acelerada al operar en altas corrientes de carga-descarga.

Las tecnologías de níquel-cadmio presentan un inconveniente ambiental por la toxicidad de los componentes, las baterías tienen efecto de memoria, ciclo de vida dependiente de los ciclos de descarga, es más costosa que las baterías de plomo-acido y se autodescarga.

Las tecnologías de sodio-sulfuro tienen limitantes en su implementación por el alto costo de producción, alta temperatura de operación que requiere compensar la pérdida de calor por operación y requiere velar por la seguridad del sellamiento y no contacto del sodio con el aire o humedad.

Las tecnologías de *Redox-flow* vanadio están limitadas por el alto costo de inversión, la membrana separadora de iones tiene un ciclo de vida corto, el sistema completo tiene ingeniería compleja y es susceptible a las fugas, por lo que el sistema requiere mantenimiento y alto costo operativo.

Las tecnologías de electrodos sólidos, debido a los fenómenos de inestabilidad termodinámica de la estructura 3D del electrodo por la expansión/contracción de la operación y reacción con el electrolito conllevan a la degradación de la batería. la ingeniería de la batería se puede mejorar, pero estos efectos nunca se eliminarán, esta causa es la que motiva el estudio de las baterías de electrodos líquidos.

Las baterías de electrodos líquidos están todavía en un estado muy incipiente de desarrollo para esperar algún avance importante en el corto o mediano plazo, primero deben superar dificultades técnicas y de costos.

Los sistemas de control utilizados en los BESS tienen gran margen de mejora, en el sentido de que todavía se pueden mejorar los algoritmos de despachabilidad de la planta, que estimen el SOC de las baterías y optimicen del manejo del flujo de energía bidireccional entre la red eléctrica y la planta RES, tanto de potencia activa como reactiva.

- **¿Cuáles son las tecnologías de baterías más adecuadas para la integración de plantas de gran escala con fuentes renovables?**

Las tecnologías de plomo-acido modernas, complementadas con sistemas de control y rutinas de mantenimiento de equalización de baterías pueden técnicamente soportar un BESS para aplicaciones de integración de RES, especialmente aplicaciones de potencia o arbitramento de poca duración. Sin embargo, dadas las limitaciones intrínsecas de la tecnología, respecto a las características de las tecnologías de ion de litio y con la consideración que los precios de los sistemas de ion de litio están en descenso, un BESS de tecnología plomo-acido, en el contexto actual, puede ofrecer un valor marginal respecto a su equivalente de ion de litio.

Las tecnologías de litio son capaces de cubrir todo el espectro de aplicaciones de integración de RES de gran escala. Estas posibilidades están ampliamente documentadas en la literatura científica analizada.

Las tecnologías de sodio y *Redox flow* tienen la capacidad para implementar la integración de RES de gran escala. Dadas las particularidades de operación de estos sistemas, se proyectan como tecnologías exclusivas del ámbito industrial debido a los cuidados que se deben tener en su operación, por lo que el sector del consumo minorista no utilizaría este tipo de tecnologías, a diferencia de las tecnologías de litio que son ubicuas. Adicionalmente se resalta que estas tecnologías serán aún más protagónicas, en la medida que se consoliden las soluciones a los retos técnicos y cierre de brechas tecnológicas identificadas.

Las tecnologías de níquel no son atractivas para la integración de RES a la red. Estas tecnologías perfilan como tecnología para ambientes extremos en aplicaciones *off-grid*.

- **¿Existe alguna diferencia en la arquitectura de las soluciones de almacenamiento de energía para los sistemas de energía eólica y fotovoltaica? ¿si existe, en qué consiste?**

La arquitectura de BESS acoplados a plantas RES integrados en la red no tienen una diferencia intrínseca, el mayor determinante de la arquitectura del sistema serán las aplicaciones o servicios de red para las cuales se diseñen los BESS.

Según el tipo de aplicación o servicio de red específico que se quiera satisfacer con un BESS, existirán algoritmos específicos o esquemas de optimización específicos a dicho problema. Por lo tanto, no hay un modelo único de gestión diseño del BESS.

Entre las distintas características de los BESS para aplicaciones de gran escala se concreta el criterio de que es más importante minimizar el costo total del kWh instalado que la densidad de energía o potencia, ya que, al ser aplicaciones estacionarias, eventualmente se podrá utilizar más espacio para ubicar más capacidad.

La implementación de sistemas HESS, que aprovechan las diferentes características técnicas de carga/descarga y escalas de tiempo de cada tecnología de almacenamiento e energía (eg. baterías y supercapacitores), son atractivas hoy día para lograr una buena relación de costo-beneficio.

Hay una interrelación estrecha entre modelos de pronóstico de las variables del recurso (eólico o solar) y el diseño de los BESS. Colombia, implícito al reto de implementación exitosa de un BESS, tiene el reto de desarrollo de modelos de pronóstico que minimicen las incertidumbres de generación y reduzcan el estrés al BESS, esto impacta directamente su ciclo de vida y sus costos. El reto es grande al reconocer que la región de Colombia, al ser una zona tropical, es susceptible de eventos convectivos de rápida formación, fenómenos poco frecuentes en las latitudes de los países líderes en el desarrollo de las tecnologías BESS.

- **¿Cuáles son las tendencias actuales en la aplicación de las tecnologías estudiadas?**

La investigación científica en el campo de las distintas tecnologías de baterías y BESS está muy activo, a lo largo del estudio se evidenció que todo aspecto susceptible de mejora es sujeto de análisis y experimentación. Por los múltiples frentes de investigación identificados, se prevé que las baterías del futuro serán unas con las siguientes características: fabricadas con materiales abundantes y económicos, electrolitos acuosos, que operen a temperatura ambiente, seguras, con alta densidad de potencia y energía.

Respecto a tendencias específicas a cada tecnología se observa:

Hay líneas de investigación en las tecnologías de plomo-ácido que buscan extender las capacidades técnicas de las baterías en cuanto a profundidades de descarga, capacidades operación con carga parcial, incremento de densidad de energía y extensión de ciclos de vida útil.

Dado el dominio actual de las tecnologías de litio, existe alto interés en abaratar el costo de fabricación de la batería y encontrar materiales alternativos que no sean de litio, otras líneas de investigación se enfocan en mejorar la seguridad de la operación y la reversibilidad de las reacciones.

Respecto a las tecnologías de sodio, la tendencia más notoria se observa en la intensidad de investigación en baterías de ion de sodio, debido al potencial que representan de ser el reemplazo de las tecnologías de ion de litio y que operan a temperatura ambiente, a diferencia de las tecnologías de sodio-sulfuro.

Respecto a las tecnologías de *redox-flow*, hay investigación activa en todos los frentes de la ingeniería de este tipo de batería; sin embargo, el frente más relevante se centra en la búsqueda de electrolitos que mejoren las características energéticas de la batería.

De acuerdo con el potencial previsto, se observa que el mercado de los BESS *Redox flow* está emergiendo, pasando de instalaciones relativamente pequeñas (kW hasta pocos MW) a aplicaciones de gran escala, como la construcción actual de un BESS en China de 200 MW/800MWh.

---

Respecto a las arquitecturas de los BESS se resalta el amplio espectro de líneas de trabajo; sin embargo, se observa como patrón el buscar alguno de estos objetivos: 1) optimizar el recurso disponible garantizando la vida útil de las baterías y 2) integrar múltiples tecnologías (baterías, fuentes de energía o algoritmos) con el propósito de beneficiarse de las fortalezas de cada tecnología.

Los entes reguladores del sector energético de los países pueden acelerar la integración de los BESS a los sistemas eléctricos, con la definición de mecanismos y estímulos de inversión de estos sistemas, por ejemplo, con mecanismos de reconocimiento de la velocidad de entrega de potencia como un servicio adicional a la red eléctrica.

- **¿Alguna tecnología de baterías se perfila como la solución dominante en aplicaciones de almacenamiento e integración de generación con fuentes renovables en la Smart Grid?**

Actualmente la tecnología de litio es dominante tanto en cantidad de proyectos como en potencia instalada. Las aplicaciones más utilizadas con sistemas de almacenamiento de energía son: regulación de frecuencia, afirmado de la capacidad de energía de fuentes renovables, arbitramento de energía eléctrica y soporte de voltaje.

Dada la baja disponibilidad de litio en la corteza terrestre, la alternativa del sodio en forma de baterías de ion de sodio cobra un alto interés; sin embargo, todavía hay mucho recorrido investigativo por allanar, como encontrar los materiales adecuados de ánodo y cátodo y optimización del electrolito.

Se observa un crecimiento en la aceptación e implementación de tecnologías de *Redox flow*, las capacidades que se están instalando son cada vez más grandes, esto es una señal de que este tipo de tecnologías, por las fortalezas que tiene, puede ser un habilitador clave de la integración de los RES a la red.

## 7 Bibliografía

- [1] X. Zhang, Y. Yuan, L. Hua, Y. Cao y K. Qian, «On Generation Schedule Tracking of Wind Farms With Battery Energy Storage Systems,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, nº 1, 2017.
- [2] A. Zeh, M. Rau y R. Witzmann, «Comparison of decentralised and centralised grid-compatible battery storage systems in distribution grids with high PV penetration,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 24, nº 4, 2016.
- [3] B. Zakeri y S. Syri, «Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, 2015.
- [4] A. Zahedi, «Maximizing solar PV energy penetration using energy storage technology,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, nº 1, 2011.
- [5] K. Zagheri, A. Mauger y C. Julien, Rechargeable lithium batteries for energy storage in smart grids, 2015.
- [6] Y. Yuan, C. Sun, M. Li, S. Choi y Q. Li, «Determination of optimal supercapacitor-lead-acid battery energy storage capacity for smoothing wind power using empirical mode decomposition and neural network,» *Electric Power Systems Research*, vol. 127, 2015.
- [7] D. Yang, J. Wen, K.-W. Chan y G. Cai, «Dispatching of wind/battery energy storage hybrid systems using inner point method-based model predictive control,» *Energies*, vol. 9, nº 8, 2016.

- 
- [8] L. Xian, Y. Li y Y. Wang, «A grid-connected PV/supercapacitor/battery hybrid distributed generation system integrated with multiport DC-DC converter,» de *2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification, ACEPT 2016*, 2017.
- [9] J. Wood, «Integrating renewables into the grid: Applying UltraBattery® Technology in MW scale energy storage solutions for continuous variability management,» de *2012 IEEE International Conference on Power System Technology, POWERCON 2012*, 2012.
- [10] X. Wang y M. Yue, «Design of energy storage system to improve inertial response for large scale PV generation,» de *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2016.
- [11] K. Wang, K. Jiang, B. Chung, T. Ouchi, P. Burke, D. Boysen, D. Bradwell, H. Kim, U. Muecke y D. Sadoway, «Lithium-antimony-lead liquid metal battery for grid-level energy storage,» *Nature*, vol. 514, n° 7522, 2014.
- [12] G. Sudha y N. Senroy, «A Unified Approach to the Sizing and Control of Energy Storage Systems,» *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, n° 7, 2017.
- [13] A. Subburaj y S. Bayne, «Battery and wind system in weak/strong grid analysis,» de *IEEE Industry Application Society - 51st Annual Meeting, IAS 2015, Conference Record*, 2015.
- [14] A. Subburaj, P. Kondur, S. Bayne, M. Giesselmann y M. Harral, «Analysis and review of grid connected battery in wind applications,» de *IEEE Green Technologies Conference*, 2014.
- [15] P. Stenzel, J. Koj, A. Schreiber, W. Hennings y P. Zapp, «Primary control provided by large-scale battery energy storage systems or fossil power plants in Germany and related environmental impacts,» *Journal of Energy Storage*, vol. 8, 2016.
- [16] G. L. Soloveichik, «Battery Technologies for Large-Scale Stationary Energy Storage,» *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, vol. 2, n° 1, pp. 503-527, 2011.
- [17] R. Shigenobu, A. Noorzad, C. Muarapaz, A. Yona y T. Senjyu, «Optimal Operation and Management for Smart Grid Subsumed High Penetration of Renewable Energy, Electric Vehicle, and Battery Energy Storage System,» *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 17, n° 2, 2016.
- [18] M. Shan, C. Li, T. Liang y W. Mao, «A real-time optimal control strategy for battery energy storage system to smooth active output fluctuation of renewable energy sources,» *Dianwang Jishu/Power System Technology*, vol. 38, n° 2, 2014.

- 
- [19] M. Sechilariu, B. Wang y F. Locment, «Building integrated photovoltaic system with energy storage and smart grid communication,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, nº 4, 2013.
- [20] A. Schmiegel y A. Kleine, «Optimized Operation strategies for PV Storages systems Yield limitations, optimized battery configuration and the benefit of a perfect forecast,» de *Energy Procedia*, 2014.
- [21] S. Sano, Y. Ito, Y. Hirose, H. Takeuchi y S. Aone, «Development of long cycle life valve-regulated lead-acid battery for large-scale battery energy storage system to utilize renewable energy,» de *INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings)*, 2016.
- [22] J. Salgado-Contreras, R. Sharma, S. Ranatunga, S. Moroz y S. Thomas, «Value propositions of energy storage options for wind power output smoothing,» de *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 2016.
- [23] H. Ruwei, C. Ran, Y. Hongchun, H. Han y L. Shuo, «Coordinated Control Strategy of Wind Power and Large-Scale Access of Battery Energy Storage,» de *Proceedings - 2015 6th International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, ISDEA 2015*, 2016.
- [24] S. Riaz, A. Chapman y G. Verbic, «Comparing utility and residential battery storage for increasing flexibility of power systems,» de *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference: Challenges for Future Grids, AUPEC 2015*, 2015.
- [25] A. Poullikkas, «A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, 2013.
- [26] J. Posada, A. Rennie, S. Villar, V. Martins, J. Marinaccio, A. Barnes, C. Glover, D. Worsley y P. Hall, «Aqueous batteries as grid scale energy storage solutions,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, 2017.
- [27] H. Pan, Y.-S. Hu y L. Chen, «Room-temperature stationary sodium-ion batteries for large-scale electric energy storage,» *Energy and Environmental Science*, vol. 6, nº 8, 2013.
- [28] A. Marinopoulos y P. Bakas, «Techno-economic evaluation of alternative configurations for very large scale PV power systems including energy storage,» de *2014 9th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2014*, 2014.
- [29] W. Luo, F. Shen, C. Bommier, H. Zhu, X. Ji y L. Hu, «Na-Ion Battery Anodes: Materials and Electrochemistry,» *Accounts of Chemical Research*, vol. 49, nº 2, 2016.

- 
- [30] Y. Li, Y.-S. Hu, X. Qi, X. Rong, H. Li, X. Huang y L. Chen, «Advanced sodium-ion batteries using superior low cost pyrolyzed anthracite anode: towards practical applications,» *Energy Storage Materials*, vol. 5, 2016.
- [31] X. Li, L. Yao y D. Hui, «Optimal control and management of a large-scale battery energy storage system to mitigate fluctuation and intermittence of renewable generations,» *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4, n° 4, 2016.
- [32] H. Li, H. Yin, K. Wang, S. Cheng, K. Jiang y D. Sadoway, «Liquid Metal Electrodes for Energy Storage Batteries,» *Advanced Energy Materials*, vol. 6, n° 14, 2016.
- [33] P. Leung, A. Shah, L. Sanz, C. Flox, J. Morante, Q. Xu, M. Mohamed, C. Ponce de León y F. Walsh, «Recent developments in organic redox flow batteries: A critical review,» *Journal of Power Sources*, vol. 360, 2017.
- [34] C. Koch-Ciobotaru, A. Saez-De-Ibarra, E. Martinez-Laserna, D.-I. Stroe, M. Swierczynski y P. Rodriguez, «Second life battery energy storage system for enhancing renewable energy grid integration,» de *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015*, 2015.
- [35] B. Jintanasombat y S. Premrudeepreechacharn, «Optimal analysis of battery energy storage for reduction of power fluctuation from PV system in Mae Hong Son province,» de *IYCE 2015 - Proceedings: 2015 5th International Youth Conference on Energy*, 2015.
- [36] D. Ikni, M. Camara y B. Dakyo, «Offshore wind farms energy injection in the electrical grid - lithium battery to mitigate power fluctuations,» *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 5, n° 4, 2015.
- [37] C. A. Hill, M. C. Such, D. Chen, J. Gonzalez y W. M. K. Grady, «Battery energy storage for enabling integration of distributed solar power generation,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, n° 2, pp. 850-857, 2012.
- [38] A. Helwig, *Applied research in energy storage*, vol. 57, 2016.
- [39] H. Gaztanaga, J. Landaluze, I. Etxeberria-Otadui, A. Padros, I. Berazaluze y D. Cuesta, «Enhanced experimental PV plant grid-integration with a MW Lithium-Ion energy storage system,» de *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2013*, 2013.
- [40] L. Fu, Q. Le, X. Wang, X. Liu y W. Jia, Overview on the liquid metal battery for grid-level large-scale energy storage, vol. 723 KEM, 2017.
- [41] S. Essakiappan, M. Manjrekar, J. Enslin, J. Ramos-Ruiz, P. Enjeti y P. Garg, «A utility scale battery energy storage system for intermittency mitigation in multilevel medium voltage

- 
- photovoltaic system,» de *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015*, 2015.
- [42] N. Ertugrul, «Battery storage technologies, applications and trend in renewable energy,» de *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, ICSET*, 2017.
- [43] M. Dubarry, A. Devie, K. Stein, M. Tun, M. Matsuura y R. Rocheleau, «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, 2017.
- [44] I. De La Parra, J. Marcos, M. García y L. Marroyo, «Dynamic ramp-rate control to smooth short-term power fluctuations in large photovoltaic plants using battery storage systems,» de *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2016.
- [45] S. Ci, N. Lin y D. Wu, «Reconfigurable Battery Techniques and Systems: A Survey,» *IEEE Access*, vol. 4, 2016.
- [46] B. Chalamala, T. Soundappan, G. Fisher, M. Anstey, V. Viswanathan y M. Perry, «Redox flow batteries: An engineering perspective,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, nº 6, 2014.
- [47] C. Caruana, A. Sattar, A. Al-Durra y S. Muyeen, «Real-time testing of energy storage systems in renewable energy applications,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 12, 2015.
- [48] M. Bortolini, M. Gamberi y A. Graziani, «Technical and economic design of photovoltaic and battery energy storage system,» *Energy Conversion and Management*, vol. 86, 2014.
- [49] M. Benini, S. Canevese, D. Cirio y A. Gatti, «Battery energy storage systems for the provision of primary and secondary frequency regulation in Italy,» de *EEEIC 2016 - International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2016.
- [50] A. Abraham, L. Housel, C. Lininger, D. Bock, J. Jou, F. Wang, A. West, A. Marschilok, K. Takeuchi y E. Takeuchi, «Investigating the complex chemistry of functional energy storage systems: The need for an integrative, multiscale (molecular to mesoscale) perspective,» *ACS Central Science*, vol. 2, nº 6, 2016.
- [51] H. Zhao, Q. Wu, S. Hu, H. Xu y C. Rasmussen, «Review of energy storage system for wind power integration support,» *Applied Energy*, vol. 137, 2015.
- [52] D. Yang, J. Wen, K. Chan y G. Cai, «Smoothing and Dispatching the Output of Wind/Battery Energy Storage Hybrid System via Model Prediction Control,» *Gaodiana Jishu/High Voltage Engineering*, vol. 43, nº 3, 2017.

- 
- [53] G. Wang, G. Konstantinou, C. D. Townsend, J. Pou, S. Vazquez, G. D. Demetriades y V. G. Agelidis, *A review of power electronics for grid connection of utility-scale battery energy storage systems*, vol. 7, 2016, pp. 1778-1790.
- [54] C. Wang, W. Sun, T. Yi, Z. Yan y Y. Zhang, «Review on energy storage application planning and benefit evaluation methods in smart grid,» *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, vol. 33, nº 7, 2013.
- [55] K. Uddin, R. Gough, J. Radcliffe, J. Marco y P. Jennings, «Techno-economic analysis of the viability of residential photovoltaic systems using lithium-ion batteries for energy storage in the United Kingdom,» *Applied Energy*, vol. 206, 2017.
- [56] P. Subramanyam y C. Vyjayanthi, «Integration of PV and battery system to the grid with power quality improvement features using bidirectional AC-DC converter,» de *International Conference on Electrical Power and Energy Systems, ICEPES 2016*, 2017.
- [57] M. Ravikumar, S. Rathod, N. Jaiswal, S. Patil y A. Shukla, «The renaissance in redox flow batteries,» *Journal of Solid State Electrochemistry*, vol. 21, nº 9, 2017.
- [58] S. Patel, «Battery Storage Goes Mainstream,» *Power*, vol. 161, nº 5, 2017.
- [59] V. Miñambres-Marcos, M. Guerrero-Martínez, F. Barrero-González y M. Milanés-Montero, «A grid connected photovoltaic inverter with battery-supercapacitor hybrid energy storage,» *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, nº 8, 2017.
- [60] S. Masebinu, E. Akinlabi, E. Muzenda, A. Aboyade y C. Mbohwa, «A review on battery technologies for electrical energy storage,» de *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2017.
- [61] Y. Li, Y. Lu, C. Zhao, Y.-S. Hu, M.-M. Titirici, H. Li, X. Huang y L. Chen, «Recent advances of electrode materials for low-cost sodium-ion batteries towards practical application for grid energy storage,» *Energy Storage Materials*, vol. 7, 2017.
- [62] X. Li, J. Huang, Y. Chen y W. Liu, «Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation,» *Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control*, vol. 44, nº 7, 2016.
- [63] O. Koskinen y C. Breyer, «Energy Storage in Global and Transcontinental Energy Scenarios: A Critical Review,» de *Energy Procedia*, 2016.
- [64] S. Koohi-Kamali, V. Tyagi, N. Rahim, N. Panwar y H. Mokhlis, «Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, 2013.

- 
- [65] M. Koller, T. Borsche, A. Ulbig y G. Andersson, «Review of grid applications with the Zurich 1 MW battery energy storage system,» *Electric Power Systems Research*, vol. 120, 2015.
- [66] M. Katsanevakis, R. Stewart y J. Lu, «Aggregated applications and benefits of energy storage systems with application-specific control methods: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, 2017.
- [67] Q. Jiang y Y. Gong, «Review of wind power integration control with energy storage technology,» *Dianwang Jishu/Power System Technology*, vol. 39, n° 12, 2015.
- [68] A. Jamali, N. Nor y T. Ibrahim, «Energy storage systems and their sizing techniques in power system - A review,» de *2015 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2015*, 2016.
- [69] A. Islam, S. Nimmagadda, A. Subburaj y S. Bayne, «A review of frequency response solution for type - 3 wind turbines using energy storage device,» *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 6, n° 4, 2016.
- [70] J.-Y. Hwang, S.-T. Myung y Y.-K. Sun, «Sodium-ion batteries: Present and future,» *Chemical Society Reviews*, vol. 46, n° 12, 2017.
- [71] A. Fathima y K. Palanisamy, «Battery energy storage applications in wind integrated systems - A review,» de *2014 International Conference on Smart Electric Grid, ISEG 2014*, 2014.
- [72] M. Daud, A. Mohamed y M. Hannan, «A review of the integration of energy storage systems (ESS) for utility grid support | Zintegrowane systemy magazynowania energii - przeglą{ogonek}d stanu wiedzy,» *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 88, n° 10 A, 2012.
- [73] M. Aneke y M. Wang, «Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review,» *Applied Energy*, vol. 179, 2016.
- [74] A. Alhamali, M. Farrag, G. Bevan y D. Hepburn, «Review of Energy Storage Systems in electric grid and their potential in distribution networks,» de *2016 18th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2016 - Proceedings*, 2017.
- [75] D. Akinyele y R. Rayudu, «Review of energy storage technologies for sustainable power networks,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 8, 2014.
- [76] R. Abhinav, S. Member, N. M. Pindoriya y S. Member, «Grid integration of wind turbine and battery energy storage system : Review and key challenges,» de *IEEE 6th International Conference on Power Systems*, 2016.

- 
- [77] D. o. Energy, «DOE Global Energy Storage Database,» SANDIA, 04 2018. [En línea]. Available: <https://www.energystorageexchange.org/>. [Último acceso: 04 2018].
- [78] J. & C. G. Eyer, *Energy storage for the electricity grid: Benefits and market potential assessment guide*, 2010.
- [79] I. E. Agency, «Renewables information: Overview 2017. IEA Statistics,» 2017.
- [80] REN21, «Renewables 2016: Global Status Report - Key Findings,» 2016.
- [81] UPME, «[www.upme.gov.co](http://www.upme.gov.co),» 2017. [En línea].
- [82] E. Ozdemir, S. Ozdemir, K. Erhan y A. Aktas, «Energy storage technologies opportunities and challenges in smart grids,» *2016 3rd International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP)*, p. 15–20, 2016.
- [83] XM, «Justificación propuesta transitoria integración de generación solar y eólica al STN y STR,» Julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.xm.com.co/Documents/Renovables/2018-07-14-JUSTIFICACION-PROPUESTA-TRANSITORIA-CONEXION-DE-FUENTES-EOLICAS-Y-SOLARES.pdf>. [Último acceso: 18 Noviembre 2018].

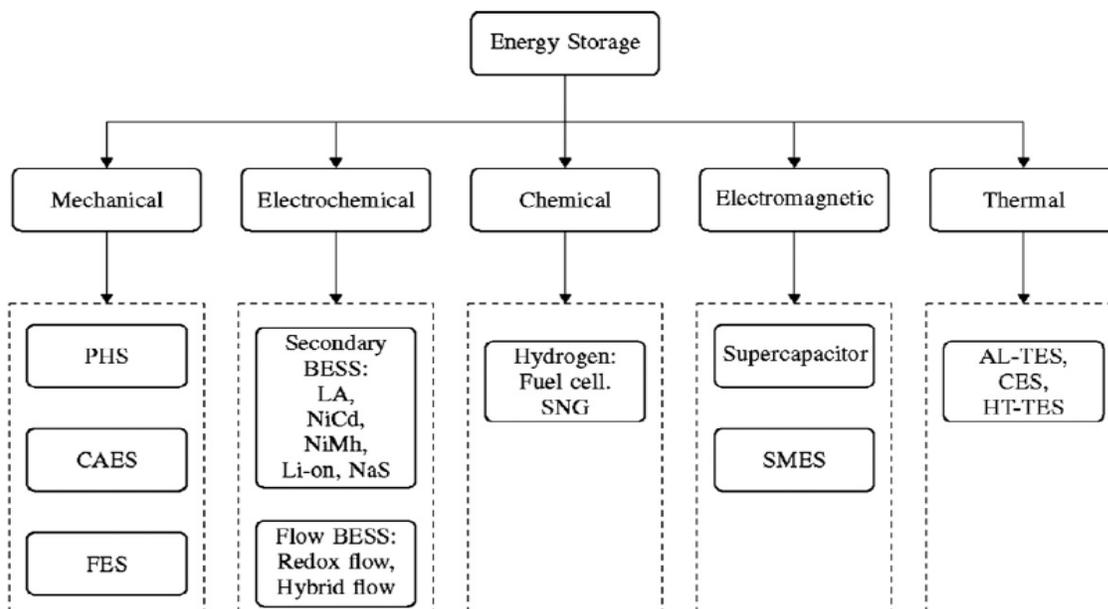
# 1 Anexo 1. ESS y BESS

Se ha hablado de la utilización de ESS como un sistema genérico de almacenamiento de energía; sin embargo, se profundizará un poco más en los principios y propiedades de sus elementos constituyentes para definir un lenguaje común y poder discernir entre las distintas características de estos.

## 1.1 Sistemas de almacenamiento de energía

La electricidad en su forma natural no es almacenable. La única forma por medio de la cual puede ser almacenada es convirtiéndola a una forma de energía que sea almacenable de manera tal que se pueda convertir en electricidad cuando se necesite. Entre las distintas tecnologías se encuentra el almacenamiento de energía mecánica, química, electroquímica, electromagnética y térmica [73,51]. En la Figura 7 se observan los tipos de tecnologías ESS.

Figura 7 Clasificación de sistemas de almacenamiento de energía. Imagen tomada de [51]



Los ESS permiten hacer uso completo de las fuentes de energía renovables y, específicamente las celdas electroquímicas, ofrecen gran flexibilidad para diseñar sistemas de energía eléctrica [26]. Mejoran la eficiencia de los sistemas de potencia a través de múltiples servicios, mejoran la estabilidad, confiabilidad de la red y seguridad [74,40,47]. Los BESS pueden funcionar como

sistemas de respuesta rápida de inyección/absorción de potencia activa/reactiva, de manera diferente a los sistemas de generación tradicional [31].

Respecto a los ESS mecánicos, los electroquímicos son atractivos porque pueden ser instalados en cualquier parte, libres de restricciones geológicas/geográficas (e.g. CAES, PHS)[33].

Respecto a los sistemas químicos como celdas de combustible, las celdas de combustible almacenan la energía en una sustancia (e.g. hidrógeno, metano) externa a la celda, mientras las baterías guardan la energía usando el material embebido [64], estos sistemas son prometedores, pero todavía su desarrollo es incipiente y no es alcance de este estudio.

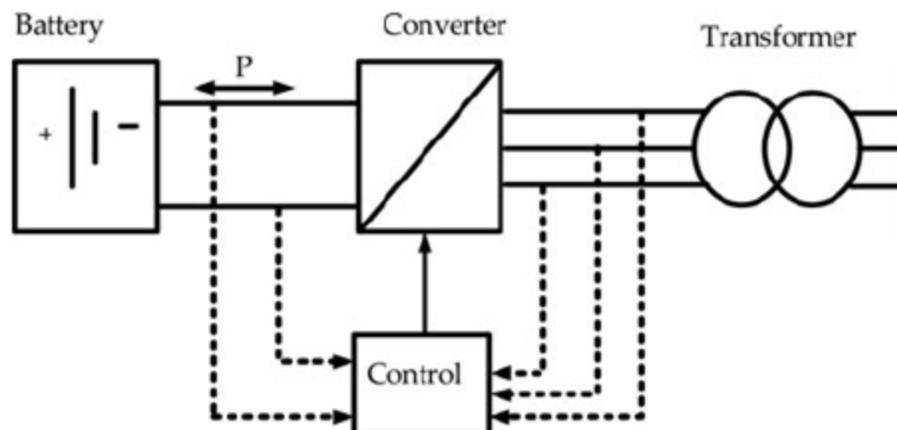
Los sistemas electromagnéticos se pueden combinar con BESS para configurar sistemas híbridos ya que estos sistemas pueden complementar los BESS al ofrecer alta potencia y poca capacidad de energía.

Los sistemas térmicos son un nicho particular de aplicación que no hace parte del alcance de este estudio.

## 1.2 Arquitectura de un BESS

Los BESS no son una solución genérica a la integración de plantas de energía renovable. La aplicación específica determina en gran medida el diseño final del sistema [1]. Sin embargo, hay elementos comunes a todos los BESS. En la Figura 8, se presenta una arquitectura simplificada de un BESS.

Figura 8 Arquitectura simplificada de un sistema de almacenamiento de baterías, imagen tomada de [12]



## 1.2.1 Batería

Es el dispositivo de almacenamiento de energía electroquímica. La capacidad de almacenamiento de la batería es la carga a una capacidad específica de potencia que es extraíble del dispositivo. Debe ser dimensionada adecuadamente para obtener el máximo beneficio en términos de costo y desempeño esperado, tanto en capacidad de potencia como de energía. Estas elecciones definirán en algunos casos la composición química de las baterías [12].

Las baterías consisten en celdas conectadas en paralelo o en serie para alcanzar las características eléctricas deseadas en voltaje y corriente [45,51].

La agregación de las celdas se puede hacer de manera fija o dinámica. En la agregación fija una cantidad fija de celdas en topología serie-paralelo buscan satisfacer las necesidades de corriente y voltaje. Sin embargo, un sistema de baterías siempre tendrá celdas débiles que limitan el desempeño de todo el *pack*. Lo ideal sería que la topología se adaptará dinámicamente para compensar estas diferencias, pero esto eleva los costos y complejidad del sistema [45].

### • Principio de funcionamiento

Cada celda está hecha de un electrolito líquido, de pasta o sólido junto con un ánodo y un cátodo. La batería se carga a través de una reacción química de oxidación-reducción bajo un potencial aplicado a los electrodos [60,32,16]. La reacción es reversible y permite a la batería entregar la energía absorbida para descargar [51], el movimiento de iones dentro del electrolito hace que los electrones se muevan en el circuito externo suministrando energía eléctrica [71].

La energía se almacena en forma electroquímica cuando una placa de electrodo se ubica en un electrolito que facilita la transferencia de iones. La energía almacenada es función de los componentes activos que el electrolito puede acomodar. El área del electrodo y la resistencia de la celda determinan la potencia nominal de la batería [60].

### • Clasificación

Existen múltiples formas de clasificar las baterías y sus aplicaciones, a continuación, se ilustrará un par de clasificaciones convenientes.

Según el tipo de baterías. Las baterías primarias son baterías no recargables que se descargan una vez, después de lo cual son desechadas. Su no reciclabilidad las hace útiles para aplicaciones de pequeños-medianos consumos. Las baterías secundarias son aquellas que pueden recargarse invirtiendo las reacciones químicas en los electrodos y pueden ser recicladas miles de veces [71,25,64].

Según las necesidades energéticas de la aplicación. Hay aplicaciones que demandan energía rápida, en cuestión de segundos, estas son aplicaciones intensivas en potencia y enfocadas a dar confiabilidad y calidad en la potencia. Al tener tanto períodos cortos de descarga como de carga, frecuentemente requieren muchos ciclos por día [25]. Por otro lado, hay aplicaciones que requieren

---

mucha duración (en el rango de horas) en el suministro de la energía, se consideran aplicaciones de gestión de la energía (*energy management*) y buscan desacoplar la generación de energía de la demanda [59,14,75]. Al tener tanto períodos largos de descarga como de carga, el ciclado es más lento, típicamente uno por día [25].

### 1.2.2 Controlador

Es el elemento encargado de coordinar el proceso de transformación de energía desde la batería hasta la red. Puede ser muy sencillo o muy sofisticado, esto depende de la dimensión del BESS y la aplicación específica.

Cuando se habla de un controlador sofisticado, también se puede encontrar en la literatura la denominación: sistema de gestión de batería (*Battery Management System BMS*). La función principal del *BMS* es realizar el monitoreo, computo, comunicación, protección, control de los circuitos de suicheo y optimización de la potencia eléctrica. Los *BMS* pueden ser de dos tipos, centralizados y distribuidos. El centralizado se ocupa de todo el BESS, el modular es escalable en unidades de potencia [45].

Una de las funciones claves del controlador es velar por la seguridad física del sistema completo para evitar que se den riesgos por efectos como el *thermal runaway* que puede causar explosiones o incendios en las instalaciones. Otra función es la seguridad eléctrica [45].

### 1.2.3 Conversor-Inversor

Es un dispositivo de potencia electrónico que transforma la energía de voltaje DC a voltaje AC a niveles de red. Asegura que la energía se entrega a la red cumpliendo con los códigos de red [30]. Idealmente el conversor es de 4 cuadrantes, esto quiere decir que inyecta o consume potencia activa o reactiva [42].

Dado que la electrónica de potencia de los BESS tiene mejor desempeño que los generadores sincrónicos convencionales, estos están mejor preparados para mitigar las fluctuaciones de potencia [41].

## 1.3 Características de un BESS

Los BESS y, específicamente sus baterías, tienen ciertas características que permiten comparar los múltiples sistemas en un mismo marco de referencia técnico.

**Capacidad nominal:** la cantidad de energía que puede almacenar un BESS según parámetros de diseño [74].

**Costos:** los costos del sistema de almacenamiento son uno de los factores más importantes para su implantación. Los costos deben incluir el costo de capital y los costos operativos. Los costos

---

operativos incluyen la operación, mantenimiento, disposición y reemplazo. Los sistemas auxiliares se agregan a los costos de capital [73].

**Densidad de Energía:** la cantidad de energía nominal que puede ser extraída de un sistema de almacenamiento por unidad de volumen. Sirve para conocer el tamaño físico de un sistema [60].

**Densidad de Potencia:** la cantidad de potencia nominal que puede ser extraída de un sistema de almacenamiento por unidad de volumen. Sirve para conocer el tamaño físico de un sistema [60].

**Desvanecimiento de capacidad:** afectación en la cantidad de capacidad de carga que una batería puede mantener debido a múltiples factores, entre ellos los factores de envejecimiento [55].

**Desvanecimiento de potencia:** incremento en la resistencia interna o impedancia de la celda que limita la capacidad de potencia de la celda y decrementa la eficiencia de la batería [55].

**Eficiencia de ciclo completo (*round-trip efficiency*):** es la relación entre la energía que se puede aprovechar efectivamente del sistema de almacenamiento considerando las pérdidas de transformación en la carga y descarga de la batería [74,73].

**Eficiencia:** La eficiencia total de un BESS está directamente relacionada con la tecnología de la batería, los convertidores, protecciones, cableado, transformador de aislamiento y transformador de transmisión y el punto de conexión común (PCC) [42].

**Electrodo:** Conductor que recibe o suministra corriente eléctrica. Entre las características deseables están: ser hecho de materiales abundantes, de bajo costo, no tóxico, estable [61].

**Electrolito:** sustancia que contiene iones libres. Las características deseables de este es que sea químicamente, electroquímicamente y térmicamente estable; iónicamente conductivo, electrónicamente aislante, baja toxicidad y bajos costos de producción [70].

**Energía específica:** La cantidad de energía nominal que puede ser extraída de un sistema de almacenamiento por unidad de masa.

**Esperanza de vida:** período de tiempo en el cual la batería opera normalmente (duración de suministro nominal) y se establece en número de ciclos, después de este tiempo, la batería mantiene la energía por un período de tiempo más corto [64].

**Estado de carga:** determina el nivel de carga del sistema de baterías como un porcentaje respecto a la capacidad nominal. Utiliza parámetros como voltaje, corrientes y temperaturas para realizar la estimación [14].

**Estado de salud (*State of Health, SOH*):** hasta ahora no hay consenso respecto a cómo se debe determinar el estado de salud. El método más frecuente es el de comparar la capacidad totalmente cargado del BESS con la capacidad nominal [45].

**Madurez tecnológica:** es un elemento a tener en cuenta en la toma de decisiones respecto a los BESS. Frecuentemente, las tecnologías maduras son preferidas porque se ha desarrollado más

---

experiencia en su operación, adicionalmente, las tecnologías más maduras suelen ser más económicas [73].

**Potencia específica:** la cantidad de energía nominal que puede ser extraída de un sistema de almacenamiento por unidad de masa.

**Potencia nominal:** cantidad de potencia que puede cargar o descargar un BESS según parámetros de diseño [74].

**Profundidad de descarga** (*Depth of Discharge DOD*): la cantidad de carga que es drenada de la batería en un ciclo determinado [14].

**Tiempo de descarga:** Describe cuanta energía puede ser retenida por un dispositivo de almacenamiento por algún período de tiempo [73].

**Tiempo de respuesta:** Según el requerimiento de energía del sistema, algunas aplicaciones pueden requerir una liberación muy rápida de la energía almacenada para suplir la demanda. Esta característica limita los tipos de tecnologías de almacenamiento que pueden ser consideradas para tal aplicación [73].

## 1.4 Sistemas híbridos

En la aplicación de integración de RES a la red, la capacidad del ESS es relativamente grande comparada con una aplicación donde el ESS se usa para regulación de frecuencia o voltaje, por ejemplo. Este tamaño se puede reducir con un sistema de almacenamiento de energía híbrido (HESS), que tendrá más de un dispositivo de almacenamiento de energía trabajando para compensar las fluctuaciones de potencia. Este esquema ayuda a reducir la posibilidad de sobredimensionamiento y subutilización de los dispositivos de almacenamiento de energía. El sobredimensionamiento conlleva costos de inversión, instalación y operación excesivos y disminuye los beneficios esperados de los RES [12].

## 2 Anexo 2. Tecnologías de baterías

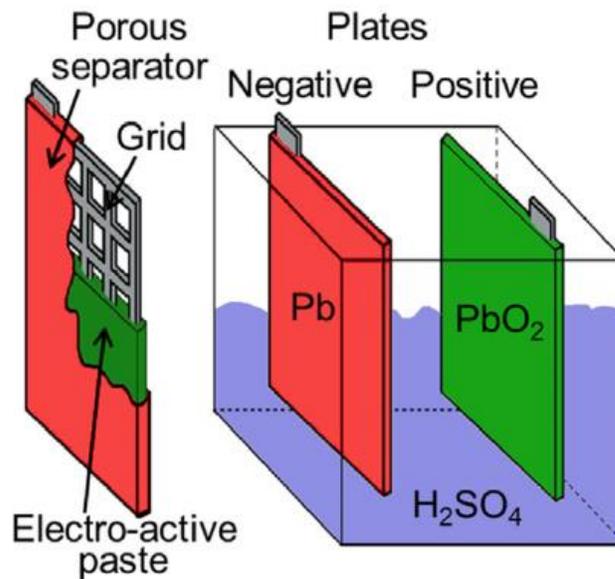
A continuación, se dará una breve descripción de los tipos de tecnologías de baterías que se estudiarán a lo largo del documento.

### 2.1 Plomo Ácido

Consiste en un electrodo positivo de dióxido de plomo, un electrodo negativo de plomo metálico y una solución diluida de ácido sulfúrico como electrolito [26]. La Figura 9 presenta el diagrama esquemático.

Hay varios subtipos de baterías como la húmeda, sellada regulada por válvula (SLA o VRLA). Las baterías húmedas tienen varias limitantes como susceptibilidad a fugas, requerimiento constante de agua y mantenimiento regular del electrolito. Las baterías VRLA superan estas desventajas al no tener requerimientos de mantenimiento.

Figura 9 Diagrama esquemático de una batería plomo-ácido, imagen extraída de [26]



### 2.2 Basadas en Níquel

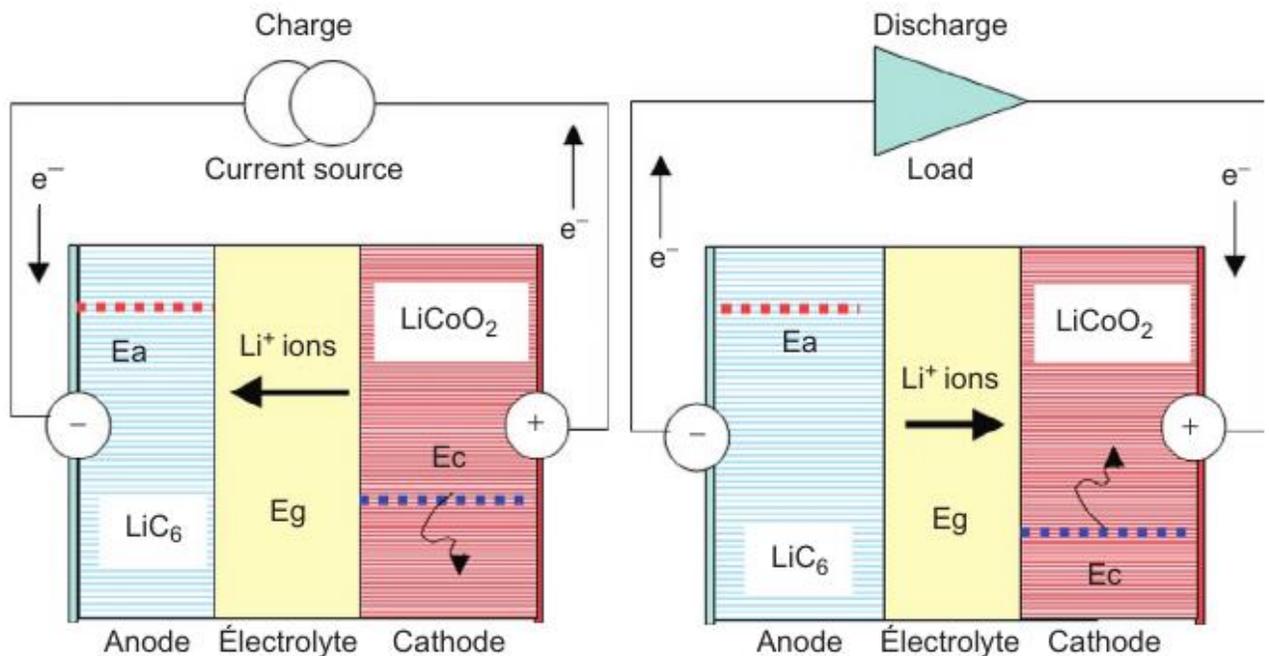
La principal variante de este tipo de baterías es la de níquel-cadmio. Está constituida de un electrodo positivo de hidróxido de níquel como el material activo y un electrodo negativo compuesto de cadmio metálico, el electrolito es una solución acuosa de hidróxido de potasio [25]. Existen otras variantes que usan níquel como: níquel-metal hidruro, níquel-hierro, níquel - hidrógeno, níquel-zinc [75].

## 2.3 Basadas en Litio

### • Ion de Litio (LiB)

En las baterías de ion de litio los iones  $\text{Li}^+$  se mueven del electrodo positivo al negativo en la carga, de manera inversa en la descarga. Hay gran diversidad de materiales para electrodos, según el tipo de aplicación de energía. A manera de ejemplo, la batería esquematizada en la Figura 10 está configurada por un electrodo negativo de carbón-grafito, un electrodo positivo de óxido de litio-cobalto y el electrolito que puede ser líquido, hecho de carbonatos más sal de litio, o un sólido (un polímero conductor) [5,71].

Figura 10 Diagrama esquemático de una batería ion de litio, imagen extraída de [40]

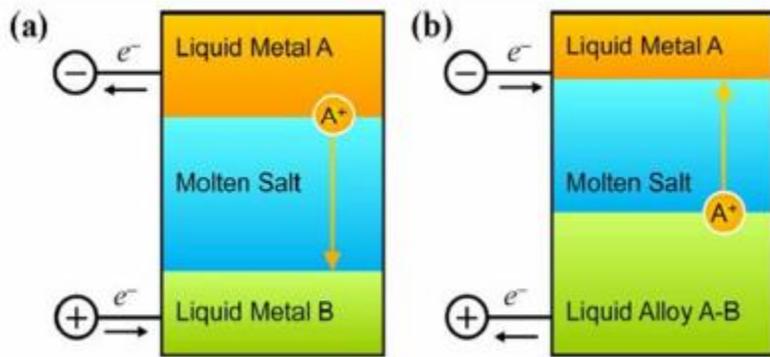


Las baterías de litio-cobalto, litio-níquel, litio-ferrofosfato (LPF), litio/óxido de manganeso, litio níquel cobalto óxido de aluminio y titanato de litio están adquiriendo relevancia [14]

## 2.4 Basadas en metal líquido (LMB)

Las baterías de metal líquido tienen dos electrodos de metal líquido y un electrolito de sal fundida, que será separado en tres capas naturales por la inmiscibilidad y diferentes densidades. De esta forma la LMB evita el diafragma y la deformación de la estructura durante ciclos de carga-descarga, de esta manera garantiza una larga vida a la batería [40,32]. La Figura 11 presenta un diagrama esquemático de la batería LMB.

Figura 11 Diagrama esquemático de una batería LMB, imagen extraída de [40]



- **Baterías acuosas**

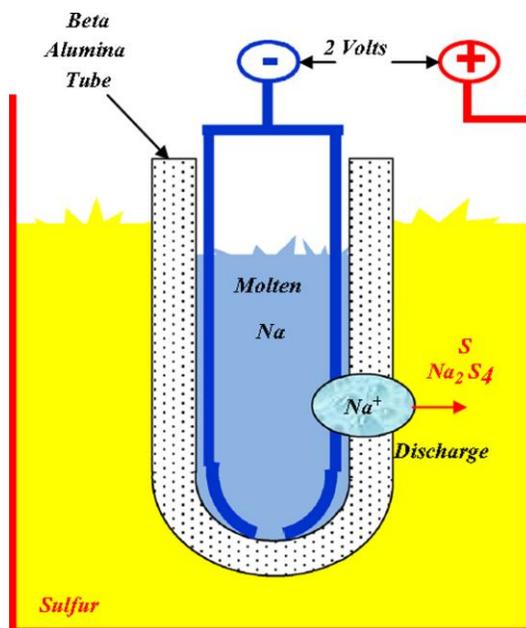
Estas baterías pueden estar basadas en litio o sodio, también se conocen como “*aqueous rocking chair batteries*”, debido a que los iones son insertados y removidos de los electrodos durante la carga y descarga. La idea de estas baterías es reemplazar los solventes orgánicos de los electrolitos por soluciones acuosas, que permitirán que el electrolito sea mucho más barato y tenga mejor conductividad iónica [26].

## 2.5 Baterías basadas en Sodio

- **Sodio-Sulfuro (NaS)**

Las baterías NaS están compuestas por un electrodo positivo de sulfuro líquido (fundido) y un electrodo negativo de sodio líquido (fundido). Los electrodos están separados con un electrolito de beta alúmina sólido. Por los materiales constitutivos, son económicas y de bajo mantenimiento. Operan en un rango de temperaturas de 300-350°C durante los ciclos de carga y descarga [73,16]. Debido a que las reacciones que ocurren son exotérmicas, se reduce la eficiencia de operación. Tienen aproximadamente cuatro veces la capacidad de las baterías plomo-ácido [75]. La Figura 12 presenta el diagrama esquemático de las NaS.

Figura 12 Diagrama esquemático de una batería de NaS, imagen tomada de [73]



- **Baterías ion de sodio (SIB)**

Es una nueva tecnología que se está investigando intensivamente. Son consideradas las mejores candidatas para la instalación de gran escala debido a la disponibilidad del sodio. No existe un diseño consolidado de este tipo de batería, se están considerando múltiples tipos de materiales en el electrodo positivo, negativo y electrolito. En el electrodo positivo se están utilizando óxidos de metal de transición con capas de sodio, fosfatos y compuestos orgánicos; en el electrodo negativo se están utilizando materiales de carbono, óxidos de metales de transición o sulfuros compuestos intermetálicos y orgánicos; como electrolitos se han utilizado soluciones orgánicas e inorgánicas [70]. Otra característica de interés en estas baterías es que pueden operar a temperatura ambiente [27].

- **Zero Emission Battery Research (ZEBRA)**

Es otro nombre para las baterías sodio cloruro de níquel (NaNiCl<sub>2</sub>). Está compuesta por un ánodo de sodio líquido y un cátodo de cloruro de níquel poroso sólido, impregnado de una sal conductiva de cloruro sodio aluminio. Trabajan a temperaturas de 270-350°C, [73,3,75].

## 2.6 Aire-Metal

Estas baterías están constituidas por electrodos negativos hechos de metales con alta tendencia a la oxidación y liberar electrones como el zinc o aluminio. El electrodo positivo se construye de una estructura de carbón poroso o una malla de metal cubierta por un catalizador adecuado. El electrolito es un conductor de iones de hidróxido (OH) como el hidróxido de potasio, puede ser líquido o de un polímero sólido.

## 2.7 Redox flow (RFB)

Desde el punto de vista económico y de seguridad, las RFB se perfilan como candidatas de tecnologías de almacenamiento de energía en el rango de los MW. Tienen alta escalabilidad, dado que las características de potencia son totalmente independientes de las características de energía. En contraste con las baterías convencionales, en las baterías de *Redox flow* la energía está almacenada en el electrolito, disuelto en forma de materiales activos [57,33,46].

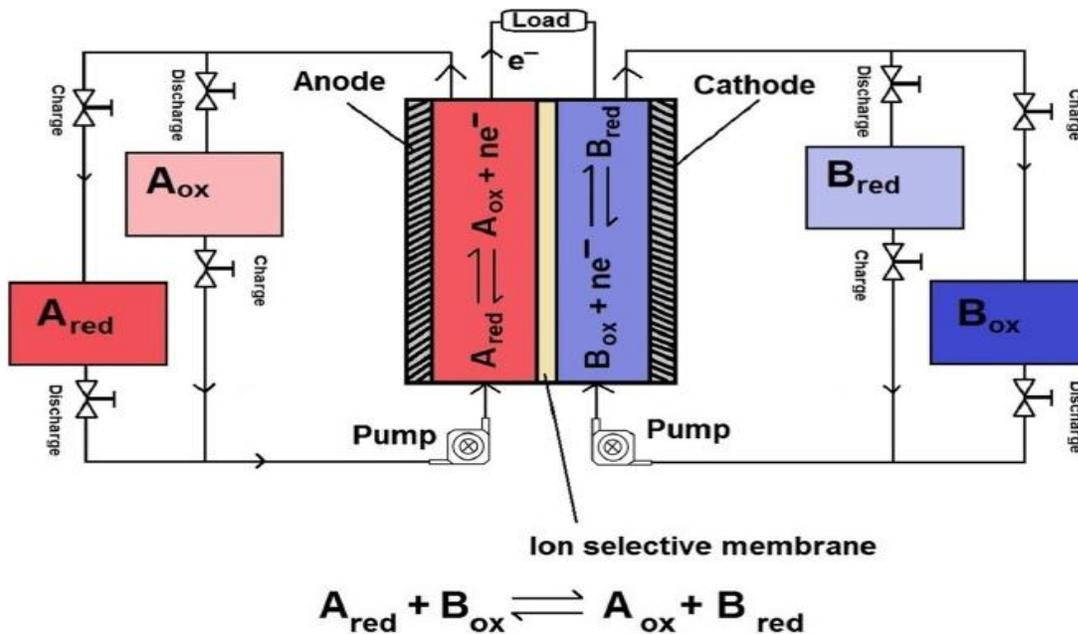
Hay múltiples composiciones de las RFB [46,33]. Hay dos tipos de RFB, las de fase *full flow* y los sistemas de flujo híbrido.

En los sistemas *full flow* la energía química se almacena en el electrolito. Entre los sistemas de *full flow* están las baterías *all-vanadium redox*(VRB) y hierro-cromo(FeCr). Las tecnologías *all-vanadium* son las más desarrolladas.

En sistemas híbridos, un estado de oxidación de una pareja *redox* se almacena en la superficie de un electrodo en forma sólida. Entre las tecnologías de flujo híbrido están las baterías de zinc-bromuro y zinc-cloruro.

Un sistema RFB consiste en 3 subsistemas: 1. El *cell stack*, 2. el electrolito de almacenamiento, 3. el balance de planta (tanques, bombas, sistema de acondicionamiento de potencia y controlador). En la Figura 13 se puede observar el diagrama esquemático de un RFB.

Figura 13 Diagrama esquemático de batería de *Redox flow*, imagen tomada de [57]



---

## 3 Anexo 3. Definición de los servicios ESS

### 3.1 Arbitramento de energía eléctrica

Conocido en inglés como *time shifting*, se hace almacenamiento/compra de energía en períodos de baja demanda y bajo precio de la energía para descargarla/venderla a la red en momentos de alta demanda y precios altos de energía. Con esta aplicación se eliminan las restricciones de energía (*curtailment*) y la necesidad de construir una red sobredimensionada, ya que el suministro de energía se regula [66,73,3,51,75].

Otra forma de verlo es que la carga se desplaza (*shift*) del período *on-peak* al período *off-peak*, nivelando el perfil de la demanda, este efecto finalmente repercutirá en la disminución de los costos finales de los servicios de suministro eléctrico [66].

### 3.2 Suministro de capacidad eléctrica

Hace referencia al suministro de energía en momentos de alta demanda [78]. También se utiliza el término *Peak Shaving*. Esta aplicación ofrece la oportunidad de diferir los costos de expansión de la red (líneas de transmisión, transformadores o generación) que hubiera sido necesario instalar solo para satisfacer la demanda en algunos momentos del año [65,64].

También se nota que la aplicación *black-start* es un caso particular de suministro de capacidad eléctrica. Esta aplicación se realiza después de un apagón (*blackout*) y se requiere potencia para iniciar las máquinas de una planta de generación eléctrica [66,51].

### 3.3 Seguimiento de carga

El desbalance entre carga y generación se resuelve a través de dos aplicaciones complementarias llamadas seguimiento de carga y regulación de frecuencia. En el seguimiento de carga, la variación de la salida de potencia del generador se ajusta con unos minutos u horas de rezago respecto a la carga de la red. En términos simples, se puede decir que el seguimiento de carga hace entrega de potencia a la red con ajustes en una escala gruesa de tiempo, mientras que la regulación de frecuencia lo hace en una escala fina de tiempo [66].

### 3.4 Regulación de frecuencia

Son las acciones que se toman desde la generación para reducir la desviación de frecuencia y llevar la frecuencia del sistema a sus valores nominales. La respuesta en frecuencia puede ser categorizada en diferentes tipos según el tiempo de respuesta y la naturaleza de dicho soporte [66,76,69,37]. La respuesta inercial es uno de los primeros pasos que toma el sistema para dar respuesta en frecuencia, actúa unos segundos después de un desbalance en la potencia y trata de disminuir la desviación de la frecuencia.

Se ha identificado que las turbinas eólicas tienen baja o cero respuesta inercial para contribuir a la red y, dado que como normalmente operan buscando el punto de máxima potencia, no tienen reservas de potencia disponible para realizar regulación de frecuencia. En los casos en los que la frecuencia sobrepasa el valor nominal, la turbina puede contribuir incrementando el ángulo de *pitch* y reducir la potencia de salida. Pero en caso de que la frecuencia caiga del valor nominal, la turbina será incapaz de participar en la respuesta en frecuencia [69,64].

También existe la regulación primaria, es un mecanismo de control que se debe activar enteramente dentro de un período de segundos definidos por el código de red, tradicionalmente este servicio lo proveen plantas de potencia de combustible fósil, pero los BESS al responder de manera rápida y precisa, son los candidatos ideales para la aplicación, el control se puede dar en forma de descargar o tomar carga [15,75].

La regulación secundaria o *Automatic Gain Control (AGC)* es el siguiente mecanismo de control que inicia después de la regulación primaria y es comandada por el *independent system operator (ISO)* [66].

### 3.5 Capacidad de reserva de suministro eléctrico

Para mantener la operación de la red durante eventos no esperados, tales como la pérdida de recursos de generación, se requieren las reservas de capacidad. Los tipos de reserva se denominan: reserva rodante, reserva no-rodante o reserva suplementaria [66]. La reserva operativa es igual a la suma de la reserva rodante más la no rodante [64].

La reserva rodante es la diferencia entre las capacidades operaciones a carga completa de las unidades generadoras en línea menos la carga en operación menor que haya en el momento [69]. La reserva no rodante, es la capacidad de generación que se puede invocar, al cabo de unos minutos, si se prevé que hay déficit de reserva rodante.

Las reservas reducen la máxima salida de potencia que una planta de generación puede ofrecer, creando un costo de oportunidad que previene una mejor utilización de los activos [65]. Es por esta razón que los ESS tienen una oportunidad al poder reducir el requerimiento de generadores convencionales en espera y estar dedicados a “tomar” carga cuando haya un problema en el sistema [75].

---

### 3.6 Soporte de voltaje

Para tener estabilidad en el sistema eléctrico, el voltaje debe estar en cierto rango de operación [66]. Existen múltiples formas de dar soporte de voltaje en la red. Existen dispositivos especializados como los STATCOM o FACTS, pero son dispositivos costosos. Otra forma de resolver la necesidad es utilizar dispositivos que modifiquen el factor de potencia en sitio. Este método permite controlar el voltaje en el nodo sin afectar otras áreas del sistema de distribución a través de las líneas de transmisión [17]. Otra forma de lograr el soporte de voltaje es a través de la inyección de potencia reactiva utilizando los sistemas de electrónica de potencia de un ESS [51]. El convertidor de potencia de cuatro cuadrantes en un ESS puede inyectar potencia reactiva al bus para mantener ya sea el factor de potencia o el voltaje hasta cierto punto en el bus, mejorar la eficiencia del sistema y disminuir las pérdidas [37].

### 3.7 Soporte de transmisión

Es un servicio para la transmisión que mejora el desempeño de la T&D compensando las anomalías eléctricas y perturbaciones tales como: amortiguamiento de la estabilidad de transmisión, amortiguamiento de la resonancia sub-síncrona, estabilidad y control de voltaje y reducción de las pérdidas de carga por subfrecuencia [78]

### 3.8 Alivio de congestión de transmisión

El servicio de alivio de la congestión de transmisión se presenta cuando un ESS realiza arbitramento y provee energía a una red cercana (*downstream*) en el período pico sin hacer uso de las líneas de transmisión [78].

### 3.9 Diferimiento de actualización de transmisión y distribución (T & D)

Esta aplicación consiste en utilizar un ESS para reducir la necesidad de inversiones en la infraestructura de transmisión y distribución al asumir carga pico en un segmento de red [78,74,51,75]. Adicionalmente, al no hacer trabajar los dispositivos de las redes de distribución al límite de su capacidad, como los transformadores, extiende la vida útil de los equipos en la red [66].

### 3.10 Potencia en sitio para subestación

Esta aplicación consiste en sistemas de almacenamiento de energía que proveen potencia a dispositivos de conmutación, equipo de comunicación y control cuando la red no está energizada [78].

---

### 3.11 Gestión del costo de energía tiempo-de-uso (TOU)

Es una aplicación de usuario final, es similar al arbitramento de energía, pero en las instalaciones del usuario. El usuario carga su ESS a precio *off-peak* y lo puede usar en momentos *on-peak* sin mayores costos. Este esquema se puede enriquecer con la presencia de sistemas PV residenciales o industriales, el ESS se puede cargar desde el PV durante el día y descargar durante la noche [78,66].

### 3.12 Gestión de la carga de la demanda

Es una aplicación de usuario final para reducir los costos totales del servicio eléctrico al reducir las cargas de la demanda, esto se logra al reducir el consumo durante períodos específicos, normalmente los períodos de demanda pico de la planta generadora [78].

### 3.13 Confiabilidad del servicio eléctrico

La aplicación de confiabilidad de servicio eléctrico consiste en usar el almacenamiento de energía para proveer un servicio de energía eléctrica altamente confiable o *uninterruptible power supply* (UPS) [66]. En el evento de una falla completa del sistema de potencia, que dure más de algunos segundos, el sistema ESS puede proveer suficiente energía para soportar la caída del sistema eléctrico, completar un procedimiento de apagado ordenado de procesos, o transferir la generación a alguna planta de generación en sitio [78,74].

### 3.14 Calidad de la potencia del servicio eléctrico

La aplicación de calidad de la potencia involucra usar un ESS para proteger las cargas contra eventos de corta duración que afectan la calidad de la potencia entregada a las cargas. Algunas manifestaciones de energía de baja calidad son: variaciones en la magnitud del voltaje, variación en la frecuencia, bajo factor de potencia, armónicos e interrupciones de cualquier duración [78].

### 3.15 Arbitramento de energía de fuentes renovables

El arbitraje de una RES no despachable permite almacenar la energía durante horas de alta generación y demanda baja (e.g., en la noche) y queda disponible para despachar energía a la red en períodos de alta demanda [66,51]. Evita situaciones de restricción de transmisión en momentos de alta generación y de alta congestión en la red. Esta aplicación trae más beneficios a los dueños del ESS al vender más energía a un precio más alto, de esta forma se traslada la energía renovable de un período desfavorable para la carga al período de carga pico, esto puede ser visto como un acople del perfil de carga y el perfil de generación del RES [66].

---

### 3.16 Afirmado de la capacidad de energía de fuentes renovables

Esta aplicación permite convertir la generación intermitente de un RES a una fuente de potencia constante [78]. Mediante un ESS se minimizan los períodos de baja generación RES, haciendo la salida más “firme” [66]. Esta aplicación ayuda a aliviar la fluctuación de la potencia, tener capacidad *Low voltaje Ride Through*(LVRT), control de voltaje y suavizado de la potencia de salida.

### 3.17 Integración a red de la generación renovable

A medida que la penetración de los RES incrementa, los efectos indeseables de los RES sobre la red también incrementan. El almacenamiento puede ayudar con la integración adecuada de los RES al mitigar los efectos menos deseables. Se consideran seis subtipos de efectos agrupados en dos categorías: 1) corta duración (pocos segundos a pocos minutos) y 2) larga duración (pocos minutos a pocas horas)

#### Aplicaciones de corta duración

- Reducir la volatilidad de la salida
- Mejorar la calidad de la potencia

#### Aplicaciones de larga duración

- Reducir la variabilidad de la salida
- Alivio de la congestión de la transmisión
- Respaldo ante una caída inesperada de la generación

Reducir las violaciones de carga mínima (cuando la generación RES supera la demanda y hay que hacer restricción) [78,66,75]