



U
P
T

Universidad Politécnica de Tulancingo

**TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE
ENERGÍA CON ENFASIS EN ELECTROQUÍMICA**

por

Juan Jesús Mayoral Hidalgo

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de

Maestría en Energías Renovables

Supervisada por:

Dr. Felipe Coyotl Mixcoatl

Tulancingo de Bravo, Hidalgo

Septiembre 2019

©UPT 2019

Derechos reservados

El autor otorga a UPT el permiso de reproducir
y distribuir copias de este reporte en su totalidad
o en partes.



RESUMEN

Derivada del creciente consumo de energía en todo el mundo, es clara la importancia, no solo, de incrementar la generación eficiente, sino también de obtenerla de la manera más limpia posible y con un bajo impacto ecológico. Una vía de obtención de energía que cada día cobra mayor interés son las fuentes renovables. Sin embargo, en comparación con las fuentes tradicionales de energía, se presenta la desventaja de no poder ajustar la producción a la demanda requerida al mismo tiempo, debido a que no se tiene el control de los recursos energéticos renovables. Una solución a este problema es el uso de sistemas de almacenamiento como una herramienta que permite hacer más eficiente el uso de la energía cuando no coincide el máximo de la producción con el máximo de la demanda.

En este trabajo se lleva a cabo una investigación documental con el objetivo de obtener y mostrar una idea general sobre los distintos tipos de tecnologías de almacenamiento de energía. De igual manera, se especifican aspectos referentes a su funcionamiento, aplicaciones, viabilidad y líneas futuras de desarrollo. Así como el análisis de la problemática energética en México.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Politécnica de Tulancingo.

A los profesores del programa de Energías Renovables,
especialmente a mi asesor de tesis.

A mis padres y hermanos.

CONTENIDO

RESUMEN -----	I
AGRADECIMIENTOS -----	II
CONTENIDO -----	III
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN -----	1
1.1 Estado del Arte -----	2
1.2 Objetivos -----	5
1.3. Alcances y limitaciones -----	6
1.3.1. Alcances-----	6
1.3.2. Limitaciones-----	6
CAPÍTULO II PANORAMA GENERAL DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA -----	7
2.1. Planteamiento del problema -----	7
2.2. Tipos de energía -----	12
2.2.1. Energía eléctrica -----	12
2.2.2. Energía mecánica-----	13
2.2.3. Energía química-----	13
2.2.4. Energía nuclear -----	14
2.2.5. Energía térmica -----	14
2.3. Demanda de energía -----	14
2.3.1. Alternativas para regular la variación de la demanda de energía-----	16
2.4. Almacenamiento de energía -----	16
2.4.1. Almacenamiento de energía primario-----	17

2.4.2.	Almacenamiento de energía secundario	18
2.5.	Importancia del almacenamiento de energía.	18
2.6.	Beneficios del almacenamiento	21
CAPÍTULO III SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA		23
3.1.	Tecnologías de almacenamiento de energía	23
3.1.1.	Almacenamiento de energía mecánica	23
3.1.1.1.	Almacenamiento por Bombeo Hidráulico	24
3.1.1.2.	Almacenamiento por aire comprimido	29
3.1.1.3.	Almacenamiento por volante de inercia	33
3.1.2.	Almacenamiento de energía química	37
3.1.2.1.	Almacenamiento de energía por Hidrogeno	39
3.1.2.2.	Almacenamiento de energía por Metano	42
3.1.3.	Almacenamiento de energía eléctrica	45
3.1.3.1.	Capacitor	45
3.1.3.2.	Supercapacitor	45
3.1.3.3.	Superconducción electromagnética	46
3.1.4.	Almacenamiento de energía térmica	48
3.1.4.1.	Almacenamiento por calor Sensible	49
3.1.4.2.	Almacenamiento por calor latente	50
3.1.4.3.	Almacenamiento Termoquímico	52
3.2.	Tecnologías de interés (Acumuladores)	54
3.2.1.	Terminología y fundamentos.	55
3.2.1.1.	Capacidad	55
3.2.1.2.	Capacidad estándar	56
3.2.1.3.	Capacidad real	56
3.2.1.4.	Capacidad nominal	56
3.2.1.5.	Capacidad retenida	56
3.2.1.6.	Funcionamiento	57
3.2.2.	Baterías primarias	58
3.2.2.1.	Baterías de Li/FeS ₂ a temperatura ambiente	58
3.2.2.2.	Baterías de óxido de vanadio Li/Ag	59
3.2.2.3.	Baterías de Zn-Air	59

3.2.3.	Baterías secundarias-----	60
3.2.3.1	Baterías secundarias con electrolito alcalino-----	60
3.2.3.2	Baterías de Na-S -----	65
3.2.3.3	Baterías de Cloruro de Níquel sódico-----	66
3.2.3.4	Baterías de flujo redox -----	66
3.2.3.5	Batería de plomo-acido-----	68
3.2.3.6	Batería de ion-litio -----	71
3.2.4.	Nuevas líneas de investigación -----	74
3.2.4.1	Baterías con estructuras de electrodos que se mueven físicamente.-----	74
3.2.4.2	Materiales de electrodos orgánicos para baterías de Litio -----	75
3.2.6.3	Electrolitos alternativos.-----	75
 CAPÍTULO IV RESULTADOS Y CONCLUSIONES-----		76
4.1	Resultados-----	76
4.2.	Conclusiones-----	86
 BIBLIOGRAFÍA-----		89

Capítulo I Introducción

Los sistemas de almacenamiento de energía son en la actualidad un importante campo para invertir en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, esto debido al exponencial crecimiento de la demanda de energía requerida por las economías mundiales, se prevé que para el año 2050 la demanda de energía se duplique y que la mayoría de ésta sea generada por fuentes renovables, con bajas emisiones de gases contaminantes, así como también un bajo costo de generación. Sin duda alguna, los sistemas de almacenamiento de energía jugarán un papel muy importante debido a la necesidad de acumular la energía generada por estas fuentes alternas. Entre las principales tecnologías de almacenamiento de energía se pueden nombrar las baterías, volantes de inercia, bombeo hidráulico, sistemas de aire comprimido, supercapacitores y capacitores. Estas tecnologías de almacenamiento se clasifican de acuerdo a la naturaleza de generación eléctrica en 5 principales campos: [1]

1. Energía química.
2. Energía térmica.
3. Energía electroquímica.
4. Energía mecánica.
5. Energía eléctrica.

A pesar de que se hace una investigación general de todos los sistemas de almacenamiento, se verá con mayor detalle la naturaleza de los sistemas electroquímicos.

1.1 Estado del Arte

En esta sección se describen brevemente los trabajos actuales acerca de los sistemas de almacenamiento de energía.

Los supercondensadores han sido relegados durante muchos años a aplicaciones mundanas como protección de memoria y respaldo de baterías internas, pero actualmente su aplicación se ha ampliado significativamente en vehículos eléctricos y teléfonos inteligentes. Se han convertido en el sistema de conversión y almacenamiento de energía más importante en la nanotecnología renovable y sostenible. Debido a su gran capacidad y suministro de energía con un tiempo relativamente corto y una vida útil más larga, los supercondensadores han logrado grandes avances en aplicaciones de energía. [2]

Los supercondensadores de estado sólido se consideran como la tecnología más promisoría para la electrónica portátil en función de su alta densidad de energía y densidad de potencia, excelente flexibilidad, proceso de fabricación escalable y de bajo costo. Las técnicas de impresión electrónica podrían garantizar que el proceso de fabricación sea simple, escalable y respetuoso con el medio ambiente. Además, se pueden dotar de varias características, como el peso ligero y la flexibilidad, mediante la elección de varios sustratos imprimibles y flexibles. [3]

Actualmente el Instituto de Micro-Electrónica y Compositos (IMEC) y Universidad de Hasselt trabajan para aumentar la producción de células de estado sólido en una línea piloto en Bélgica. La innovación clave del IMEC es el electrolito de nanocompuestos sólidos que ha desarrollado, según el instituto tiene una conductividad excepcionalmente alta. El electrolito se combina con un cátodo de fosfato de hierro y litio estándar y un ánodo de metal de litio [4]

En el campo del almacenamiento de energía mecánica, el almacenamiento de energía de aire comprimido (*CAES*) por sus siglas en inglés *Compressed Air Energy Systems* es un método, que puede resolver las dificultades de conexión a la red de energía inestable de energía renovable, sin embargo presenta una serie de inconvenientes como su baja eficiencia y el

impacto ambiental debido al consumo de hidrocarburos. Por lo tanto, muchos académicos e instituciones han llevado a cabo investigaciones en profundidad sobre estos defectos de los CAES tradicionales, y exploran constantemente medidas mejoradas, incluida la propuesta de CAES adiabático avanzado (AA-CAES), introducido mediante la aplicación de almacenamiento de energía térmica (TES) por sus siglas en inglés Thermal Energy System. [5]

En 2014, el Instituto de Física y Química (IPC) de la Academia de Ciencias China (CAS,) la Universidad de Tsinghua y el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica de China (CEPRI) construyeron conjuntamente un CAES de 500 kW sin combustión con un sistema de simulación dinámica llamado TICC-500, que utiliza un fluido de intercambio de calor de doble tanque para almacenar calor y usa agua a presión como TES y medio de transferencia. [5]

En 2017, la Universidad de Tsinghua y la compañía Zhongyan Jintan llevaron a cabo una investigación sobre 50MW AA-CAES basada en el almacenamiento de gas en cavernas de sal. El proyecto adopto CAES sin combustión, con una capacidad de almacenamiento de $50\text{MW} \times 4\text{h}$, que es similar al TICC-500. [5]

Respecto a las tecnologías de almacenamiento de energía electroquímica existen nuevas propuestas que basan sus innovaciones en la naturaleza del material con el que se trabaja, tal es el caso de las baterías (Al-air), Investigadores de la empresa Albufera Energy Storage, especializada en almacenamiento energético para vehículos eléctricos y Smart Grids, trabajan actualmente en el desarrollo de este tipo de baterías recargables [6], que generalmente están fabricadas con materiales rígidos y pesados, como metal o plástico, mientras que se necesita una solución voluminosa de electrolitos, ya sea estática o en circulación, para garantizar su funcionamiento estable. Por lo tanto, son menos adecuadas para alimentar dispositivos flexibles y portátiles con una menor demanda de energía, es aquí donde surge la innovación de implementar papel de celulosa para tener un almacenamiento flexible. [7]

El ánodo de aluminio (Al) se incrusta dentro del sustrato de papel durante el proceso de fabricación del papel, mientras que el cátodo que respira aire se deposita en la superficie del papel utilizando una tinta de reducción de oxígeno. A pesar de su estructura simple y bajo costo,

esta batería flexible de Al-air puede entregar una densidad de potencia satisfactoria de 19 mWcm^2 con electrolito alcalino, y su vida útil de operación es de hasta 58 h con solo 25 mg de Al cuando se emplea electrolito salino. En el futuro, se utilizará un catalizador de oxígeno no metálico para mejorar su respeto por el medio ambiente, y se adoptará el prensado en caliente para aumentar aún más su robustez ante la deformación externa. [7]

En la actualidad las investigaciones sobre los materiales que componen el ánodo se centra principalmente en materiales de carbono, sin embargo presentan diferentes limitantes. En la búsqueda de mejorar el rendimiento de las baterías con base al material anódico, existe una tendencia por el uso de los calcogenuros a base de niobio (Óxidos de niobio, sulfuros y seleniuros) se espera que sean excelentes materiales de electrodos debido a sus excelentes propiedades de almacenamiento de energía, que han atraído un interés creciente. Los óxidos de niobio exhiben varias ventajas, como excelente estabilidad química, alta ventana potencial, y abundantes parejas redox, lo que las hace potenciales materiales del electrodo. Esto fue detallado por actuales investigaciones por parte de la Universidad Central del Sur de China, quienes han realizado estudios electroquímicos sobre óxido de niobio NbO como electrodo anódico para batería de iones de litio. Los resultados de las propiedades electroquímicas muestran que el electrodo de NbO tiene una capacidad de carga / descarga altamente reversible y estable, y puede ser un buen candidato como electrodo anódico para la batería de iones de litio [8]

Otra innovación en los sistemas de almacenamiento electroquímico tiene que ver con el fosforeno. La aparición de este en 2014, despertó un enorme interés en el campo de la física, la química, la biomedicina y la ciencia de los materiales. Los sistemas de almacenamiento electroquímico no fueron la excepción, investigaciones actuales, proponen el uso de delgadas capas de fosfeno como electrodo para celdas electroquímicas. Algunas de las baterías que se están relacionando con este material son las de ion-litio, baterías de iones de Na, baterías de iones K, baterías de ion magnesio, baterías de Li-S y supercondensadores. [9]

A pesar de que existen pocos informes experimentales, la posibilidad de usar fosforeno como el material del electrodo para el almacenamiento de iones de magnesio ha despertado un gran interés entre los investigadores de la industria y la academia debido a sus méritos

sobresalientes por encima de las baterías de ion litio, como el radio atómico similar de iones de litio, alto punto de fusión (649 °C), ambientalmente benignas y abundantes fuentes. [9]

Otro tipo de alternativas para mejorar el almacenamiento de energía electroquímica es la hibridación. La conjunción entre baterías de plomo ácido y supercondensadores ha dado como resultado un sistema llamado UltraBattery fue desarrollado y producido conjuntamente por CSIRO con sede en Australia y The Furukawa Battery of Japan. En la actualidad, los informes disponibles sobre UltraBattery provienen básicamente de CSIRO y Furukawa. UltraBattery, es un dispositivo de almacenamiento de energía híbrido, compuesto por una celda de plomo- ácido y un supercondensador asimétrico que están conectados en paralelo con un circuito interno no controlado, la placa positiva de la celda de ácido de plomo está hecha de dióxido de plomo, y la placa negativa está hecha de material de plomo poroso. Cuando la UltraBattery se carga o descarga a una velocidad muy alta, el supercondensador puede proporcionar una alta potencia para amortiguar la corriente y proteger los componentes de la batería de plomo y prolongar la vida útil de la batería. [10]

1.2 Objetivos

Objetivo General

Realizar una investigación documental acerca de las tecnologías de almacenamiento de energía que se encuentran interrelacionadas con las energías renovables.

Objetivos específicos.

1. Identificar las tecnologías de almacenamiento en orden de aparición, de eficiencia y de aplicación.
2. Hacer un comparativo de las distintas tecnologías de almacenamiento.

1.3. Alcances y limitaciones

1.3.1. Alcances

Recopilar los datos existentes en forma documental de las tecnologías de almacenamiento de energía, con la finalidad de realizar una comparativa entre las tecnologías existentes, partiendo de lo general a lo particular. Se profundiza la revisión bibliográfica de las tecnologías que se encuentran en el espectro de almacenamiento de pequeña y mediana escala, y más aún en aquellas que por sus características son fácilmente adaptables a sistemas de generación de energía fotovoltaica y eólica.

1.3.2. Limitaciones

Los límites de este proyecto quedan al margen de la investigación documental, así como del análisis cualitativo de la información obtenida, el fin de esto es estimular la habilidad de construir el conocimiento.

Capítulo II Panorama general de los sistemas de almacenamiento de energía

2.1. Planteamiento del problema

Indiscutiblemente el uso de la energía ha sido una herramienta fundamental para el desarrollo de las sociedades, desde el descubrimiento del fuego que aportó nuevas utilidades y comodidades que no eran esencialmente necesarias para la supervivencia, pero que colaboraron a mejorar la calidad de vida del hombre primitivo. De manera resumida, la fabricación del carbón procedente de la madera, permitió el dominio de un material cuya combustión permitía el uso más eficiente de esta energía calorífica. Fue así cómo, la madera fue tomando gran importancia a medida que se descubrían más utilidades para el fuego, al paso de los siglos la expansión de países europeos trajo consigo la necesidad de incrementar el uso de la energía y esto llevo al hombre al descubrimiento de un mineral que la misma tierra había estado almacenando por miles de años, el carbón mineral, que más adelante fuera pieza fundamental para la revolución industrial. Este mineral se convirtió en el sustituto ideal del carbón de madera. Otro gran paso en la historia del hombre fue gracias al aprovechamiento de la revolución industrial que trajo consigo la expansión del comercio, debido al desarrollo de los medios de transporte impulsados por la máquina de vapor. Habiendo sucedido todo esto, llego de manera más que conveniente el descubrimiento y uso energético del petróleo que ha permitido lo que se considera el salto de desarrollo más grande en la historia del hombre. [11]

Dos importantes indicadores que describen a la perfección el nivel de desarrollo y el tamaño de una economía son la producción y el consumo de energía. Países en vías de desarrollo como México se enfrentan ante la gran necesidad de expandir el suministro eléctrico para asegurar y satisfacer la creciente demanda de las economías. [12]

Las sociedades modernas dependen cada vez más de fuentes de energías confiables y seguras para apuntalar el crecimiento económico y la prosperidad de la comunidad. Se espera que esta dependencia crezca a medida que se desarrollen y desplieguen fuentes de poder más eficientes y menos intensivas en el uso de carbono para ayudar a descarbonizar las economías.

El crecimiento poblacional a nivel mundial, es tan grande que exige una cantidad desmesurada de energía, en la figura 2.1 se muestra un gráfico cuyo comportamiento ascendente puede ilustrar la relación entre la demanda per cápita de energía y el crecimiento de la población. [13]. Estos datos obtenidos de la Agencia Internacional de Energía indican una demanda de energía mundial anual per cápita de 3,124 kWh.

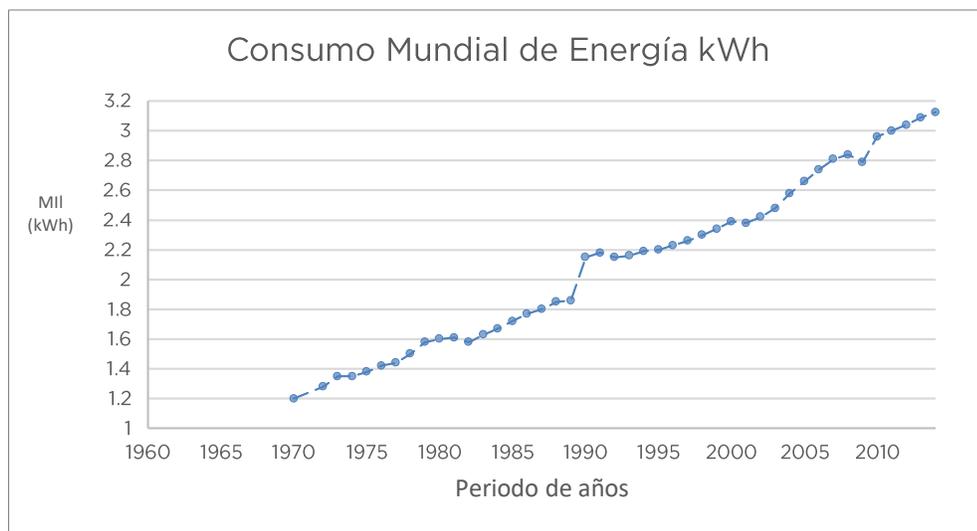


Fig. 2.1 Consumo mundial energético per cápita. Fuente: [13]

En la figura 2.2 se muestra el comportamiento promedio de la demanda de energía registrada por el sistema interconectado Nacional de México, datos obtenidos de este sistema establecen una demanda promedio de 2,157 kWh. [14]

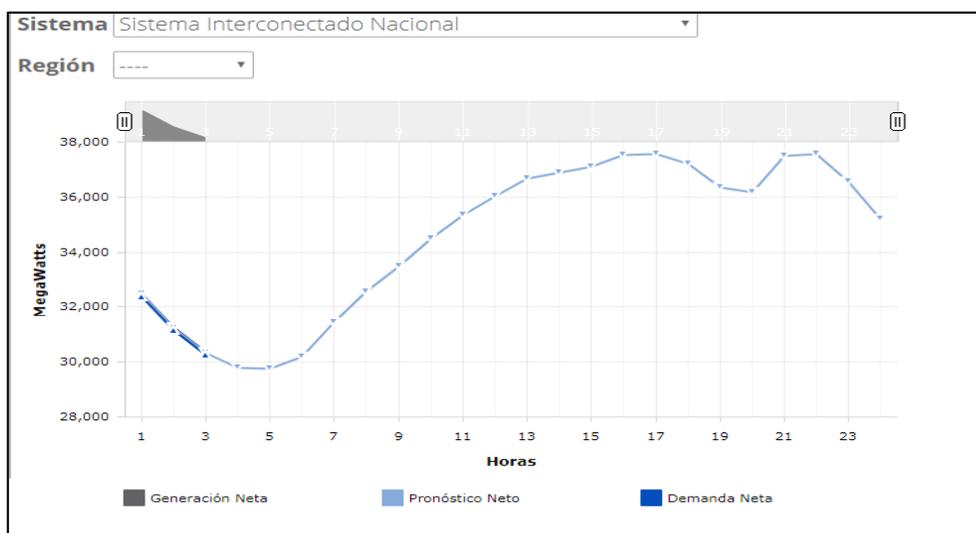


Fig. 2.2 Gráfica de la demanda de energía diaria en México. Fuente: [14]

Pese a las innovaciones amigables con el medio ambiente que se han desarrollado en los últimos años, está más que claro que existe una problemática con la generación de energía. Ésta problemática tiene dos partes fundamentales, la primera de ellas está relacionada con las energías renovables, ya que factores como la poca regulación en materia legal, altos costos de producción, limitaciones tecnológicas, poca viabilidad de proyectos, etc. No permiten el despunte deseado de este tipo de generación de energía, lo que nos lleva a establecer que en pleno siglo XXI existe escases de este tipo de energías. La otra parte fundamental de este problema es la dependencia que tiene el ser humano de combustibles derivados del carbón aun sabiendo de su futura escases, es un caso más alarmante que esto, el efecto negativo de estos combustibles sobre el medio ambiente. [13]

Hablando concretamente del petróleo, incluso si su participación disminuyó del 46% en 1973 al 32% en 2015, sigue representando la mayor participación en el suministro total de energía primaria, seguido del carbón (28%) y el gas natural (22%). Si el petróleo ha sido ampliamente desplazado por el gas natural y la energía nuclear en la producción de electricidad (cayendo del 25% al 4% de la producción de electricidad en 40 años), todavía representa más del 92% del consumo de energía del sector del transporte e industrial. [13]

Específicamente en México, del 100 % de consumo de energía, el 79 % es procedente de petróleo, gas y carbón. En la figura 2.3 se observa que el dominio en porcentaje de generación eléctrica corresponde a la Termoeléctrica y la Carboeléctrica.

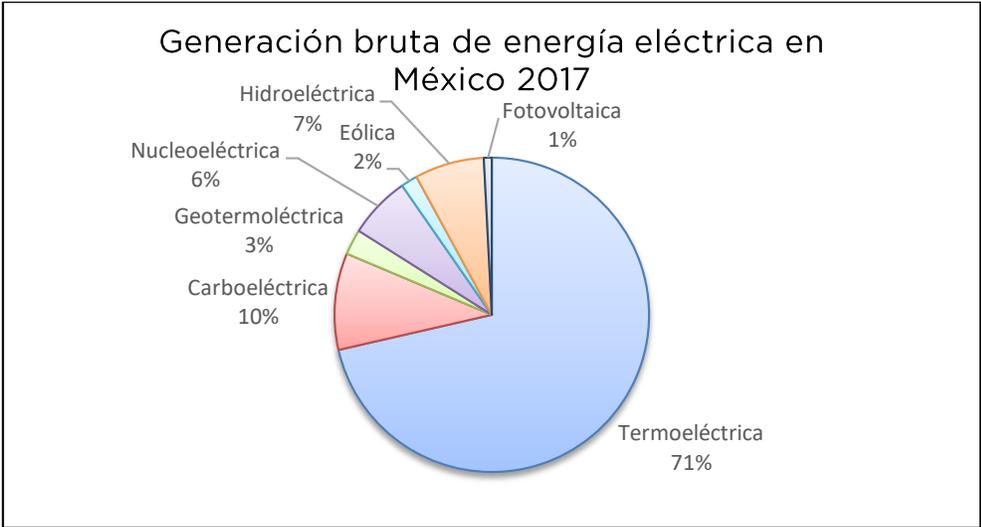


Fig. 2.3 Generación de energía en México. Fuente [15]

La Fig. 2.4 muestra la generación de energía únicamente referente a fuentes renovables mostrando la amplia ventaja que tiene la generación Hidroeléctrica por sobre la geotérmica, eólica y fotovoltaica.

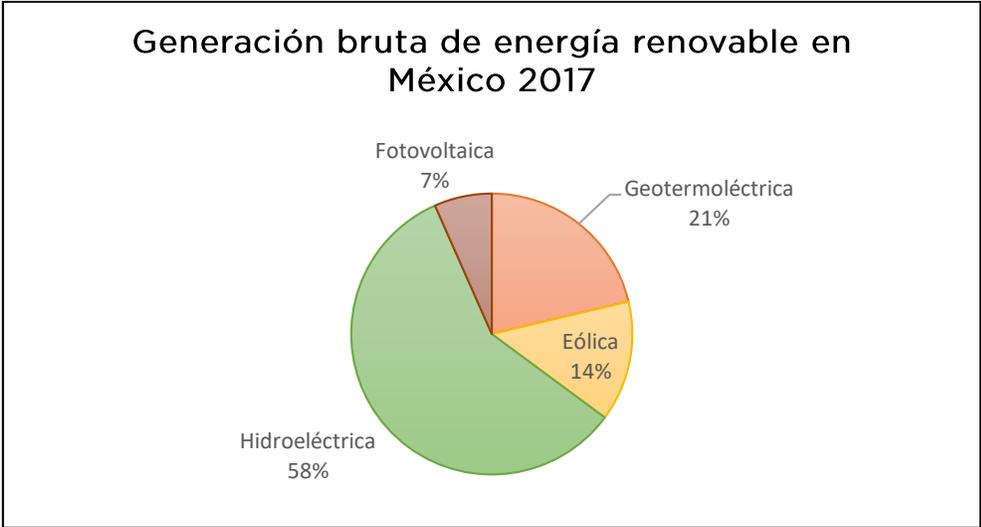


Fig. 2.4 Generación de energía renovable en México. Fuente [15]

Es muy pequeño el porcentaje de energía consumida que proviene de las energías renovables, está más que claro que es una problemática global y con mayor énfasis en países en vías de desarrollo. El mapa de la figura 2.5 se ilustra claramente la problemática en cuestión, son los países de primer mundo los que cuentan con un gran desarrollo en su producción de energía renovable. [13]

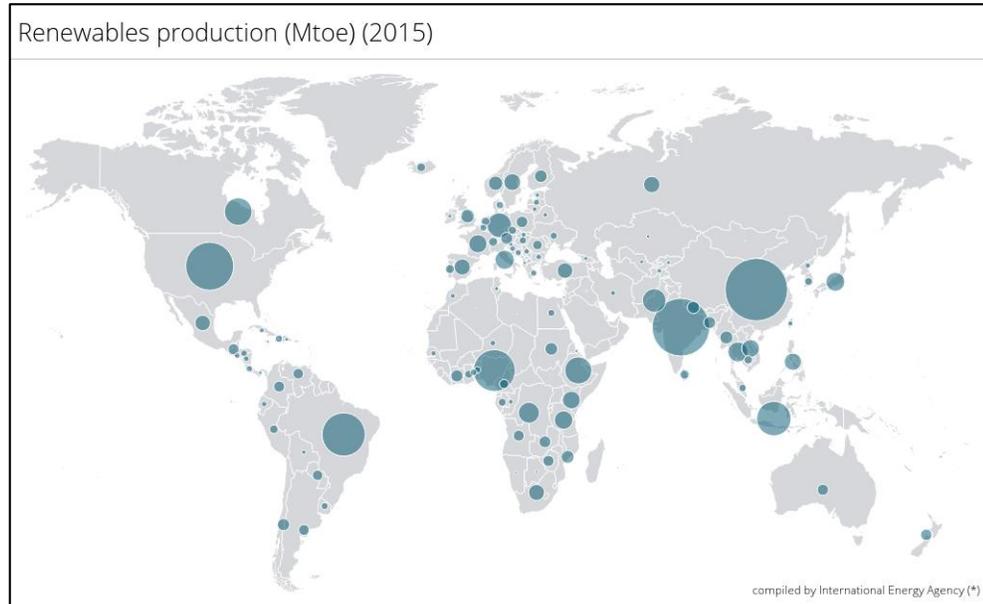


Fig. 2.5 Producción mundial de energía renovable. Fuente: [13]

La ubicación geográfica y algunos otros factores independientes a las economías llegan a ser puntos clave para la explotación de los recursos renovables. Claro ejemplo de esto es la riqueza en horas sol en los estados del norte del país, la abundancia del recurso eólico en el Istmo o los vientos marítimos de la península de Yucatán, así como la energía geotérmica almacenada en las zonas volcánicas del centro del país. Sin embargo, existe dentro de todas las dificultades para echar a andar este tipo de generación una, en la cual las limitantes tecnológicas son factor clave para que no permitan el despunte de este tipo de energías, los sistemas de almacenamiento. En la gráfica mostrada en la figura 2.2 que ilustra la demanda de energía en un día normal, se observa un incremento gradual de la demanda de las 9:00 am a 6:00 pm que se atribuye al sector industrial, se aprecia también un pico de demanda entre las 9:00 pm y 10:00 pm atribuido al sector de servicios y por último en esta misma imagen se presenta un valle de energía entre las 2:00 am y 9:00 am, es decir si se tiene una generación grande de energía eólica

en este lapso de tiempo, esta energía se estaría desperdiciando debido la poca demanda de esta, este problema se solventaría fácilmente si existiera un sistema de almacenamiento con la capacidad necesaria para acumular toda esa energía producida.

2.2. Tipos de energía

Existen dos tipos generales de energía, energía de transición y energía de almacenamiento. La energía de transición es energía en movimiento (energía cinética), y como tal puede moverse a través de los límites del sistema. Por otro lado, la energía almacenada <(energía potencial), se encuentra presente en formas de masa, posición en un campo forzado, etc. Estas formas almacenadas generalmente se pueden convertir fácilmente en alguna forma de energía de transición. [16]

No existe una clasificación aceptada de energía, uno puede dividir las diferentes formas de energía en seis principales grupos y clasificarlas como energía mecánica, energía eléctrica, energía electromagnética, energía química, energía nuclear y energía térmica. Se puede convertir de una forma a otra, pero de acuerdo con la primera ley de la termodinámica, no puede ser creada o destruida dentro del entorno considerado en el universo. Sin embargo, no todas las formas de energías son de la misma calidad. La energía mecánica, energía eléctrica y la energía proveniente de combustibles fósiles son de alta calidad y pueden ser fácilmente convertidas de una forma a otra. Por otro lado, la energía térmica de bajas temperaturas es considerada de baja calidad [16]

2.2.1.Energía eléctrica

La energía eléctrica es esa clase de energía asociada con el flujo o acumulación de cargas. El flujo de cargas es la forma de transición de esta energía. La energía eléctrica puede almacenarse como un campo electrostático o como energía de campo inductivo (energía de campo electromagnético), es la energía asociada con el campo magnético establecido por el flujo de cargas a través de una bobina de inducción. [17]

$$E = V * I * t \quad (1)$$

2.2.2.Energía mecánica

La energía mecánica se define como energía que puede ser utilizada para mover un objeto. La forma de transición de la energía mecánica es llamada trabajo. La energía mecánica se puede almacenar como energía potencial o como energía cinética. La energía mecánica de un cuerpo es la suma de su energía potencial y energía cinética (1) [18]

$$E = Ec + Ep \quad (2)$$

La energía cinética es está relacionada al movimiento que tienen los cuerpos, la capacidad de producir trabajo depende de la masa de los cuerpos y de su velocidad, según la ecuación:

$$Ec = \frac{1}{2} m * v^2 \quad (3)$$

La energía Potencial es la capacidad que tiene los cuerpos de producir trabajo en función de la posición que ocupan:

$$Ep = m. g. h \quad (4)$$

2.2.3.Energía química

La energía química es energía que se libera como resultado de interacciones en las que dos o más átomos y / o moléculas se combinan para producir un compuesto químico más estable. La energía química existe solo como una forma de energía almacenada. Su valor depende del poder calorífico y de la cantidad de combustible en masa o volumen según sea la naturaleza de este. [1]

$$E = m. Pc \quad (5)$$

$$E = v. Pc \quad (6)$$

2.2.4. Energía nuclear

La energía nuclear es otra forma de energía que existe solo como energía almacenada, que se libera como resultado de interacciones de partículas con o dentro del núcleo atómico. Hay tres tipos generales de reacciones nucleares, incluida la descomposición radiactiva, la fisión y la fusión. Al igual que los sistemas de almacenamiento de energía electromagnética, los propios de energía nuclear, también se excluye del tema de estudio de este documento. La ecuación que rige este tipo de energía es la propuesta por Albert Einstein.

$$E = m \cdot c^2 \quad (7)$$

2.2.5. Energía térmica

Esta energía está asociada con la vibración atómica y molecular. La energía térmica es una forma de energía básica en que todas las otras formas de energía pueden ser convertidas completamente, pero la conversión de energía térmica en otras formas está severamente limitada por la segunda ley de la termodinámica, ya que la forma de transición de la energía térmica es el calor. Este tipo de energía se puede almacenar en casi cualquier medio, ya sea como calor sensible o calor latente. [16]

$$Q = mC\Delta T \quad (8)$$

2.3. Demanda de energía

La demanda del sistema de energía está compuesta por consumidores de tres categorías descritas de la siguiente manera [1]:

- Doméstico. El consumo máximo en el sector doméstico, por ejemplo, ocurre durante horas de la mañana y de la tarde y los fines de semana cuando las personas, al estar en casa, usan la mayor parte de sus dispositivos eléctricos.
- Industrial: El consumo industrial es más estable que el doméstico y comercial, debido a la posibilidad de organizar el trabajo en varios turnos, aunque no todos los consumidores

industriales pueden operar turnos, por lo que el consumo máximo ocurre durante el día con un ligero descenso a la hora del almuerzo.

- Comercial: El consumo comercial de manera general, alcanza su máximo durante el día, especialmente a la hora del almuerzo, y al final de día de la jornada de trabajo. El alumbrado público que se considera dentro de la demanda comercial, solo requiere energía durante la noche y de forma reducida.

En los países occidentales, que tienen estándares de vida considerablemente altos, las demandas domésticas y comerciales representan una parte significativa del consumo general, que por lo tanto tiene picos visibles en la mañana, y en la tarde, depresiones nocturnas de la demanda. La demanda de energía se encuentra en función de una serie de factores particulares de la geografía del lugar, así como de la economía. Como ya se ha mencionado antes en países desarrollados, el consumo doméstico y comercial es considerablemente mayor a los mismos tipos de consumo en países en vías de desarrollo. [19]. Por ejemplo, el uso residencial incluye iluminación, calefacción y aire acondicionado y a menudo calentadores de agua eléctricos y aparatos de cocina. La magnitud de la demanda de energía eléctrica también varía con el tiempo del año, hay más energía utilizada en el invierno para calefacción y en el verano para el aire acondicionado. La variación con el tiempo durante el día también es generalmente mayor en verano que en invierno. [19]

El uso de energía también varía con el día de la semana en muchos casos, considerando que es fácil de entender que hay un patrón diario de uso de energía, las necesidades no son las mismas todos los días de la semana, debido a que muchas actividades son diferentes los fines de semana que durante los días de trabajo. Considerando que tanto la dependencia del tiempo como la magnitud pueden variar apreciablemente con relación a la ubicación, el clima y la época del año, estos últimos patrones generales están siempre presentes, y plantean un serio problema para las empresas de servicios eléctricos tanto para suministrar y gestionar la red eléctrica de transmisión y distribución. [17]

2.3.1. Alternativas para regular la variación de la demanda de energía

Existen varias alternativas aplicadas en todo el mundo para estabilizar las variaciones de demanda de energía, por ejemplo, en países Europeos se establecen precios de energía de acuerdo a la hora del día, otra alternativa como la aplicada en México y otros países es el uso de dos horarios durante el año. El uso de esta alternativa tiene sus inicios entre 1968 y 1970, el Reino Unido probó el experimento de avanzar hora del reloj por 1 h en los meses de invierno, así como en el verano, pasando de la hora de Greenwich a una nueva 'hora estándar británica'. El efecto de esto fue alterar la cantidad de carga en días de invierno, bajando el pico de la tarde y elevando el pico de la mañana para dar una meseta más plana diaria. A mediados de la década de 1980 hubo un experimento por parte de las eléctricas rusas cuando diferentes distritos tenían diferentes tiempos de reloj. Este experimento fue técnicamente exitoso. [19]

Otro enfoque es usar métodos de almacenamiento para absorber energía eléctrica cuando esté disponible y sea económico, y para volver a suministrarlo al sistema de la red cuando la demanda es más alta. Actualmente la tecnología de almacenamiento más aplicada es el uso de instalaciones Hidroeléctricas de bombeo. [17], [20]

2.4. Almacenamiento de energía

La introducción de elementos de almacenamiento de energía posibilita la acumulación de energía durante el tiempo en que la producción excede al consumo. La cantidad almacenada es usada cuando el consumo excede a la producción y permite mantener la planta de producción a un nivel constante, o con variaciones más pausadas. Esto permite un incremento de eficiencia, una reducción de costos, una mayor facilidad de gestión de la planta y un aumento de su vida media. [1]

La llegada del transistor (1940) marcó el comienzo de la era de la electrónica, que ha sido dominada por tecnologías de comunicación basadas en semiconductores. Una situación similar se desarrolla actualmente ya que estamos en una nueva era de la tecnología moderna en la que los principales actuadores son los sistemas de almacenamiento de energía. Los principales beneficiados con la implementación de sistemas de almacenamiento, son los sectores de

generación, transmisión y distribución de energía, los sectores de transporte eléctrico o híbrido, estaciones de telecomunicaciones básicas, sistemas de automatización del hogar, dispositivos médicos de campo. [19]

Con la población mundial en crecimiento de 7,4 mil millones (a partir de 2015), y con el aumento de demanda de dispositivos electrónicos en todo el mundo, el consumo de energía está creciendo a un ritmo constante. Durante los últimos 20 años hemos visto una evolución acelerada de las tecnologías renovables representadas por el desarrollo de la generación solar, eólica, térmica e hidroeléctrica. La inserción de estas nuevas fuentes de energía en las redes de energía eléctrica genera muchos problemas de integración y operación debido a las dependencias de estas fuentes de condiciones naturales y sus variaciones en el tiempo. Estas perturbaciones deben ser resueltas por soluciones que equilibran permanentemente el suministro y la demanda en la generación de energía. [13]

Con el modelo actual de generación y utilización de la electricidad, ésta es generada para ser directamente consumida solo unos momentos después. Cualquier desequilibrio puntual (por ejemplo, una central eólica que cesa su generación) ha de ser compensado poniendo en marcha una nueva fuente de energía. Algunas de estas instalaciones tienen tiempos de respuesta elevados, del orden de minutos. La integración de elementos destinados al almacenamiento de la energía permitiría optimizar las curvas de demanda y las curvas de producción. [21]

2.4.1. Almacenamiento de energía primario

La forma más común y estable en que se almacena la energía es en su forma primaria. La mayoría de la energía primaria generalmente se obtiene en formas almacenables. Por ejemplo, el petróleo crudo se almacena en tanques cuando se envían a las refinerías para su procesamiento. El carbón también se almacena a menudo en grandes pilas antes de su uso, ya sea en centrales eléctricas o plantas industriales. [1]

La biomasa es otra forma de energía primaria que es almacenable. Se pueden almacenar como troncos de madera, astillas de madera, pellets de madera que se puede quemar cuando sea necesario para proporcionar energía. [21]

Las características de las formas de almacenamiento de energía primaria son que tienen una densidad de energía muy alta y pueden proporcionar un almacenamiento a largo plazo. Por otro lado, también hay algunas formas de energía primaria que no son almacenables. Por ejemplo, la mayoría de las energías renovables los recursos no son fáciles de almacenar en su forma natural. Ejemplos típicos son la energía eólica, solar, mareomotriz y de olas. Solo pueden almacenarse convirtiéndolos en formas de energía secundaria. [21]

2.4.2. Almacenamiento de energía secundaria

Al igual que las formas de energía primaria, algunas formas de energía secundaria especialmente aquellas que están en la fase líquida y gaseosa son fácilmente almacenables. Un buen ejemplo es la gasolina, el diésel, los biocombustibles (etanol, butanol), hidrógeno, metano y biodiesel. Por lo general, se almacenan en tanques o recipientes de contención de alta presión de diversos tamaños y formas.

El principal desafío en el campo del almacenamiento de energía es con la energía que no se produce en forma de líquido ni gas. Algunas de estas formas de energía secundaria incluyen: trabajo, calor, y electricidad. [21]

2.5. Importancia del almacenamiento de energía.

El almacenamiento de energía proporciona servicios esenciales a lo largo de toda la cadena de valor de la energía y apoya en numerosos aspectos la transición hacia un sistema energético seguro, competitivo y con una menor huella de carbono. La disponibilidad de sistemas de almacenamiento permite [1]:

1. Asegurar un correcto balance entre demanda y consumo.

El aumento de la variabilidad en el lado de la generación requiere tecnologías y procedimientos para equilibrar la demanda de energía y el suministro de electricidad. El almacenamiento de la electricidad permite interaccionar entre el consumo y los sitios de

generación, y promueve la integración de la generación a partir de fuentes intermitentes (energías renovables). [1]

2. Gestionar mejor las redes de transmisión y distribución.

El adecuado uso de elementos de almacenamiento de energía permitiría obtener una alta capacidad de estabilización de la red. Asimismo, algunas tecnologías de almacenamiento podrían implantarse mucho más rápidamente que ciertas actualizaciones de la red con el consiguiente ahorro de inversiones. En un escenario con la producción y el consumo de electricidad cada vez más descentralizados y fluctuantes, el almacenamiento puede optimizar el uso de los activos de generación, transporte y distribución. El almacenamiento permitiría disponer de redes optimizadas respecto a sus valores de flujos de energía promedio, en lugar de ser optimizadas en función de los valores de los requisitos marcados por los picos de energía, lo que reduce también las pérdidas de transmisión y los costos de inversión. [1]

3. Promocionar la gestión de la demanda.

Las tecnologías de almacenamiento tendrán un papel clave en el proceso de transición del sistema eléctrico hacia un uso de energía más eficiente y sostenible. Esto incluirá el desarrollo en el sector del transporte para un despliegue creciente de movilidad eléctrica con vehículos eléctricos (HEV, EV) y la aparición de edificios inteligentes y redes inteligentes en general. Por otra parte, el almacenamiento de energía contribuye también a la gestión local de electricidad y a su consumo (autoconsumo), incluyendo la integración con otras formas de uso de la energía, como la calefacción/refrigeración, de una forma óptima para todo el sistema de alimentación. [1]

4. Mejorar la competitividad y seguridad de la red eléctrica.

El almacenamiento de energía tiene un papel importante en los nuevos diseños de mercado, en especial pensando en mercados con alta flexibilidad y numerosos servicios, ya que puede ser una alternativa económicamente atractiva para la expansión de la red y la desconexión de carga. No obstante, hay que destacar la creciente necesidad de una

regulación específica del almacenamiento y de los mecanismos de mercado para la flexibilidad y la seguridad del suministro. Ello debe ayudar a crear un nuevo mercado de almacenamiento de energía y contribuir al desarrollo de una industria competitiva de almacenamiento de energía. [1]

5. Mejorar los mercados energéticos establecidos.

En última instancia, es importante señalar que algunos sistemas de almacenamiento de energía, debido a su naturaleza intersectorial, también pueden afectar a los mercados bien establecidos, tales como el mercado de gas, los mercados locales de calor (por ejemplo, el almacenamiento de calor) y los mercados de transporte (por ejemplo, la movilidad eléctrica, las pilas de combustible). La capacidad intersectorial va más allá del mero almacenamiento y la recuperación de la electricidad o de la interconexión de redes energéticas de distinta naturaleza (gas y eléctrica). [1]

6. Potenciar las “redes inteligentes”.

La introducción de sistemas de almacenamiento de energía viene también a potenciar la aplicación de redes inteligentes (*smart grids*). Generalmente, la red está diseñada para contener fuentes de generación que responden a la demanda de los usuarios y son gestionadas por el operador de red. Por el contrario, una red inteligente puede ser utilizada de manera que el uso varía según la demanda y la disponibilidad de las fuentes intermitentes, los períodos de pico o valle de consumo, o los costos por kilovatio-hora. Los elementos de almacenamiento desempeñan un papel de arbitraje al poder acumular energía en valles y ofrecerla en períodos de pico. [1]

El almacenamiento de energía puede reducir el tiempo o el desajuste de la tasa entre la energía la oferta y la demanda de energía, jugando así un papel vital en la energía conservación. El almacenamiento de energía conduce al ahorro de combustibles Premium y hace que sistema más rentable reduciendo el desperdicio de energía. [1]

2.6. Beneficios del almacenamiento

La tecnología de almacenamiento de energía puede desempeñar un papel prominente en la cadena completa desde la generación, transmisión y distribución hasta el usuario final.

La utilización del almacenamiento de energía a gran escala puede ayudar a pasar de la generación centralizada a la distribuida, lo que ofrece varios beneficios, como aumentar el acceso a la energía y la disponibilidad en áreas remotas, calidad, confiabilidad, seguridad energética y mejor rendimiento. Los beneficios ofrecidos a los diversos interesados por las tecnologías de almacenamiento de energía se clasifican en tres principales grupos [22]:

- Usuarios de Electricidad:
 - Mejora la calidad y aumenta la fiabilidad de la energía, por lo tanto, se tiene menos costo por interrupción y mantenimiento en cualquier proceso.
 - Reducción de la carga máxima y por consecuencia se tiene una reducción en los cargos por demanda.
 - Posibilita la utilización de energías renovables.

- Generadores de Energías Renovables:
 - Utilización mejorada de la capacidad.
 - Reducción de horas de análisis de la red.
 - Regulación del voltaje y frecuencia en el punto de inyección.
 - Nivelación de la carga y una mejor capacidad de pronosticar los requerimientos requeridos por los sistemas de redes.

- Compañías de transmisión y distribución:
 - Reducir la necesidad de reserva de contingencia
 - Capacidad para diversificar los recursos de generación
 - Regulación de tensión y frecuencia de red
 - Conocer los requisitos y demandas fuera de la red.

El almacenamiento de energía tiene muchos beneficios, puede jugar un papel crucial para aumentar la penetración de energía renovable, limpia e intermitente recursos tales como la energía eólica, la energía solar y la corriente marina de las mareas a la red. El almacenamiento de energía ayuda en la planificación, operación y regulación de la frecuencia del sistema de energía, así como mantiene la estabilidad de los sistemas de energía, mejorando la calidad de la energía en la red del sistema. [21]

Según [23] los pasos necesarios para lograr una gestión eficiente para la flexibilidad de carga y generación incluye:

- Eficiencia energética y respuesta a la demanda
- Diversidad de generación espacial y fuente que exhibe perfiles
- Capacidad de llevar recursos al mercado por transmisión y oportuna utilización
- Almacenamiento de energía
- Desarrollo de comunicaciones de datos de servicios públicos de redes eléctricas

Para integrar los pasos anteriores tener en cuenta que el almacenamiento de energía es solo uno de estos cinco pasos destinados a proporcionar flexibilidad para el sistema de energía. Sin embargo, el almacenamiento de energía es un componente clave para garantizar la flexibilidad y fiabilidad con grandes penetraciones de viento y fuentes de energía solar.

Capítulo III Sistemas de Almacenamiento de Energía

3.1. Tecnologías de almacenamiento de energía

Existe una gran variedad de tecnologías utilizadas para el almacenamiento de energía. Estas pueden clasificarse de acuerdo a la finalidad de almacenamiento ya sea energía eléctrica o térmica. En la figura 3.1 se puede visualizar la clasificación que surge de estos dos tipos de almacenamiento de energía.

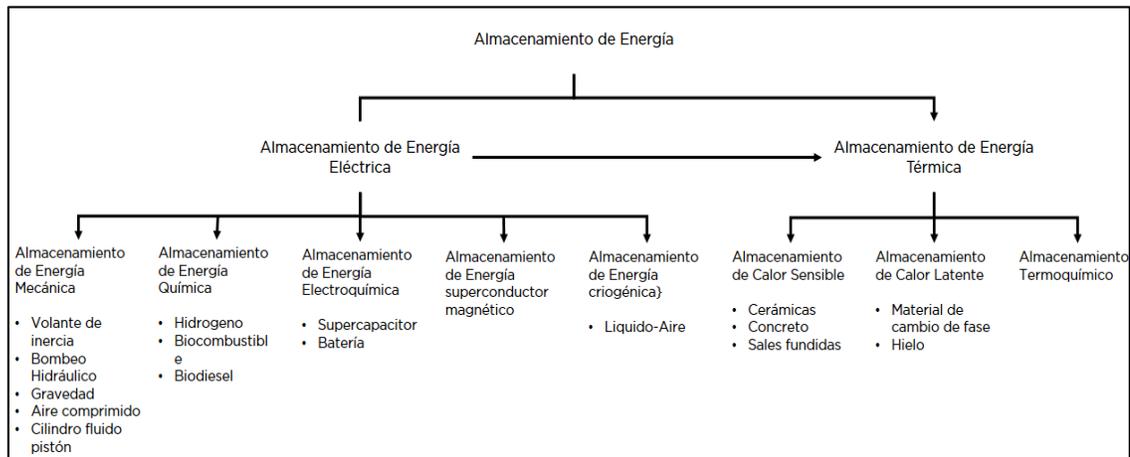


Fig. 3.1 Clasificación de las Tecnologías de almacenamiento de energía. Fuente: [21]

3.1.1. Almacenamiento de energía mecánica

Hay dos tipos básicos de almacenamiento de energía que resultan de la aplicación de fuerzas sobre los sistemas de materiales. Uno de estos implica cambios en la energía potencial, y el otro implica cambios en el movimiento de la masa, por lo tanto se habla de energía cinética. [17]

Tres tipos principales de tecnología representan a los sistemas mecánicos de almacenamiento de energía. [1]:

1. Las centrales hidráulicas de bombeo almacenan energía potencial en una masa de agua situada a una cierta altitud, o lugar de almacenamiento, con respecto a otro lugar situado a menor altura. Este tipo de almacenamiento de energía se conoce con las siglas PHES (*pumped hydro energy storage* o simplemente PHS).
2. Las centrales de almacenamiento de energía por aire comprimido (aire sin costo a causa de su disponibilidad) almacenan la energía interna asociada al aumento de presión de un gas. Este tipo de almacenamiento de energía se conoce con las siglas CAES (*compressed air energy storage*).
3. En un volante de inercia, conocido internacionalmente como *flywheel*, se almacena energía cinética de rotación, que acumula una masa que gira sobre un eje (como si fuera una peonza).

3.1.1.1. Almacenamiento por Bombeo Hidráulico

El bombeo hidráulico conocido como (*PHS*) por sus siglas en inglés, es un sistema de almacenamiento muy desarrollado y utilizado para producción de energía a gran escala. Las centrales hidráulicas de bombeo o centrales hidroeléctricas reversibles tienen la capacidad de almacenar energía mediante el bombeo de agua, curso arriba, a una posición situada a mayor altura. [24]

El fundamento básico es el almacenamiento de la energía potencial del agua embalsada en una presa situada una cierta altura por encima de otra inferior. En espacios de tiempo de baja demanda y/o bajo precio de la electricidad, esta se utiliza para accionar bombas que impulsan el agua hacia el embalse superior. En intervalos de tiempo de elevada demanda de electricidad, el proceso se revierte, y el agua almacenada se libera pasando a través de turbinas para producir electricidad. [1]

Actualmente las centrales hidroeléctricas reversibles representan, con diferencia, la mayor capacidad de almacenamiento de energía en red, con más del 99% de la capacidad de almacenamiento a nivel mundial.

La eficiencia de energía de plantas con diseños antiguos puede estar por debajo del 60%, mientras que una planta hidroeléctrica reversible moderna puede alcanzar una eficiencia por encima del 80% para un ciclo almacenaje-producción de energía [1]

Funcionamiento

Una central hidráulica de bombeo suele estar equipada con bombas y generadores, conectando un embalse superior con otro inferior. Las bombas utilizan electricidad relativamente barata de la red durante horas de bajo consumo para desplazar el agua desde el embalse inferior al superior. En los intervalos de tiempo de elevada demanda de electricidad (horas pico), el agua se libera desde el embalse superior para generar electricidad a un precio más elevado. Actualmente la tendencia es utilizar turbinas reversibles, frecuentemente del tipo Francis, que puedan funcionar como bomba impulsando el agua al embalse superior y como turbina, generando electricidad. [1]

El almacenamiento hidráulico bombeado generalmente comprende las siguientes partes: un depósito superior, canales, una bomba, una turbina, un motor, un generador y un depósito inferior, se muestra esquemáticamente en la Fig. 3.2 [19].

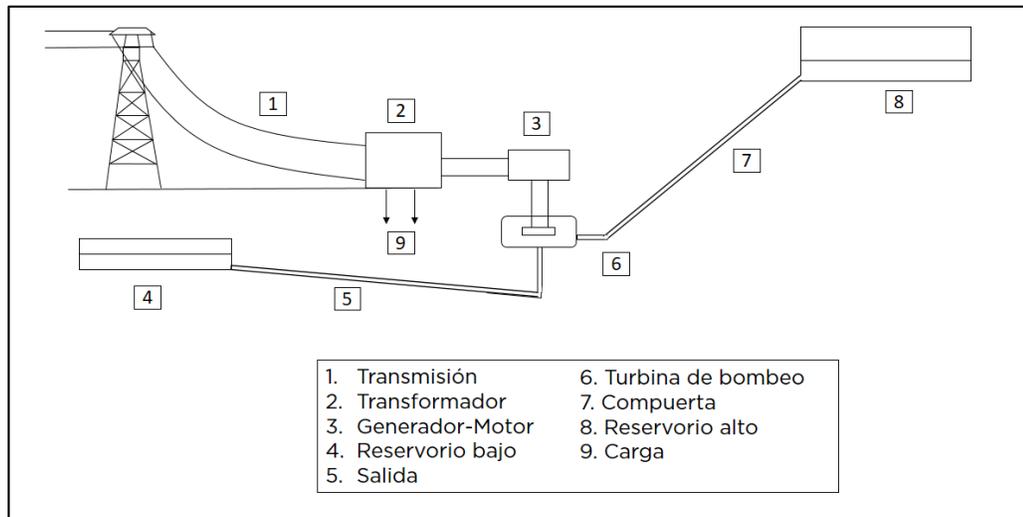


Fig. 3.2 Almacenamiento de energía por bombeo hidráulico. Fuente: [19]

Consideraciones ambientales

Cualquier proyecto de desarrollo basado en energía hidroeléctrica involucrará consideraciones ambientales. Algunas de ellas son las siguientes: [1]

- Es importante preservar ambientes acuáticos saludables.
- Maximizar la cabeza de fuerza para reducir la necesidad de agua.
- Construir instalaciones PHES fuera de la línea de los cauces para evitar represar los ríos que corren sobre ellos.

Las consideraciones ambientales deben ser evaluadas caso por caso, pero deben ser vistas como desafíos solucionables que pueden proporcionar beneficios ambientales, si se trata de un proceso de planificación por parte de las partes interesadas. [23]

Campos de aplicación

Esta tecnología ayuda, actualmente a las compañías eléctricas a balancear la red eléctrica y, gracias a su flexibilidad y tiempo de respuesta, permite también prestar servicios en el mercado auxiliar en el que la regulación de servicios suministrados por las plantas de bombeo es retribuida. Asimismo, esta tecnología permite obtener ingresos a partir del almacenamiento

de energías renovables que de otra manera podrían perderse. Estas opciones facilitan hoy en día a las compañías eléctricas incrementar el portafolio de energías renovables.

Las centrales hidráulicas de bombeo representan actualmente la solución comercialmente viable y demostrada para el almacenamiento de grandes cantidades de energía con la finalidad de mantener un equilibrio en la red eléctrica y prevenir apagones eléctricos. Actualmente solo el almacenamiento de energía por aire comprimido, es capaz de almacenar también energía a gran escala. Su tiempo de reacción es de solo 15 segundos para pasar del 50% de generación al 100%, aunque precisa unos dos minutos para pasar de 0% al 100% de generación. Por el contrario, la completa inversión del ciclo, del 100% de generación al 100% de bombeo, precisa de unos 10 minutos. Las plantas de bombeo modernas, con maquinaria de velocidad variable, permiten una regulación de la potencia producida, del 50% al 100%. Esto es de gran utilidad para aquellos servicios necesarios para mantener bajo control la transmisión de la potencia eléctrica. Los diferentes aspectos a considerar son: [1]

- El control de la programación y disponibilidad inmediata llevada a cabo por el operador del sistema de transmisión.
- El control de las caídas de voltaje y la reducción de las distorsiones armónicas.
- El control de la compensación de pérdidas.
- Los seguimientos de carga.
- Las tareas de protección o de balance energético de la red.

Este tipo de plantas son ya utilizadas para la regulación primaria y secundaria de la red. Ello constituye una clara alternativa para las compañías eléctricas, para operar óptimamente otras fuentes energéticas, las renovables o las basadas en fuentes fósiles, en sus niveles de máxima eficiencia. Estas características hacen que las centrales de bombeo sean una magnífica herramienta para balancear la red durante las salidas imprevistas de otras plantas de potencia.

El rango de potencia media de las diversas centrales de bombeo está entre 50 y 500 MW, con una zona media típica de entre 200 y 350 MW y con un rango medio de capacidad de almacenamiento de unas 8 horas. La distribución media de desniveles de las centrales de bombeo se centra en el rango de 100 a 600 metros, aunque con ciertos retos se pueden lograr

modificaciones de la presente tecnología que posibilitan también menores desniveles, unas pocas decenas de metros, así como mucho mayores desniveles, difíciles de obtener por ubicación geográfica. [1]

Ventajas e inconvenientes

La principal ventaja de esta tecnología es su madurez. Prácticamente más del 99% de la energía almacenada hoy lo es en base a esta tecnología, y ello está permitiendo a las compañías eléctricas y a los entes gestores de redes eléctricas abordar la calidad de red y la introducción de nuevas fuentes de energía. Asimismo, ofrece interesantes perspectivas para la estandarización de sistemas híbridos combinando centrales de bombeo con plantas de energías eólica y fotovoltaica. También permite utilizar sistemas hidráulicos ya existentes, presenta un alto grado de aceptación social, a diferencia de otras tecnologías mucho menos conocidas y extendidas. A pesar de su alto nivel de inversión inicial, su larga vida útil permite estimar unos muy bajos costos por kWh generado. [1]

Sus inconvenientes se encuentran en:

- Las restricciones impuestas por las limitaciones geográficas, ya que se necesitan terrenos adecuados, con una diferencia de altura significativa entre los dos embalses y con capacidad para almacenar una gran cantidad de agua.
- Las limitaciones impuestas por las actuales turbinas reversibles, que no satisfacen todos los requerimientos de estabilidad en la zona de operación entre los dos modos, así como por la falta de flexibilidad en las condiciones de trabajo de las mismas. Actualmente, no permiten bajos regímenes de funcionamiento debido a su alta sensibilidad al nivel hidráulico.
- Las limitaciones impuestas por los tiempos de arranque y de transición entre regímenes de funcionamiento.
- Al igual que ocurre con otras tecnologías de almacenamiento, no hay todavía desarrollados ni modelos de negocio ni normas de regulación para simulaciones a diferentes plazos temporales ni a diferentes escenarios.
- El impacto ambiental es otra de las preocupaciones que condicionan los diferentes proyectos.

3.1.1.2. Almacenamiento por aire comprimido

El almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES) es una tecnología de bajo costo para almacenar grandes cantidades de energía eléctrica en forma de aire a alta presión. Es una de las pocas tecnologías de almacenamiento de energía adecuada para una larga duración (decenas de horas), y aplicaciones de gran escala de servicios (cientos a miles de megavatios) [23]

La tecnología de almacenamiento de energía por aire comprimido (*Compressed Air Energy Storage* o CAES) se basa en utilizar energía eléctrica generada a bajo costo para accionar un compresor. En su forma más simple, el aire comprimido se enfría y se retiene en cavernas o lugares geológicos apropiados o en depósitos terrestres o en recipientes submarinos. En momentos de alta demanda de electricidad, se aporta un suministro de calor al aire comprimido mientras se lo deja expandir a través de turbinas. La energía transferida a las turbinas se convierte en electricidad mediante el uso de generadores eléctricos. En otras palabras, la energía eléctrica barata es transformada en energía potencial del aire presurizado y almacenado en esta forma. Además, como fase inicial a la expansión del aire, este necesita ser calentado para evitar la congelación en el sistema de expansión. Por tanto, en esta fase se podría reutilizar el calor previamente capturado, lo que constituiría un sistema adiabático, o alternativamente utilizar calor de otras fuentes, lo que definiría un sistema diabático. Éste último, el sistema diabático, es el implementado hasta el momento, con unas pocas plantas instaladas y en funcionamiento. Por supuesto, la variante adiabática es más prometedora, ya que ofrece una eficiencia energética mucho mayor. [1]

Funcionamiento

Plantas en régimen diabático (CAES diabático o convencional). Es el primer tipo de sistema que apareció, y el único actualmente desarrollado en instalaciones de gran tamaño (escala de MW). En intervalos de baja demanda de electricidad, esta se utiliza para accionar turbocompresores que comprimen aire que se almacena en galerías, típicamente cavernas de sal. Cuando existe demanda de energía, este aire comprimido se deja expandir accionando una turbina que genera electricidad. Para evitar la bajada de temperatura del aire durante su expansión, el aire se calienta mediante la combustión de gas natural. En esta tecnología se

comprime el aire a unos 60-70 bares antes de su almacenamiento. Esta impresión se alcanza mediante sucesivas etapas de compresión e intercambio de calor, para terminar el proceso con una temperatura final similar a la ambiental.

Este tipo de CAES presenta considerables ineficiencias debido a la pérdida de energía en forma de calor que tiene lugar después de comprimir el aire, que se enfría en la galería, y precisa de combustibles fósiles durante la expansión del gas. Este segundo hecho, además, hace del CAES diabático un sistema de almacenamiento de energía con una significativa huella de CO₂ [1].

Plantas en régimen adiabático (CAES adiabático)

Un sistema adiabático de almacenamiento de energía por aire comprimido (A-CAES) es en esencia muy parecido al sistema CAES convencional anteriormente detallado, pero con la incorporación de un material (suele ser un lecho de materiales cerámicos, aunque también se pueden emplear parafinas) que ofrece almacenamiento térmico. Así, el calor generado por la compresión del gas no se pierde, sino que se transfiere a dicho material. Este material, más tarde, cuando haya demanda de generación de electricidad, transferirá el calor al gas en expansión, evitando así la quema de combustibles fósiles y permitiendo una mayor eficiencia de energía en el proceso global. El almacenamiento del calor generado durante la compresión del gas para su posterior uso para calentarlo durante su expansión eleva la eficiencia de energía del proceso hasta valores en torno al 70%, por debajo de las eficiencias de los actuales PHS. Asimismo, el almacenamiento térmico también suprime la necesidad de quemar gas natural, eliminando así la huella de carbono del proceso.

Los materiales que se pueden utilizar para almacenar el calor son cerámicos, ya sean lechos de rocas o bien moldeados en forma de ladrillos a través de los cuales puede circular el aire intercambiando calor aunque también se menciona el uso de parafinas y sales fundidas. [1]

Plantas submarinas de energía (CAES submarino)

Esta variante de almacenamiento por aire comprimido contiene la particularidad de que los tanques que almacenan el aire comprimido se hallan sumergidos en agua, típicamente un mar, un río o un lago. La electricidad sobrante producida por aerogeneradores o bien de bajo

costo se hace llegar a plataformas submarinas, donde los compresores presurizan aire atmosférico a la presión existente en el lecho del mar, río o lago donde se encuentra dicha plataforma. Existen varios proyectos basados en esta tecnología, algunos de los cuales contarían con sistemas de almacenamiento térmico basados en soluciones acuosas que permitirían una eficiencia de energía de alrededor del 70%. El CAES submarino presenta ciertas ventajas respecto al CAES convencional:

- No cuenta con la gran limitación geológica impuesta por la existencia de cavernas.
- Diseño modular fácilmente escalable.
- Eficiencia entre un 10 y un 20% mayor que en el CAES convencional.
- Tiempo de arranque inferior al del CAES convencional y al del CAES adiabático (menos de 2 minutos).

La perspectiva más interesante que presenta el CAES submarino es una integración parcial de la energía eólica marina. Actualmente, la mayor parte de la electricidad generada a partir de energía eólica marina (como la eólica terrestre) no se almacena, lo que dificulta la gestión de la red eléctrica, dado el carácter fluctuante de esta fuente de energía. Una plena integración de la eólica marina con sistemas de almacenamiento no es viable económicamente, pues la capacidad de almacenamiento del sistema siempre limitaría la capacidad de generación de los aerogeneradores. Pero una integración parcial, donde una parte de la energía generada por los aerogeneradores es almacenada como CAES, valoriza altamente esta energía, que ya no es fluctuante. Esta opción también implica una reducción de costos muy importante en aplazamiento de ampliación de infraestructuras de transporte y distribución de electricidad [1]

Plantas isotérmicas (CAES isotérmico)

El almacenamiento de energía isotérmico por aire comprimido también pretende superar algunas de las limitaciones del CAES tradicional (diabático) y del CAES adiabático. El CAES isotérmico (ICAES) es una tecnología modular. Cada módulo está equipado con cigüeñales para la compresión y la expansión del gas. Los cigüeñales transforman el movimiento rotatorio de un generador en movimiento rectilíneo de un émbolo que comprime el gas. Para asegurar que

el proceso sea isotérmico se emplean intercambiadores de calor metálicos y agua como elemento de disipación o suministro del calor del proceso. El aire comprimido se almacena en compartimentos tubulares de acero.

En el CAES isotérmico se retira calor constantemente durante la compresión del gas, y se añade constantemente durante su expansión, con la finalidad de mantener un proceso isotérmico, y controlar así la curva de presión-volumen para que se asemeje a una isoterma, comportando así unas mínimas pérdidas de energía [1]

Campos de aplicación

El CAES es aconsejable como alternativa para un amplio rango de aplicaciones que van de gran a pequeña escala de almacenamiento. Probablemente, el sector de mercado más atractivo para esta tecnología está en las aplicaciones de eólica marina como elemento para obtener el balanceo de generación de potencia entre oferta y demanda, así como de sistema de restablecimiento del sistema.

El creciente número de plantas de gran escala de granjas eólicas marinas en el norte de Europa podría constituir su primer mercado. Sin embargo, CAES no es todavía económicamente viable si únicamente se basa en este mercado. Otros mercados deberían ser accesibles para asegurar los ingresos necesarios para justificar dicha industria. Por eso, CAES también se orienta a las redes de voltaje intermedio como soporte a la red de distribución [1]

Una de las principales aplicaciones de CAES es para el almacenamiento de energía eólica durante los tiempos de reducción de transmisión y generación en la red, durante deficiencias en la producción de viento. El equilibrio en sistemas de generación energética con base en el viento requiere un almacenamiento a gran escala y de larga duración. Además, CAES puede aumentar la producción rápidamente y operar de manera eficiente en condiciones de carga parcial, por lo que es adecuado para equilibrar las fluctuaciones en la producción de energía eólica. [23]

Ventajas y desventajas

A pesar de estar poco implementada, es una tecnología relativamente madura y simple en sus componentes y podría estar, a diferencia de otras tecnologías, de forma rápida en el mercado. Al mismo tiempo, ofrece variantes muy atractivas para consolidar sistemas con eficiencias de ciclo en el orden del 75% de acuerdo con las nuevas versiones de la tecnología, si bien los sistemas actuales solo presentan un escaso 50% en su ciclo AC-AC. Sin embargo, su principal activador, las granjas eólicas y fotovoltaicas ubicadas en lugares donde el almacenamiento de bombeo hidráulico no sería probablemente la primera opción, no tiene todavía los incentivos suficientes para incorporar el precio del almacenamiento en sus costos.

3.1.1.3. Almacenamiento por volante de inercia

El almacenamiento en forma de energía cinética en volantes se conoce desde hace siglos, y ahora se está considerado nuevamente para un campo de utilización mucho más amplio, que compite con productos electroquímicos baterías. [19]

Los volantes de inercia son dispositivos mecánicos que permiten el almacenamiento de energía cinética de rotación que es facilitada por un motor eléctrico, de la misma manera que se utiliza una cuerda enrollada a la peonza para comunicarle energía cinética rotacional. Estos dispositivos se caracterizan por su elevado momento de inercia, lo que les confiere una gran resistencia a los cambios de energía rotacional. Fundamentalmente, se puede considerar una batería mecánica que requiere para cargarse un aporte de energía que aumente su velocidad de rotación, función que realiza la máquina eléctrica conectada al volante de inercia cuando dicha máquina trabaja como motor eléctrico. Al igual que ocurre con la peonza, es esencial que las pérdidas por rozamiento estén minimizadas. Cuando ya está rotando, la cantidad de energía que almacena depende de su velocidad de rotación y de su momento de inercia. La energía almacenada se recupera desacelerando el volante de inercia mediante un par motor y devolviendo así la energía cinética a la máquina eléctrica a la que está conectado el volante de inercia. Esta máquina eléctrica deja su función de motor y pasa a ejercer las funciones de generador. Los volantes de inercia se caracterizan por ser una tecnología rápida de almacenamiento de energía. [1]

Funcionamiento

El volante de inercia es un dispositivo mecánico innovador que existe desde hace cientos de años como vector energético. Con los avances en tecnología de materiales, han ido apareciendo volantes de inercia más modernos que los iniciales, desarrollados en el siglo XIX después de la invención de la máquina de vapor. En aquellos tiempos, los volantes de inercia eran simplemente discos de acero. Finalmente, los inventores y diseñadores han desarrollado los *super flywheels*, por su nombre en inglés, dotados de una densidad de energía mucho mayor y con riesgos muy reducidos para la seguridad en caso de fallo del sistema [1]

El contenido de energía de un sistema mecánico rotativo está dado por:

$$E = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (9)$$

Dónde: I = Momento de inercia

ω = Velocidad angular

El momento de inercia está determinado por la masa y el tamaño del volante, y Se define como:

$$I = \int x^2 dm_x \quad (10)$$

Donde x es la distancia desde el eje de rotación a la masa diferencial dm_x . Esto nos deja considerar un volante de radio r en el que la masa se concentra en el borde. La solución de la integral será simple ya que $x = r =$ constante:

$$I = x^2 \int dm_x = mr^2 \quad (11)$$

Y

$$E = \frac{1}{2}r^2m\omega^2 \quad (12)$$

La última ecuación muestra que la energía almacenada depende de la masa total del volante a la primera potencia y la velocidad angular (el número de revoluciones por unidad de tiempo) a la segunda potencia. Esto significa que con el fin de obtener un elevado almacenamiento de energía, una alta velocidad angular es mucho más importante que la masa total del flywheel [19]

Con las ventajas obtenidas con los nuevos materiales es factible reducir pérdidas. Solo las pequeñas pérdidas del motor y los rozamientos producirán una leve disminución de la energía almacenada. Los volantes de inercia pueden ser divididos en dos grupos:

- Sistemas de rotor metálico convencional de baja velocidad (alrededor de 5.000 rpm). Se usan habitualmente para almacenamiento de energía de corta a media duración (de segundos a unos pocos minutos).
- Sistemas de composito metálico de alta velocidad (10.000-50.000 rpm). Gran parte de la I+D actual está enfocada hacia este tipo de sistemas, que pueden ofrecer potencias de entre 100 y 250 kW, con capacidades de almacenamiento de entre 3 y 25kWh. También se mencionan unidades capaces de operar en la escala de MW, pero están aún en fase de demostración.

El rotor de inercia es el componente central del sistema de almacenamiento basado en esta tecnología. Los volantes de inercia, también llamados rotores, pueden variar en forma, tamaño y composición de sus materiales. Un modo de caracterizar su forma depende de su geometría, y por tanto de su momento de inercia. En la mayor parte de volantes de inercia se requiere de una cobertura exterior para mantener el vacío y ofrecer una barrera protectora del contacto con el disco y también contra un posible fallo. [25]

Campos de aplicación

Entre las aplicaciones principales de los volantes de inercia se encuentran los sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI), de los que posee una cuota de mercado de más del 6%. Asimismo, esta tecnología también es muy importante en aplicaciones de estabilización de frecuencia de la red, para la cual la rápida velocidad de respuesta de los volantes de inercia

ofrece una gran fiabilidad. Su rápida respuesta permite asegurar el aporte en un breve intervalo de tiempo de grandes cantidades de energía, por lo que constituye un magnífico complemento para la regulación de frecuencia y voltaje en la red cuando hay fuentes renovables de generación de energía como las granjas de energía eólica y/o fotovoltaica o en redes inteligentes. También ha sido propuesto su uso en aplicaciones en el sector del transporte (trenes, transbordadores, autobuses eléctricos) o en sistemas, como ascensores y grúas, en los que es preciso un suministro de energía durante un breve intervalo de tiempo. Dada la limitación física de los rotores, no es posible acumular elevadas cantidades de energía por lo que en muchas de sus aplicaciones los volantes de inercia constituyen un complemento que se añade como prestación a las tecnologías más convencionales de almacenamiento, que aseguran un suministro más continuado de energía. De esta manera se puede asegurar una mejor vida media del sistema al evitar a las baterías, por ejemplo, picos de descarga energética [1]

Ventajas y desventajas

Los volantes de inercia presentan numerosas ventajas que hay que centrar y focalizar principalmente en sus características de potencia/energía: [25]

- No contienen sustancias tóxicas como las baterías.
- Elevada densidad de potencia y de energía.
- Muy rápida capacidad de respuesta.
- Poco mantenimiento y esperanza de vida de 20 años (más de 100.000 ciclos).
- Elevada eficiencia de energía (alrededor del 85%).

Una apreciación más optimista permitiría afirmar que estos sistemas podrían alcanzar eficiencias en torno al 99%. Sin embargo, en los ejemplos reales se encuentran en torno al 85%. Aparte de las ventajas mencionadas, los volantes de inercia pueden ser construidos en una gran variedad de formas y tamaños, desde unos pocos kilogramos hasta varios centenares de toneladas, lo que los hace viables para una larga lista de aplicaciones.

Los volantes de inercia también presentan desventajas, destacando entre ellas: [1]

- Elevado costo inicial del dispositivo, de 3.000 €/kWh. En los próximos años será preciso hacer decrecer al menos un factor 4 ó 6 para asegurar su penetración en el mercado energético como elemento complementario al almacenamiento a gran escala.
- Utilización de equipamiento pesado para asegurar su correcto funcionamiento.

En general, los volantes de inercia tienen un costo inicial mucho mayor que las baterías, pero requieren menos mantenimiento y presentan una mayor durabilidad.

3.1.2. Almacenamiento de energía química

El almacenamiento de energía química envuelve todas las tecnologías donde la energía eléctrica se utiliza para producir compuestos químicos que se puede almacenar y usar cuando sea necesario para la generación de energía. Más compuestos químicos que se utilizan como medios de almacenamiento de energía tiene una densidad de energía más alta que la hidroeléctrica bombeada y CAES y esto los convierte en un medio ideal de almacenamiento de energía. Hay varios compuestos químicos que actualmente se consideran para aplicación de almacenamiento de energía. Incluyen: hidrógeno, metano, hidrocarburos, metanol, butanol y etanol. Butanol y etanol se producen principalmente a través de la fermentación de biomasa y por lo tanto no se considera como una técnica de almacenamiento de energía eléctrica. Entre los compuestos que figuran en la lista restante, el hidrógeno se considera el más corto ruta al compuesto químico de la electricidad. El hidrógeno se produce a través de la electrólisis del agua y todos los demás compuestos (es decir, metano, hidrocarburos y metanol) se puede producir a partir de hidrógeno en presencia de una fuente de carbono como CO y CO₂ utilizando. [26]

Para la electricidad generada a través de los combustibles fósiles, no vale la pena almacenar la electricidad mediante la hidrogenación de CO₂ para producir hidrocarburos líquidos o metanol como esto puede conducir a demasiadas pérdidas. Por lo tanto, la conversión

del hidrógeno directamente a la electricidad debería ser la tecnología más prometedora. [21], [26]

La energía eléctrica puede ser transformada en energía química mediante procesos que dan como resultado moléculas químicas que contienen la energía eléctrica entregada y que pueden ser fácilmente transportadas. Por su parte, estos compuestos químicos abren diversas opciones para la recuperación de la energía contenida en ellos transformándola en energía eléctrica. Otra opción es su transformación en energía térmica. Este paso de electricidad a energía química, para generar de nuevo electricidad o bien calor, consta esencialmente de tres pasos fundamentales [1]:

1.-Disociación o reducción de moléculas: La base de estos procesos la constituyen el agua (H₂O) y el dióxido de carbono (CO₂), dos moléculas abundantes, baratas y disponibles. Estas moléculas se disocian o se reducen mediante el aporte de la energía eléctrica y se transforman en subproductos de alto valor añadido como vectores de energía: el hidrógeno (H₂) o diversas formas reducidas de las moléculas “C₁”, es decir, aquellas que contienen un solo átomo de carbono (monóxido de carbono CO, metano CH₄, ácido acético CH₃OH o ácido fórmico HCOOH): [1]



La primera de estas reacciones es conocida como electrólisis del agua (13), y su tecnología asociada (*equipos de electrólisis*) es bien conocida y utilizada. También puede ser obtenida mediante fotoelectrocatalisis, usando energía solar para disociar directamente la molécula de agua. [1]

La segunda de ellas es conocida como la reducción del CO₂. (14) La tecnología precisa para ello, vía energía eléctrica o electro reducción, es más novedosa y puede dar lugar a

diferentes subproductos, como metano o ácido fórmico. Asimismo, también puede ser logrado por vías fotocatalíticas. [1]

2.- Almacenamiento de la molécula química transportadora de la energía entregada:

Usualmente se trata de hidrógeno, aunque formas reducidas de CO₂, como metano o productos de valor añadido como metanol o ácido fórmico, son nuevas opciones. En el caso del hidrógeno, este puede ser almacenado en condiciones criogénicas en su forma líquida o en fase gaseosa a presiones de hasta 700 bares, o absorbido en materiales sólidos a bajas presiones. No obstante, su inyección directa en gasoductos, a presiones de 16 o 72 bares según la sección del mismo, una clara opción. Obviamente, en el caso de producir metano a partir de la reducción de CO₂, su almacenamiento en la red de gasoductos es la alternativa más eficiente. [1]

3.- Proceso final de conversión energética: Las especies químicas pueden ser utilizadas en diferentes maneras de recuperar la energía transportada por ellas. Así, a partir del hidrógeno los caminos de recuperación de la energía podrían ser: [1]

- a) Producir electricidad o energía térmica.
- b) Reaccionar con CO₂ capturado para producir metano sintético mediante un proceso catalítico, metanación, o combustibles líquidos mediante síntesis vía Fischer-Tropsch, o incluso reacciones con nitrógeno por proceso Haber-Bosch para producir amoníaco.
- c) Alternativamente, podría ser utilizado como fuente energética para la movilidad en sistemas basado en pilas de combustible.

3.1.2.1. Almacenamiento de energía por Hidrogeno

Una celda electrolítica corresponde al funcionamiento inverso de una pila de combustible o sistema de conversión de energía electroquímica a eléctrica con alimentación exterior de especies químicas para las semirreacciones redox. Consta de dos conductores llamados electrodos (cátodo y ánodo), cada uno de los cuales está sumergido en una solución electrolítica, y estos están separados por una membrana. Las semirreacciones de oxidación y reducción tienen lugar en la superficie de los electrodos, que pueden participar o no en las reacciones. Los que

no reaccionan se llaman electrodos inertes. El cátodo es el electrodo en el cual se produce la reducción de especies que ganan electrones.

La evolución del hidrógeno a partir de la reducción del agua o la formación de compuestos C₁ (es decir, aquellas moléculas que contienen un solo átomo de carbón) a partir de la reducción del CO₂, son ejemplos de procesos catódicos.

El ánodo se define como el electrodo en el cual se produce la oxidación, de especies que pierden electrones. En este electrodo se realiza la evolución del oxígeno. Para asegurar el paso de corriente por el interior de la celda entre el ánodo y el cátodo, asegurado por el movimiento de iones se necesitan electrolitos. Los iones son especies presentes en soluciones, generalmente acuosas, que conducen la corriente eléctrica. [1]

El hecho de que la corrosión en medio ácido sea más acusada que en medio alcalino ha motivado que la mayoría de los sistemas electrolíticos comerciales de producción de hidrógeno sean de tipo alcalino, dada la clara incidencia económica por los costos de amortización de los sistemas. Desde el punto de vista de la pureza, en un electrolizador alcalino se obtiene hidrógeno con una pureza del 99,8% de agua en volumen. El resto es oxígeno y vapor de agua.

Actualmente existen tres tipos de electrolizadores, con diferente grado de prestaciones y madurez comercial. Corresponden a diferentes etapas de la evolución tecnológica como respuesta a las demandas para almacenar energía eléctrica y en las que se cambia la naturaleza del electrolito de líquido a sólido: [1]

- **Electrolizadores alcalinos.** Trabajan a temperatura ambiente. Actualmente son los preferidos la producción de hidrógeno a gran escala. Se utiliza un electrolito líquido (normalmente una solución del 25% de hidróxido de potasio). Estos electrolizadores han llegado a alcanzar una eficiencia del 80%, aunque la media reportada en diversas plantas se sitúa en un 50-60%
- **Electrolizadores PEM.** Trabajan en el rango de temperatura ambiente hasta los 90 °C. Aquí, el electrolito es sólido y se denomina *Membrana de Intercambio Protónico (PEM)*. Los protones circulan a través de la membrana y los electrones van por el circuito

externo. El hidrógeno se produce en el cátodo. Son considerados como una opción más prometedora a largo plazo. Actualmente son ideales para aplicaciones a pequeña o media escala, tales como alimentación de coches o aplicaciones más pequeñas, en las que la unidad puede ser utilizada para producir hidrógeno a partir de una fuente de energía renovable como la solar. Se espera que la eficiencia de los electrolizadores PEM pueda llegar hasta el 94%. Tienen varias ventajas sobre los dispositivos de electrolizadores alcalinos clásicos. Estas ventajas incluyen una ausencia de electrolitos corrosivos, una buena estabilidad química y mecánica, una elevada conductividad protónica y una alta impermeabilidad al gas. Estos electrolizadores logran una excelente separación de gas para la producción de hidrógeno de alta calidad a alta densidad de corriente en una mayor eficiencia. El número reducido de piezas móviles en dispositivos electrolizadores PEM permite un mantenimiento más fácil.

- **Electrolizadores de alta temperatura.** Corresponden a pilas de combustible del tipo sales fundidas por sus siglas en inglés (MCFC) o de óxido de sodio (SOFC) trabajando de forma inversa. Su rango de trabajo se sitúa en el intervalo 600 - 1000 °C. Las MCFC utilizan como electrolito carbonatos fundidos, por lo que requieren un régimen de alta temperatura, mientras que SOFC utilizan la conductividad iónica de algunos óxidos, que solo es efectiva a altas temperaturas. A pesar de sus notables ventajas (incluyendo eficiencias en el rango del 90%, eléctrica y térmica), tienen problemas tecnológicos de durabilidad, debido al funcionamiento a altas temperaturas.

Una de las razones para aumentar la temperatura de trabajo es evitar el uso de catalizadores del grupo del platino. Los electrolizadores a baja temperatura precisan de electrodos con catalizadores de alta efectividad. Aunque se han empleado muchos esfuerzos para buscar catalizadores alternativos, hasta el momento no hay sustitución. Ello encarece los costos y plantea serios problemas sobre la escasez de algunos de los materiales utilizados, que impediría su comercialización global. Por el contrario, los sistemas que trabajan a altas temperaturas pueden funcionar con elementos más abundantes y económicos, como el níquel por ejemplo [1]

3.1.2.2 Almacenamiento de energía por Metano

Otra forma de introducir grandes volúmenes de gas en la red de gas convencional y, además, revalorizar el CO₂ consiste en la producción de metano. La formación de metano a partir de H₂ y CO₂ es conocida como el proceso de Sabatier (7) [26]



El proceso de Sabatier es una combinación de una reacción endotérmica water-gas shift invertida y una reacción exotérmica de metanación de CO. La combinación de las dos resulta en un proceso exotérmico. Esta exotermicidad implica que aproximadamente el 17% del poder calorífico de los reactivos es liberado en forma de calor.

Desde el punto de vista termodinámico, la metanación de CO₂ es un proceso muy favorable. Esto indica que el equilibrio químico está muy desplazado hacia productos y que una conversión casi completa de CO₂ a CH₄ es teóricamente posible. Termodinámicamente, el proceso de metanación está favorecido a baja temperatura y a alta presión. Sin embargo, la reducción de la temperatura disminuye la velocidad de la reacción. La metanación de H₂ y CO₂ es una tecnología en fase de desarrollo. Actualmente se están desarrollando dos tecnologías de metanación [26], [1]:

1. Química: La metanación química tiene lugar en un reactor tubular de lecho fijo, en un rango de temperaturas de 300-400 °C y presiones de hasta 20 bar. Los catalizadores activos en la metanación son del grupo VIII de metales, como también molibdeno y plata. Los catalizadores metálicos, ordenados por actividad catalítica, son: Ru > Ni > Co > Fe > Mo. No obstante, el metal más utilizado es el Ni, debido a su precio relativamente bajo y a su buena actividad.

2. Biológica: La metanación biológica es la formación de metano a partir del metabolismo de microorganismos metanógenos. La reacción de metanación biológica por reducción de CO₂ tiene lugar a baja temperatura (40-70 °C), baja presión y exclusivamente en medio acuoso. En

la metanación biológica participan tres fases distintas: sólido (microorganismos), líquido (medio de reacción) y gas (CO₂ y CH₄) [1]

Campos de aplicación

El almacenamiento de energía química tiene un enorme potencial debido a la elevada densidad energética de los vectores energéticos considerados (hidrógeno, metano) y a la oportunidad de utilizar para el almacenamiento de recursos ya existentes, como los geológicos o bien la propia capacidad de la red de transporte y distribución del gas natural. Esto permite utilizar los electrolizadores o los fotorreactores con distintas funcionalidades [1]:

- El arbitraje de la energía.
- Los servicios en la red eléctrica.
- El almacenamiento estacional.

Además, los electrolizadores son sistemas de respuesta muy rápida. Al aplicar un voltaje entre sus electrodos, la formación de gas empieza inmediatamente y el dispositivo sigue las fluctuaciones eléctricas en menos de un segundo. Por tanto, estos sistemas ofrecen características que los hacen adecuados para ofrecer diversos servicios en la red eléctrica, especialmente como reguladores de reservas provenientes de fuentes renovables. [1]

Ventajas y desventajas

Las ventajas presentadas por esta tecnología son [1]:

- Las tecnologías relacionadas con el concepto de “electricidad a gas” (*Power to Gas*) permiten la interconexión entre la red eléctrica y la red de transporte y distribución de gas natural.
- Estas tecnologías ofrecen costos por kWh muy competitivos para grandes y muy grandes capacidades de almacenamiento de energía. Ello es especialmente así cuando no es preciso construir instalaciones específicas de almacenaje porque se utiliza la propia red de transporte y distribución del gas natural, en lugar de utilizar cavernas, sitios geológicos o depósitos terrestres.

- Estas tecnologías permiten convertir energías renovables en hidrógeno, metano u otros combustibles o productos químicos con valor añadido, como metanol, etanol, fórmico, urea, dimetiléter o amoníaco, extendiendo el concepto de “electricidad a gas” a “energía a líquido”.
- Estas tecnologías están abiertas a la utilización directa de la energía solar para reducir complejidad y costos, convirtiendo directamente la energía solar en energía química (combustibles solares).
- Presenta un tiempo de respuesta muy rápido, que permite su integración directa en la red eléctrica para la gestión y control de la energía eléctrica.
- La capacidad energética es independiente de la potencia del sistema, que es altamente escalable y modular, permitiendo diferentes tamaños de sistemas hasta sistemas de almacenamiento estacionales (semanas, meses).
- Las eficiencias globales actuales superan las correspondientes a una planta térmica de carbón, existiendo todavía un largo recorrido para alcanzar valores todavía más competitivos.

Desventajas:

- El uso de catalizadores del grupo del platino en los sistemas a bajas temperaturas limita la reducción de costos, así como el volumen de producción de electrodos.
- El uso de sistemas trabajando a altas temperaturas implica un elevado estrés de los materiales que afecta a la vida útil de los dispositivos. Las instalaciones con hidrógeno requieren normas de seguridad y la obtención de la aceptación social.
- La eficiencia precisa ser optimizada tanto en su parte eléctrica como en su parte térmica.
- Los costos de los equipos del sistema deben ser reducidos para asegurar su competitividad.
- La introducción de estas tecnologías en aplicaciones en la red eléctrica requiere regulación.
- Los sistemas de reelectrificación, en caso de ser necesarios, precisan incrementar su eficiencia y disminuir sus costos

3.1.3. Almacenamiento de energía eléctrica

Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (SETS) se puede clasificar como electrostático, incluidos los capacitores, supercapacitores y sistemas de almacenamiento de energía magnética / corriente. Estos sistemas de almacenamiento suelen ser usados en algunas siguientes situaciones [21]:

- Los capacitores se pueden usar en el caso de altas corrientes, pero solo por períodos extremadamente cortos, debido a su relativamente bajo generación de capacitancia.
- El supercapacitor puede reemplazar un capacitor excepto que ofrece capacitancia muy alta en un paquete pequeño.
- Los sistemas de almacenamiento de energía magnética superconductores pueden preferirse en la salida de las plantas de energía para estabilizar la producción o en sitios industriales donde se pueden usar para acomodar picos en el consumo de energía (por ejemplo, plantas de acero o ferrocarril de tránsito rápido)

3.1.3.1. Capacitor

Los capacitores son el método más directo para almacenar electricidad. Un capacitor consta de dos placas de metal separadas por una no conductiva capa llamada dieléctrico. Como una placa está cargada con electricidad de una fuente de corriente continua, la otra placa habrá inducido en ella una carga del signo opuesto. Almacenan energía en las superficies de película de plástico o electrodos metálicos. Dado que la densidad de energía de los capacitores es muy baja, pueden entregar o aceptar altas corrientes, pero solo para períodos extremadamente cortos. [27]

3.1.3.2. Supercapacitor

Los capacitores electroquímicos de doble capa llenan el vacío entre capacitores clásicos utilizados en electrónica y baterías en general. Los supercapacitores usan una capa fina de electrolito y tienen estructura de carbón activado muy grande. Comparado con capacitores convencionales, las capacidades de almacenamiento de energía de los supercapacitores son

mayores. En lugar de la disposición más común de un dieléctrico sólido entre los electrodos, los supercapacitores almacenan energía por medio de una solución electrolítica entre dos conductores sólidos. Además, ellos puede proporcionar un alto rendimiento de potencia pico, también se pueden recargar y descargado hasta millones de veces sin daños (en contraste con las baterías) [27]

3.1.3.3. Superconducción electromagnética

Las unidades de almacenamiento de energía magnética por superconducción por sus siglas en inglés (SMES) almacenan energía de la misma forma que lo haría un inductor convencional. Ambos, almacenan energía en el campo magnético creado por las corrientes que fluyen a través de un alambre bobinado. La principal diferencia radica en que, en el SMES, una corriente directa fluye a través de un alambre superconductor; esto significa que el alambre se encuentra a temperaturas criogénicas y no muestra resistencia conductiva alguna. El hecho que no exista resistencia óhmica en el alambre implica que no hay disipación térmica, por consiguiente, la energía puede almacenarse en el SMES virtualmente por tiempo indefinido hasta que sea requerida. Dado que la energía es almacenada como corriente circulatoria, puede extraerse de las unidades SMES con una respuesta casi instantánea siendo entregada o almacenada en periodos que varían de fracciones de segundos a algunas horas. Una unidad típica de almacenamiento de energía por superconducción consta principalmente de: la bobina superconductora, el sistema de refrigeración y la interfaz eléctrica [28]

Los componentes de un sistema SMES se muestran esquemáticamente en la Fig. 3.3 El elemento principal del sistema es la bobina, las dimensiones de esta, están determinadas por la capacidad de almacenamiento de energía deseada y el diseño elegido. [16]

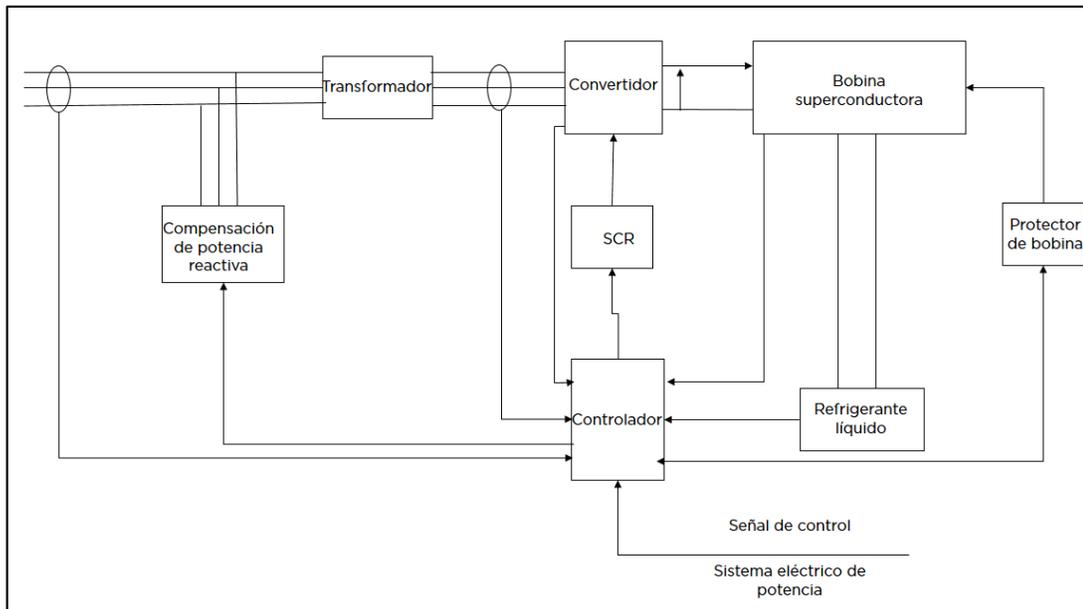


Fig. 3.3 Componentes de un sistema de almacenamiento de energía por superconducción magnética.

Fuente: [16]

Funcionamiento

Un sistema SMES consta de tres partes:

- Una bobina superconductora
- Un sistema de electrónica de potencia.
- Un sistema criogénico de refrigeración.

Campo de aplicación

El rápido tiempo de respuesta de los sistemas SMES los hace muy adecuados para cualquier tipo de servicio auxiliar, especialmente para asegurar la calidad en la red. Su aplicación más común es la mejora de la calidad de onda en las redes de distribución de electricidad, lo que en general significa la neutralización de las caídas súbitas de tensión y los microcortes. No obstante, a causa de su limitada capacidad energética, su aplicación más amplia es como componente en un sistema híbrido. En este caso, los sistemas SMES deben actuar complementariamente, como parte rápida, al otro u otros sistemas del sistema global, que

presentan un mayor tiempo de respuesta, pero con grandes capacidades de almacenamiento de energía [1]

Ventajas y desventajas

Entre sus ventajas cabe destacar que:

- La energía está disponible casi instantáneamente.
- Pueden suministrar un muy elevado valor de energía durante un breve período de tiempo.
- Prácticamente no hay retraso entre carga y descarga.
- Pueden satisfacer de forma inmediata la demanda solicitada por cualquier usuario.
- Presentan una eficiencia muy alta, superior al 95%.
- Carecen, a diferencia de su tecnología competidora (volantes de inercia), de partes móviles, lo que hace incrementar su fiabilidad y robustez, ofreciendo un alto nivel de ciclabilidad, superior a millones de ciclos.
- Son fácilmente integrables como parte de sistemas híbridos de almacenamiento.

Entre sus desventajas cabe indicar:

- La necesidad de disponer de un sistema criogénico
- La necesidad de disponer de sistemas modulares para favorecer la escalabilidad de los sistemas.
- Costos todavía elevados.
- Utilización de elementos críticos poco abundantes para las bobinas superconductoras.
- La dificultad de disponer de elementos superconductores en forma de cables robustos a causa de que muchos de los materiales superconductores

3.1.4. Almacenamiento de energía térmica

El objetivo de los sistemas térmicos (de aquí en adelante, TES, *Thermal Energy Storage*) es el almacenamiento y posterior utilización de la energía térmica generada a partir de cualquier fuente de energía directa o la producida como energía térmica residual que se genera durante

los procesos de generación eléctrica (cogeneración, microturbinas, pilas de combustibles, etc.), o en sistemas de transporte u otros equipos basados en combustión interna. El uso de estos sistemas TES ofrece características muy importantes para la gestión de las redes de transporte y distribución de energía [1]:

- Incremento de la eficiencia en muchos procesos al permitir la recuperación del calor residual.
- Absorción de los picos de consumo y disminución del dimensionado de los sistemas de generación.
- Reducción de las desviaciones temporales entre los perfiles de generación y de consumo.
- Se facilita la utilización de fuentes de energías renovables.
- En todos estos casos, se pretende incrementar la eficiencia de los sistemas de producción y consumo buscando la reducción del consumo de energía primaria.

Funcionamiento

La clasificación de los sistemas TES se puede realizar en base a tres criterios:

- Período de acumulación: Tiene en cuenta el período de tiempo de acumulación, que puede ir desde una acumulación a corto plazo (horaria, diaria) a una acumulación a largo plazo (mensual, anual).
- Temperatura acumulada: Se puede diferenciar entre acumulación de frío y acumulación de calor a baja, media y alta temperatura.
- Principio básico de acumulación: en el que se definen tres sistemas básicos: sensible, latente y termoquímica.

3.1.4.1. Almacenamiento por calor Sensible

La energía se puede agregar a un material simplemente calentándolo a una temperatura más alta. Esta energía que está involucrada en el cambio de la temperatura se llama "calor sensible" y su la cantidad es simplemente el producto del calor específico y el cambio de

temperatura. Este calor sensible se puede transferir a otro material más frío o al medio ambiente por radiación, convección o conducción. Por lo tanto, este es un método para almacenamiento de energía en forma de calor. Un simple ejemplo es el procedimiento tradicional de usar una roca caliente o una botella de agua caliente para precalentar una cama Antes de ir a dormir. [1]

Este tipo de almacenamiento de energía también se ha usado para controlar la temperatura en espacios de vida o trabajo. En algunos casos, la cantidad de material de almacenamiento necesario puede ser bastante grande, por lo que existe una preocupación obvia sobre su costo. [17]

La energía acumulada dependerá, pues, del tipo de material utilizado (y de su calor específico), de la cantidad de material almacenado (volumen de acumulación), de la temperatura de acumulación y del tipo y espesor de material aislante utilizado. La clasificación de los sistemas de acumulación sensible se puede hacer en función del tiempo de acumulación (corto o largo plazo) o en función del material de acumulación (sólido, líquido o gas), como muestra la figura 3.4

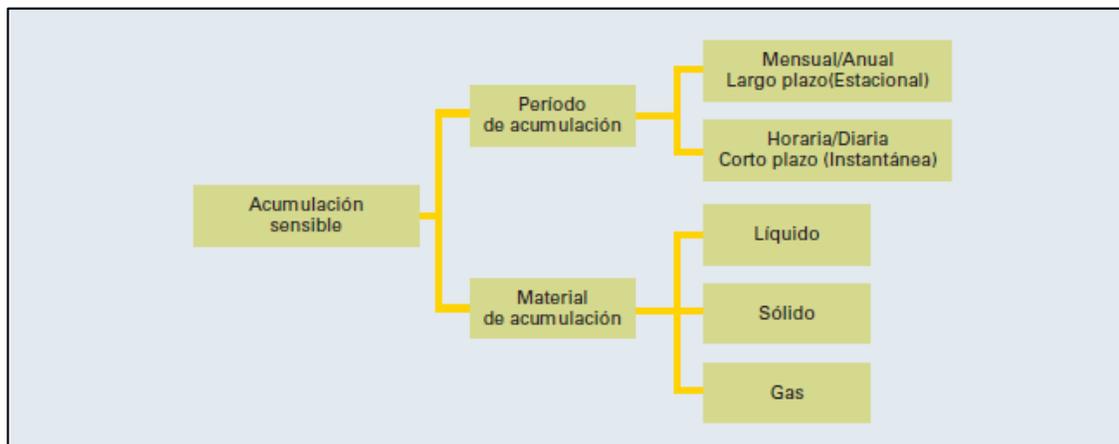


Fig. 3.4 Clasificación de los sistemas de acumulación sensible. Fuente: IREC retomado de [1]

3.1.4.2. Almacenamiento por calor latente

Los sistemas de acumulación latente se basan en la energía necesaria para producir un cambio de fase en un determinado material, el llamado calor latente. Este cambio de fase tiene lugar a una temperatura constante, que dependerá del tipo de material utilizado. [1]

La acumulación latente se define como la energía acumulada en un determinado material que se libera al sufrir un cambio de fase a una determinada temperatura. Actualmente se está trabajando en el desarrollo de nuevos materiales con distintas temperaturas de cambio de fase. La figura 3.5 muestra una clasificación general de los materiales de cambio de fase basándose en el origen de los materiales utilizados. [1]

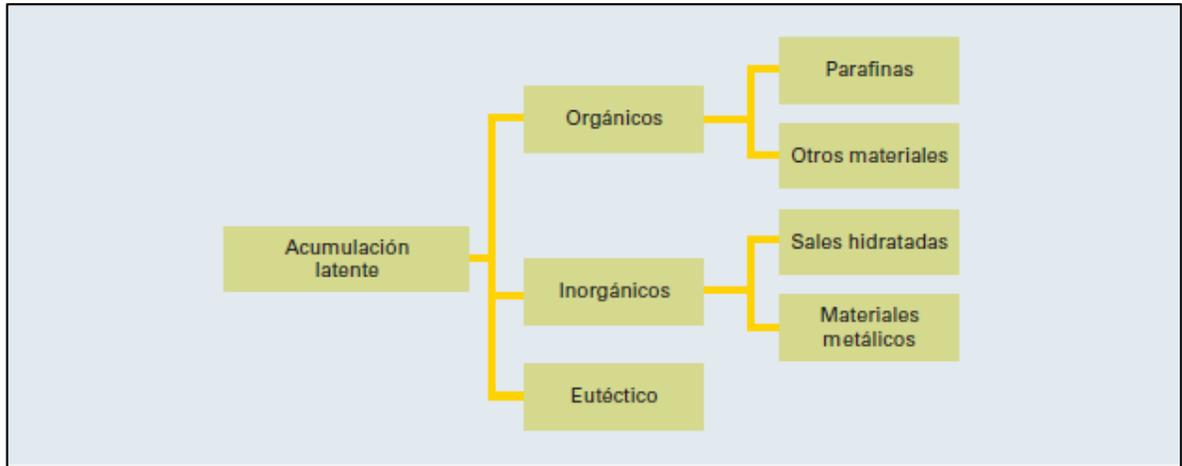


Fig. 3.5 Clasificación general de los principales materiales utilizados en sistemas de almacenamiento latente. Fuente IREC retomado de [1]

Las características de los principales grupos de materiales utilizados se resumen en:

- a. Cambio de fase: Actualmente, todos los materiales utilizados se basan en el calor latente del proceso de fusión/solidificación (sólido-líquido).
- b. Temperatura de cambio de fase: Podemos definir tres rangos de temperatura, para cada uno de los cuales se utiliza un tipo de PCM: Temperaturas de refrigeración; se utiliza hielo como PCM. Temperaturas de calefacción y producción de agua caliente sanitaria (ACS); básicamente se utilizan materiales orgánicos (parafinas, ácidos grasos) y algunas sales inorgánicas hidratadas. Altas temperaturas; superiores a los 100 °C y hasta los 400 °C, donde se utilizan básicamente materiales inorgánicos.

3.1.4.3. Almacenamiento Termoquímico

Muchos autores diferencian entre los sistemas de acumulación termoquímica y los sistemas basados en los procesos de adsorción y absorción. La diferencia consiste únicamente en que, en los procesos de adsorción y absorción, la reacción responsable de la generación de calor está vinculada directamente con la hidratación/ deshidratación de los materiales de acumulación utilizados. [1]

- 1. Acumulación termoquímica:** En las reacciones termoquímicas el calor se utiliza para provocar la descomposición de una sustancia en dos componentes que se pueden almacenar de forma separada. Se trata de una reacción reversible, puesto que mezclando los dos componentes y aplicando calor se volverá a generar la sustancia original. Se definen dos reacciones: reacciones de carga térmica del acumulador (reacciones endotérmicas) y reacciones de descarga térmica (reacciones exotérmicas)
- 2. Acumulación por adsorción:** Esta reacción se basa en la liberación de calor generada a partir del proceso de adhesión de agua (o vapor de agua) en la superficie de un material poroso. Los procesos de carga térmica de los acumuladores se basarán en la aplicación de calor liberando el agua acumulada en la superficie del material.
- 3. Acumulación por absorción:** Reacción basada en la adhesión de agua a la propia estructura del material absorbente, provocando cambios estructurales en dicho material (en algunos casos, hasta pueden implicar un cambio de fase de estos).

Campos de aplicación

Las aplicaciones más comunes en las que de forma habitual se utilizan los sistemas TES son la producción y acumulación de agua caliente sanitaria, los sistemas de climatización, los procesos industriales con demandas térmicas o producciones de energía térmica residual. También cabe resaltar el importante papel de estos sistemas TES en sistemas basados en fuentes de energía renovables, con unos períodos de generación de calor claramente definidos que no se acoplan a los momentos de consumo. Por último, y sobre todo vinculado a procesos

industriales, hay que destacar el uso de sistemas TES en centrales y sistemas de producción de electricidad, con generación simultánea de electricidad y calor (equipos de cogeneración, motores de combustión, turbinas, ORC). [27]

Ventajas y desventajas

La implementación de este tipo de sistemas de almacenamiento, plantea ciertas ventajas como se mencionan a continuación.

- La acumulación de calor procedente de sistemas de recuperación de energía térmica residual permite reducir el consumo de energía primaria en usos industriales, en edificios con elevados consumos térmicos o en centrales de generación eléctrica.
- Absorber los picos de consumo y disminuir el dimensionado de los sistemas de generación.
- Reducir desviaciones temporales entre los perfiles de generación y de consumo.
- Facilitar la utilización de fuentes de energías renovables.
- Optimizar los sistemas híbridos de generación con distintas fuentes de energía y calor residual, muy común en procesos industriales, redes de distribución de calor y/o sistemas de climatización de edificios.
- La acumulación termoquímica permite la acumulación a largo plazo con pérdidas muy reducidas.
- Capacidad para combinar sistemas de almacenamiento basados en calor sensible con bombas de calor, potenciando su uso en los sistemas de calefacción y refrigeración de edificios.
- Los sistemas de acumulación sensible, como los calentadores eléctricos o los acumuladores
- Esta interacción con las redes eléctricas influye sobre la gestión de los sistemas auxiliares, por lo que contribuye al arbitraje del mercado de la energía en base a la capacidad almacenada por ellos y puede actuar como “rápido” elemento para balancear la red eléctrica.

La integración de varios sistemas de generación en acumuladores domésticos presenta limitaciones importantes de gestión y rendimientos mejorables. [17].

- Los materiales PCM se encuentran en fase de desarrollo, con períodos de vida útil aún cortos.
- No existen muchas experiencias de incorporación de materiales PCM en elementos constructivos.
- Existe poca experiencia en la integración de sistemas de adsorción y absorción a fuentes renovables.
- La acumulación de calor termoquímica se encuentra en sus primeras fases de investigación.
- No existe regulación para el potencial mercado de la energía térmica almacenada.
- Reducido número de experiencias en el uso de acumulación estacional y los sistemas de gestión de carga y descarga.

3.2. Tecnologías de interés (Acumuladores)

Las baterías o acumuladores están basadas en la combinación de procesos de oxidación y de reducción. Un proceso de oxidación es el que tiene lugar sobre un componente que pierde o libera electrones en la reacción. Un proceso de reducción es la reacción en la que el componente gana o captura electrones. La oxidación tiene lugar en el ánodo, que es el electrodo que capta los electrones entregados por el compuesto, mientras que la reducción tiene lugar en el cátodo, que es el electrodo que suministra los electrones que se ganan por parte del compuesto. Para que el proceso sea sostenido y se mantenga de forma continua, es preciso asegurar la circulación de los electrones desde el lugar de oxidación al de reducción y evitar la acumulación de cargas eléctricas que bloquearían la reacción. Hay que contar con un colector de electrones que dé un camino de extracción de esta carga, los electrones, producida por la reacción química de oxidación. Esta vía, constituida por un circuito externo, termina en el cátodo, donde el flujo de electrones es utilizado para reducir el correspondiente componente químico. Esta parte cierra el circuito eléctrico exterior. Tal como se deduce de este comportamiento hay que distinguir dos

semirreacciones, una de oxidación y otra de reducción, que en su conjunto definen la reacción global. Para poder cerrar el circuito eléctrico global que nos asegure el paso de la corriente eléctrica, hay que mantener un medio apto para la circulación de los iones (o electrolito). Se trata de mantener un camino interno entre el ánodo y el cátodo para la circulación de los iones producidos. Este camino interno puede ser desde un simple medio ácido utilizado en la primera pila de Volta (fieltros empapados con un medio líquido ácido), hasta un electrolito líquido separado mediante una membrana en catolito y anolito. Puede ser también un medio alcalino. A su vez, estos medios pueden ser electrolitos líquidos o sólidos. Este proceso de reacción electroquímica se podrá mantener mientras existan las especies electroactivas que participan en la oxidación y la reducción o estas sean regeneradas desde el exterior. Para poder ser regeneradas de forma eficiente es preciso aportar la suficiente cantidad de energía externa: esta es la alternativa para sistemas recargables [1]

3.2.1. Terminología y fundamentos.

3.2.1.1 Capacidad

La capacidad de la batería o celda significa una integral de corriente durante un período de tiempo definido

$$Capacidad = \int_0^t i dt \quad (15)$$

Esta relación se aplica a carga o descarga; es decir, capacidad añadida o capacidad eliminada de una batería o celda. La capacidad de una batería o celda se mide en miliamperios-hora (mAh) o amperios-hora (Ah). Aunque la definición básica es simple, se usan muchas formas diferentes de capacidad en la industria de la batería. Las distinciones entre ellos reflejan diferencias en las condiciones bajo el cual se mide la capacidad [29].

3.2.1.2 Capacidad estándar

La capacidad estándar mide la capacidad total que una producción relativamente nueva pero estabilizada la pila o la batería pueden almacenarse y descargarse según un conjunto de aplicaciones estándar definidas condiciones. Supone que la celda o batería está completamente formada, que está cargada a temperatura estándar a la tasa de especificación, y que se descarga a la misma temperatura estándar a una velocidad de descarga estándar especificada a un final de descarga estándar voltaje (EODV). [29].

3.2.1.3 Capacidad real

Cuando las condiciones de la aplicación difieren de las estándar, la capacidad de la celda o batería cambia, el término capacidad real incluye todas las condiciones no estándar que alteran la cantidad de capacidad que la nueva batería o pila completamente cargada es capaz de entregar cuando está completamente descargado a un EODV estándar. Ejemplos de tales situaciones pueden incluir sometiendo la celda o la batería a una descarga en frío o una descarga de alta velocidad. [29]

3.2.1.4 Capacidad nominal

La capacidad nominal se define como la capacidad mínima esperada cuando una nueva, pero completamente formada, la célula se mide en condiciones estándar. Esta es la base para la tasa C (definido más adelante) y depende de las condiciones estándar usadas que pueden variar dependiendo en los fabricantes y los tipos de baterías. [29]

3.2.1.5 Capacidad retenida

Si una batería se almacena durante un período de tiempo después de una carga completa, parte de su carga se disipa. La capacidad que permanece que se puede descargar se llama capacidad retenida. [29]

3.2.1.6 Funcionamiento

Cada celda de una batería tiene los siguientes componentes:

- Dos parejas electroquímicamente activas:
- Una en el ánodo; es el par que participa en la semirreacción de oxidación.
- Otra en el cátodo; es la que participa en la semirreacción de reducción.
- Un electrolito, que es un medio aislante electrónicamente y conductor de iones y que puede ser sólido o líquido.
- Dos electrodos (ánodo y cátodo).
- Un separador o membrana para aislar los dos electrodos evitando el cortocircuito y permitiendo el paso de iones.
- Un contenedor que hace las veces de embalaje/cierre del sistema.

Con esta configuración, los electrones fluyen desde un electrodo al otro a través de un circuito externo, mientras que, al mismo tiempo, la electroneutralidad está asegurada por el transporte de iones a través del electrolito. Con base a ello, cuando una de las semirreacciones redox se termina por agotamiento del componente correspondiente, el flujo de electrones se detiene. En estos casos, si el proceso se puede invertir aplicando una corriente externa para promover los electrones de los estados de mínima energía a los de máxima, las baterías se pueden recargar y puede repetirse este ciclo.

En la en la figura 3.6 se presenta un ejemplo y el funcionamiento de la batería recargable. Durante la descarga se producen reacciones electroquímicas en los electrodos y la generación de flujo de electrones a través del circuito externo del ánodo. En la recarga un potencial externo es aplicado a través de electrodos, invirtiéndose las reacciones, tal como se indica en este esquema, durante el proceso de carga los electrones son extraídos del cátodo, oxidando las especies electroactivas de la zona del catolito. Estas son regeneradas de su estado reducido al oxidado perdiendo electrones y, a través del circuito exterior, el flujo de estos electrones es inyectado en el ánodo para reducir las especies electroactivas de la zona del anolito. Estas especies son regeneradas de su estado oxidado al reducido, ganando electrones. De esta forma, la celda electroquímica acumula energía eléctrica en forma de energía química, que posteriormente podrá suministrar como electricidad de forma progresiva.

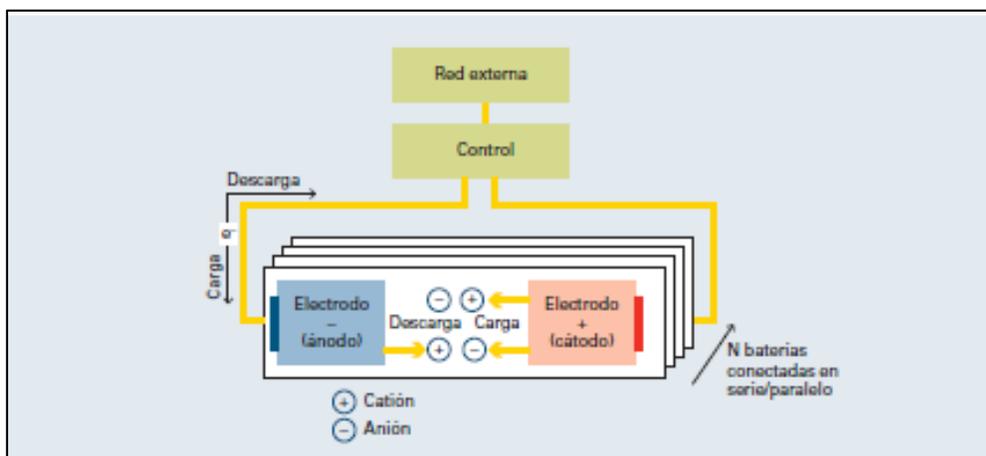


Fig. 3.6 Principio de trabajo de un dispositivo de almacenamiento de energía en batería. Fuente: [1]

3.2.2. Baterías primarias

Una batería primaria generalmente no es recargable. La mayoría de estas utilizan electrolitos, que están contenidos en material absorbente o separador. El tipo de electrolito como acuoso y no acuoso podría categorizar las baterías primarias. [27]

3.2.2.1 Baterías de Li/FeS₂ a temperatura ambiente

Un tipo batería de consumo que gradualmente se está volviendo más popular en un gran número de mercados es la celda Li/FeS₂. En este caso, el electrodo negativo es litio metálico. El electrolito es una sal de litio disuelta en un solvente orgánico similar a la utilizada en baterías de litio recargables.

El potencial del electrodo elemental de litio negativo es constante, pero el del electrodo positivo varía con el estado de carga. A muy bajo consumo de corriente, muestra dos mesetas de voltaje, a aproximadamente 1.7 V y 1.5 V frente a litio. A corrientes moderadas o mayores, la estructura de meseta desaparece y la salida el voltaje cae constantemente de aproximadamente 1.6 a 1.5 V con el estado de carga. Esto significa que la fase intermedia no se forma bajo esas condiciones.

El voltaje de este tipo de batería es aproximadamente 0.1 V más alto que el de células alcalinas comunes y hay menos desvanecimiento a medida que la célula se descarga. La principal ventaja de las baterías de Li / FeS₂ sobre las de Zn / MnO₂ es su capacidad para manejar corrientes más altas. Esta propiedad los hace especialmente útil para aplicaciones de pulso, como en cámaras. [17]

3.2.2.2 Baterías de óxido de vanadio Li/Ag

Otro tipo de batería primaria que ahora se usa para proporcionar energía para dispositivos médicos, como desfibriladores, es la célula de óxido de vanadio de litio / plata. Las características atractivas de esta química se reconocieron por primera vez en 1979.

El electrodo negativo en estas células es litio elemental, y el electrolito es la sal de litio LiBF₄ en un disolvente orgánico, carbonato de propileno. [17]

3.2.2.3 Baterías de Zn-Air

Las células primarias basadas en la reacción del zinc con el aire han estado disponibles comercialmente por más de 50 años con aplicaciones como audífonos y boyas de puerto.

El peso ligero y el contenido de alta energía en la tecnología de Zn-air han promovido la investigación sobre la química recargable de Zn-air por empresas como AER Energy Resources, EE. UU. Otra aplicación de esta tecnología es en sistemas de telecomunicaciones rurales con energía solar. La tecnología recargable de Zn-air es una tecnología de respiración de aire donde el oxígeno en el aire del ambiente se usa para convertir zinc en óxido de zinc en un proceso reversible.

El voltaje característico de los sistemas de zinc-aire es nominalmente alrededor de 1 V. Por ejemplo, durante la descarga, operarán dentro de un voltaje entre 1.2 y 0.75 V. La capacidad de corriente y potencia del sistema es proporcional al área de superficie de la aireación en el cátodo. Para obtener más corriente y potencia, se necesita una celda de área de superficie más grande. Para menos corriente y potencia, se puede usar una celda más pequeña. Comparado con

otras pilas químicas recargables Zn-Air necesita un administrador de aire para una entrada y salida de aire que permita el proceso químico. La batería produce electricidad cuando el electrodo de aire se descarga con la ayuda de catalizadores que producen iones de hidroxilo en el electrolito líquido, éste proceso se revierte cuando la batería se recarga y se libera oxígeno en el electrodo de aire.

El mayor desafío con el desarrollo de esta batería es la disminución de los impactos de CO₂ del aire en el electrolito y el cátodo, así como evitar la formación de dentritas de Zn [21]

3.2.3. Baterías secundarias

Las baterías electroquímicas recargables tienen una larga historia de aplicación en sistemas de poder. A principios de siglo, los motores diésel utilizados para la generación en pequeños sistemas locales de CC solía cerrarse por la noche y la demanda se cubrió con baterías de plomo-ácido que se habían cargado durante el día. El crecimiento de los grandes sistemas centralizados de energía de CA y la electricidad barata generada por carbón y petróleo relegaron las baterías al modo de auxiliares de CC para uso en emergencias. [19]

Las baterías secundarias se presentan en diferentes variedades dependiendo de su solicitud. Las baterías de tipo ciclo profundo son las más utilizadas para la aplicación del sistema de potencia y tienen un rango de eficiencia de 70- 80%. Hay diferentes tipos de baterías usadas para el almacenamiento de energía como lo son: batería de azufre sódico, Batería de cloruro de níquel de sodio, batería redox de vanadio, batería de cromo de hierro, batería de bromo de zinc, batería de aire/zinc, batería de plomo ácido, batería de iones de litio, batería de níquel cadmio, etc. [21]

3.2.3.1 Baterías secundarias con electrolito alcalino

Las baterías alcalinas son las más utilizadas después de las baterías de plomo-ácido. A diferencia de éstas, utilizan un medio alcalino para asegurar el camino interno para los iones

entre ánodo y cátodo. Hoy se utilizan mucho como elementos de almacenamiento en electrónica y sistemas portátiles. Esta tecnología tiene diferentes variantes:

- Níquel-cadmio: Ni-Cd
- Níquel-zinc: Ni-Zn.
- Níquel-hierro: Ni-Fe
- Níquel-Hidrogeno: Ni-H
- Níquel-hidruros metálicos: Ni-MH

Sus aplicaciones en el área de las redes eléctricas son incipientes. Mientras que para pequeñas celdas es una tecnología que ha madurado enormemente en las últimas décadas, para grandes instalaciones no cuenta con diseños apropiados y contrastados, y tampoco se cuenta con la confirmación del número de ciclos y, por lo tanto, de la viabilidad de sus costos.

Baterías Níquel-Hierro

Las baterías de níquel-hierro tuvieron en seguida un uso industrial como baterías de tracción en las carretillas elevadoras, las minas y las locomotoras de ferrocarril. El aspecto más apreciado de las baterías de níquel-hierro se encuentra en el hecho de que presentan entre 1,5 y 2 veces la energía específica de las baterías de plomo-ácido y son particularmente buenas en altas velocidades de descarga. Esta batería también se caracteriza por su robustez y largo ciclo de vida en caso de descarga (2.000 ciclos a 80% de profundidad de descarga). Sin embargo, comparada con la batería de plomo-ácido tiene las siguientes desventajas:

- Rendimiento inferior a bajas temperaturas.
- Corrosión y auto descarga relativamente elevadas.
- Rendimiento eléctrico global pobre debido a un bajo sobre potencial de evolución del hidrógeno en el electrodo de hierro, lo cual conduce a la necesidad de un mantenimiento frecuente.

Por estas razones, las aplicaciones para las baterías de níquel-hierro han sido limitadas.

[1]

Baterías de Níquel-Cadmio

Después de la batería de plomo-ácido, surgió la batería de níquel-cadmio, que se ha convertido en la batería recargable más ampliamente usada. El potencial nominal de celda (1,20 V) es ligeramente menor que el del níquel-hierro (1,25 V) y la masa de cadmio es mayor que la de hierro. Estos factores conducen a una energía específica de batería de 30-40 Wh/kg, la cual es del orden de las de níquel-hierro y plomo-ácido.

Las celdas y baterías están disponibles en muchos tamaños y con varias formas de electrodos (sinterizados, placas o plástico enlazado). La principal desventaja de las baterías de níquel-cadmio es su alto costo (hasta 10 veces mayor que las de plomo-ácido) y los problemas relacionados con el medio ambiente, ya que el cadmio y también el níquel son metales tóxicos.

Este tipo de baterías se puede encontrar en dos formas, según su aplicación o uso [1]:

- **Sellada para equipos portátiles.** Con una capacidad de amplio rango: desde 10 mAh a 15 Ah. El electrolito de KOH es absorbido por el separador, normalmente de materiales de celulosa, que permiten el paso libre de oxígeno liberado en la carga para pasar al electrodo negativo, donde es reducido. Estas celdas selladas son las análogas a las baterías de plomo-ácido reguladas con válvula para aliviar el exceso de presión.
- **Inundada para aplicaciones industriales.** Las baterías de níquel-cadmio tienen muy buenas características técnicas, pero no han tenido un gran éxito comercial, debido principalmente a sus costos. Sin embargo, la producción de estas baterías fue cada vez mayor, hasta que surgió un fuerte competidor (las baterías de Ni-MH) dentro del campo de las baterías alcalinas.

Estas baterías tienen como ventajas, una mayor densidad de energía y tasas de descarga, vida operativa y de almacenamiento prolongada, además este tipo de baterías son capaces de operar en un amplio rango de temperatura y en cualquier orientación con una capacidad de sobrecarga continua razonable.

En las baterías de NiCd, una reacción en el electrodo negativo consume el gas oxígeno que se genera en el electrodo positivo durante la sobrecarga. Las baterías de NiCd principalmente adoptan configuraciones de tipo cilíndrico o prismático. Debido al contenido de Cd que es considerada una sustancia peligrosa para el medio ambiente, su eliminación se ha convertido en un caso de controversia. [29]

Baterías de Níquel-Hidrogeno

La batería de hidrógeno-níquel consiste en un electrodo de óxido de níquel sinterizado como electrodo positivo y platino-hidrógeno como electrodo negativo. Esta batería fue desarrollada para remplazar a la batería de níquel-cadmio en algunas aplicaciones donde se requiere alta energía específica (de más de 50 Wh/kg) junto con una larga vida cuando se somete a un ciclo de descarga profunda.

El electrodo de Pt/H₂ es completamente reversible y, cuando se combina con óxido de níquel, forma una celda con un potencial de 1,25 V.

El gas hidrógeno liberado en el proceso de carga es almacenado bajo una presión de ~40 bar dentro de la misma celda. Este hecho ha requerido un considerable trabajo de desarrollo en el diseño y la construcción del recipiente y el *stack* de la celda. Cuando la celda es ciclada, la presión de hidrógeno va desde 40 bar hasta 2 bar en el estado de descarga. Por lo tanto, el recipiente a presión debe resistir este tratamiento sin fragmentarse, sin corroerse y sin que se formen grietas.

La celda se construye a partir de electrodos sinterizados de níquel, electroquímicamente impregnados, y electrodos estándares de celda de combustible de hidrógeno de platino negro dispersados en papel cartón. Los separadores están formados por una tela tejida a partir de un derivado de óxido de zirconio donde se absorbe el electrolito de KOH. Las celdas de níquel-hidrógeno pueden ser sobrecargadas, ya que en el electrodo negativo tiene lugar la recombinación de oxígeno liberado. Las celdas especiales de níquel-hidrógeno son económicamente costosas, pero sin embargo gracias a sus mejores prestaciones han tomado una gran parte del uso de baterías en satélites. [1]

Baterías de Níquel-Hidruros metálicos

La tecnología desarrollada con posterioridad a la de níquel-hidrógeno para aplicaciones terrestres es la de níquel-hidruro de metal. Estas baterías dependen de que el hidrógeno pueda ser almacenado reversiblemente en forma de un hidruro de metal, el cual se forma en el electrodo negativo de la celda. El electrodo positivo es un electrodo estándar de óxido de níquel. Los primeros trabajos (1970) utilizaban una aleación de LaNi_5 como electrodo negativo. Éste acepta el hidrógeno de forma reversible a temperatura ambiente para formar LaNi_5H_6 . Esta aleación se disocia a una temperatura de $15\text{ }^\circ\text{C}$ y una presión de 1 bar.

Actuales trabajos de desarrollos comerciales se han centrado en dos nuevas aleaciones para almacenar hidrógeno a nivel del electrodo:

- Una compleja aleación basada en tierras raras con varios aditivos para ajustar la presión de disociación al valor deseado y también para formar una película de óxido superficial, el cual actúa como una barrera para prevenir la oxidación del hidruro metálico. Esto corresponde a formulaciones de aleaciones de tipo AB_5 , donde A es una mezcla de tierras raras (lantano, cerio, neodimio, praseodimio) y B puede ser una mezcla de níquel, cobalto, manganeso y/o aluminio.
- Un complejo multicomponente similar de una aleación de tipo AB_2 , donde A es titanio y/o vanadio y B corresponde a zirconio o níquel modificado con cromo, cobalto, hierro y/o manganeso.

Ventajas y desventajas

Estas tecnologías se han beneficiado del creciente conocimiento de los mecanismos y procesos electroquímicos, lo que ha permitido un aumento de fiabilidad con una continua evolución de prestaciones, que han hecho ocupar a estas tecnologías (NiCd , NiZn , NiFe , NiHM , NiH_2) un segmento del mercado de baterías para sistemas portátiles, de movilidad eléctrica y satélites.

Potencialmente, las celdas basadas en estas tecnologías son candidatas a su implementación en grandes instalaciones, pero todavía plantean dudas y requieren verificaciones que confirmen su fiabilidad y sus largas vidas medias. Inicialmente, su primer inconveniente ha sido el uso de materiales como el cadmio, que complican su gestión medioambiental. Superado este punto con el uso de electrodos negativos diferentes, como los hidruros metálicos, se plantea la dificultad del rango de temperatura de trabajo.

Los hidruros no trabajan bien a bajas temperaturas y son aconsejables en rangos de 0 a 45°C. La mejora de las prestaciones de las celdas Ni-MH requiere nuevos materiales que faciliten la gestión del hidrógeno en la aleación o el compuesto metálico utilizado como electrodo. [1]

3.2.3.2 Baterías de Na-S

Es una de las baterías utilizadas para el almacenamiento comercial de energía eléctrica en la distribución de servicios eléctricos de soporte de red, integración de energía eólica y red de alto valor servicios. Su potencial proviene de su capacidad para proporcionar alta densidad de energía (151-170 kW h/m³), mejor eficiencia energética (> 85%), capacidad de ciclo largo (2500 ciclos con una profundidad de descarga del 90%) mayor capacidad de almacenamiento de energía y largo período de descarga (aproximadamente 6 h). Su capacidad de proporcionar respuesta rápida y precisa lo hace útil para aplicaciones en regulación de calidad de energía de la red. La batería NaS está hecha de azufre líquido (fundido) en el electrodo positivo y líquido (fundido) de sodio en el electrodo negativo. Los electrodos se separan con una cerámica de alúmina beta sólida como electrolito.

Las desventajas de la batería NaS son su alto costo de capital, alto requerimiento de temperatura operativa y alto riesgo operacional debido al uso de sodio metálico que es combustible si es expuesto al agua. [21]

3.2.3.3 Baterías de Cloruro de Níquel sódico

Al igual que NaS, estas baterías son dispositivos de alta temperatura. Operan a la normalidad rango de temperatura de 270-350 °C y se desarrollaron principalmente para aplicación en vehículos eléctricos (EV) y eléctrico híbrido vehículos (HEV). Durante la fase de carga, la sal de NaCl y Ni se transforman en NiCl₂ y Na fundido. Esta reacción química se invierte durante la fase de descarga [21]

La batería usa una pared de material cerámico como electrolito. Este electrolito ayuda a separar los electrodos. El electrolito conduce solo Na⁺ pero aísla electrones. Esto significa que la reacción solo puede continuar cuando hay un circuito que permite el flujo de electrones de igual cantidad que el Na⁺. El cátodo de NiCl₂ sólido poroso está impregnado con un conductor Na⁺ sal (NaAlCl₄) que proporciona una ruta conductiva entre el dentro de la pared del separador y la zona de reacción. [21]

3.2.3.4 Baterías de flujo redox

Batería de flujo redox de vanadio

La batería de reducción y oxidación (redox) (VRB) pertenece a un grupo de baterías conocidas como baterías de flujo. Este es el tipo de batería en cuál o ambos materiales activos están en la solución de electrolito en todos los tiempos. La operación de VRB se basa en la reacción redox de diferentes formas iónicas de vanadio.

Como una batería de flujo, su ventaja sobre los tipos de baterías convencionales es que es posible para diseñar el sistema con una aceptación de potencia óptima y propiedades de entrega sin necesidad de maximizar la densidad de energía. Esto es posible debido a la separación entre el poder y requerimiento de energía. Además, puede lograr estabilidad y rendimiento duradero ya que los electrodos no se someten a cambios químicos durante la operación. Para el caso de VRB, el V³⁺ se convierte en iones V²⁺ en el electrodo negativo durante la operación de carga. Al mismo tiempo en el electrodo positivo, los iones V⁴⁺ se convierten en iones V⁵⁺ a través de la liberación de electrones. Estas reacciones absorben la energía eléctrica y la convierten en energía química. Durante la fase de descarga, las reacciones son invertidas y conduce a la

liberación de la energía química almacenada a la energía eléctrica. VRB puede alcanzar una eficiencia de aproximadamente 85%. [21]

Sus ventajas incluyen: bajo costo de mantenimiento, tolerancia a sobrecarga y capacidad de carga profunda sin afectar la vida del ciclo. Por otro lado, la necesidad de bombas, sensores, la administración de energía y la contención secundaria los hace no apto para aplicaciones de almacenamiento de energía a pequeña escala [21]

Batería de flujo hierro-cromo

Esta es otro tipo de batería de flujo, pero a diferencia del VRB, su estructura de bajo costo lo hace atractivo para soluciones de almacenamiento de red, sin embargo, todavía existen grandes incertidumbres en su rendimiento y ciclo de vida. Utiliza reactivos líquidos en los que solo un pequeño volumen es eléctricamente activo y las celdas son hidráulicamente equilibradas. El volumen del reactivo permanece constante durante ciclo. [21]

Batería de flujo zinc-bromo

Batería de zinc bromo (ZnBr) también pertenece a la familia de baterías de flujo. Forma parte de dos superficies de electrodo y dos corrientes de flujo de electrolito separadas por una película microporosa. Los electrolitos son soluciones acuosas de zinc-bromo. El electrolito positivo se llama católito mientras que el negativo es el anólito. Durante la operación de carga, la electricidad máxima se introduce en el sistema que da como resultado la deposición de zinc en el electrodo negativo. Los iones de zinc y bromo migran al electrolito opuesto a través del separador microporoso para lograr la igualdad de carga. Los electrodos están compuestos de plástico bipolar de carbono debido a la naturaleza corrosiva del bromo. [21]

Batería de flujo polisulfuro-bromo

Los sistemas de polisulfuro-bromo, también llamados Regenesys, fueron patentados en 1983 y son una opción alternativa a las más extendidas baterías de vanadio. Están basados en la

reacción electroquímica de NaBr y polisulfuro de sodio. Los electrolitos están separados por una membrana polimérica, la cual solo permite el paso de iones sodio a través de ella. Durante el ciclo de carga, los iones bromuro son transformados en tribromuro en el electrodo positivo, mientras que, en el electrodo negativo, el tetrasulfuro (S_4) es reducido a disulfuro S_2 .

El ciclo de descarga consiste en el proceso inverso. Estos sistemas son interesantes debido a la abundancia del electrolito, los costos razonables y la alta solubilidad en medio acuoso. Tienen un potencial de circuito abierto de 1,5 V y una eficiencia de energía de 60-65% dependiendo de las condiciones de operación. Trabajan a temperaturas de 20-40 °C. [1]

Este sistema muestra las siguientes desventajas:

- Contaminación de ambos electrolitos a través de la membrana.
- Dificultad de mantener el balance del electrolito.
- Deposición de especies de azufre en la membrana.
- Hay que prevenir la formación de H_2S y Br_2 .

3.2.3.5 Batería de plomo-ácido

Las baterías de plomo-ácido son los sistemas de baterías recargables más antiguos y más utilizados hoy, principalmente debido al apego de la industria automotriz a la química de plomo-ácido. Básicamente, hay dos tipos de baterías de plomo-ácido, a saber, plomo-ácido inundado y plomo-ácido sellado. [29]

Su uso para aplicaciones comerciales es limitado debido al desarrollo de otras baterías de alta eficiencia y alta densidad de energía. PbO_2 todavía está siendo utilizado predominantemente en algunas aplicaciones debido a su bajo costo, confiabilidad, nivel de madurez en la tecnología, vida útil extendida y respuesta rápida, especialmente en sistemas de automóviles. Está compuesto de un electrodo positivo hecho de dióxido de plomo y un negativo electrodo hecho de plomo metálico con un electrolito hecho de ácido tetraoxosulfato. Tiene una tensión nominal de 2 V, densidad de energía de aproximadamente 30 Wh/kg y una densidad de potencia de alrededor de 150 W/kg. Su eficiencia energética oscila entre 85% y 90% con bajo mantenimiento, así como bajo costo de inversión. La tasa de auto descarga también es muy baja.

Otras variantes de la batería de plomo tradicional incluyen el plomo-ácido de carbono y el ácido de plomo avanzado. El primero involucra la incorporación de carbono en uno o ambos electrodos mientras

Funcionamiento

La celda está formada por un depósito o contenedor de una disolución de ácido sulfúrico y dentro de él, un conjunto de placas de plomo, paralela entre sí y dispuesta alternadamente en cuanto a su polaridad. Las placas positivas están recubiertas o impregnadas de dióxido de plomo (PbO_2), y las negativas están formadas por plomo esponjoso. Durante el proceso de carga inicial, el sulfato de plomo (II) es reducido a plomo metal en las placas negativas, mientras que en las positivas se forma óxido de plomo (IV) (PbO_2).

La reducción de los protones a hidrógeno elemental está cinéticamente impedida en una superficie de plomo, por lo que no se producirá liberación de hidrógeno excepto si se supera la tensión de carga recomendada. Entonces sí se liberaría hidrógeno, se consumiría agua del electrolito y se acortaría la vida de las placas, con el consiguiente peligro de explosión por la combustibilidad del hidrógeno. Este proceso es totalmente reversible, excepto si se forman cristales grandes de sulfato de plomo que impiden su total conversión, lo que se conoce como *proceso de sulfatación* de la celda, que conduce a la irreversibilidad de los procesos de carga/descarga de la celda. Estas celdas suelen combinarse para tener baterías con tensiones de 6 V, 12 V u otro múltiplo de 2, ya que la tensión que suministra cada celda es aproximadamente 2 V. Pueden suministrar unas intensidades de corriente relativamente grandes, lo que las hacen ideales para los motores de arranque.

Anteriormente se mencionaron los dos tipos principales de baterías de plomo-ácido:

Baterías inundadas, que es la tipología más común, y baterías reguladas con válvulas (VRLA), que son objeto de una extensa investigación y desarrollo:

- **Batería abierta, ventilada o inundada.** Las baterías abiertas o ventiladas son las más usadas. Tienen puntos de acceso a su interior con las siguientes finalidades: verificación del nivel y densidad específica del electrolito, reposición de agua y eliminación de gases producidos. Alternativamente, sus formulaciones pueden contener

algún aditivo para optimizar algunas de sus características. Las baterías abiertas, dependiendo del fabricante, pueden suministrarse en las siguientes condiciones: cargadas y llenas con electrolito o cargadas y secas (sin electrolito).

• **Batería sellada o regulada por válvula (VRLA).** El oxígeno que se produce en la placa positiva se recombina con el hidrógeno de la placa negativa. Esta “recombinación” produce agua (H₂O). En el caso de este tipo de batería, contiene unas válvulas sensibles a la presión, funcionando también con este principio de “recombinación”. Las baterías selladas ofrecen ventajas sobre las abiertas: la ausencia de fugas de electrolito, la mínima emisión de gases, la nula posibilidad de contaminación del electrolito y los bajos requerimientos de mantenimiento. Sin embargo, también presentan limitaciones: un menor número de ciclos, la imposibilidad de reponer el agua perdida por exceso de sobrecarga, la imposibilidad de verificar en forma confiable su estado de carga y, en algunos casos, su mayor sensibilidad a la temperatura de operación.

Las baterías de plomo-ácido se pueden clasificar según varios criterios:

- El tipo de placas: planas, tubulares o de Planté.
- El tipo de aleación: plomo-antimonio, plomo-calcio, plomo-selenio.
- El tipo de electrolito: líquido, gelificado o adsorbido.
- El tipo de mantenimiento: las baterías selladas no suelen tener mantenimiento, las baterías abiertas de plomo-calcio son clasificadas como de “libre mantenimiento” y las de plomo-selenio como de “bajo mantenimiento”, que retardan la evolución del hidrógeno y el oxígeno.
- El tipo de uso: baterías de arranque para motores, baterías de tracción (que suministran cantidades bajas de corriente en largos tiempos, por ejemplo, carros de golf), o para uso estacionario (por ejemplo, UPS o energías renovables)

Ventajas y desventajas

Sus principales ventajas son su madurez tecnológica y su modularidad, que permite diseños avanzados de sistemas a partir de la combinación de celdas y módulos más simples o en sistemas híbridos. Sus principales limitaciones son:

- Los largos tiempos de carga.
- La excesiva influencia de la temperatura ambiente.
- El mantenimiento excesivo.
- El bajo número de ciclos para sus aplicaciones en redes eléctricas: menos de 3.000 ciclos.
- La baja densidad energética y de potencia

3.2.3.6 Batería de ion-litio

Estas baterías usan litio compuesto de metal o litio como ánodo. Este tipo de batería es utilizado principalmente para dispositivos electrónicos y dispositivos médicos portátiles. Las baterías de ion Litio son más ligeras, más pequeñas y más potentes que otras baterías que lo hacen atractivo para la electrónica de consumo. [1]

El litio metal es el metal más ligero conocido ($P_m = 6,939 \text{ g/mol}$) y presenta un elevado potencial estándar de reducción ($-3,04 \text{ V}$). La combinación de estas dos características proporciona al elemento unas propiedades energéticas muy favorables, con una capacidad específica teórica de 3.860 Ah/kg (vs. $\text{Zn } 820 \text{ Ah/kg}$, $\text{Pb } 260 \text{ Ah/kg}$), muy óptima para ser utilizado como electrodo en baterías electroquímicas. Sin embargo, la reducción de ion litio a litio metálico suele originar crecimientos dendríticos capaces de causar cortocircuitos en la batería. Además, parte del litio que crece en las dendritas suele quedar aislado para reaccionar con el electrolito, por lo que es necesario añadir más cantidad de litio, con el consecuente descenso de densidad de energía. Para solucionar estos problemas, se han planteado dos estrategias [1]:

- ***Baterías con electrolito sólido.***

Estas baterías evitan el crecimiento de las dendritas, pero presentan bajas conductividades iónicas y abren un importante desafío para obtener mejores electrolitos sólidos.

- ***Baterías de ion-litio.***

Estas baterías, por su parte, eliminan un electrodo de litio metálico y lo sustituyen por un electrodo que intercale o inserte el litio en la propia red cristalina del material utilizado como electrodo. Así surgen las baterías de ion-litio, cuya tecnología ha avanzado enormemente desde los años ochenta y que suponen una revolución dentro del área de investigación, ya que se introducen nuevos conceptos de reacciones electroquímicas, como son las reacciones de *inserción* o *intercalación*. Actualmente, ion-litio es una de las tecnologías más prometedoras. [29]

Funcionamiento

La evolución de las baterías de ion-litio ha llevado a la coexistencia de diferentes materiales, tanto para cátodo como para ánodo y para electrolitos. Estos materiales definen diferentes variantes de la tecnología y compartimentan el mercado en base a sus prestaciones y a las patentes correspondientes. Su funcionamiento es esencialmente muy similar: se busca la máxima eficiencia en la intercalación/desintercalación del litio y se trata de minimizar la degradación causada u originada por estos procesos.

Los electrolitos son mezclas de diferentes carbonatos (DMC dimetil, EC etileno, EMC etil metil) con diferentes sales de litio (LiPF₆ hexafluorofosfato, LiBF₄ tetrafluoroborato, Li- BOB di-oxalato borato).

La figura 3.7 ilustra el sistema de batería básico de litio-ion. Las baterías de Li-ion se basan en una reacción electroquímica entre iones litio de intercalación y desintercalación entre las capas atómicas del material que constituye los electrodos cátodos (LCO) y ánodos (C).

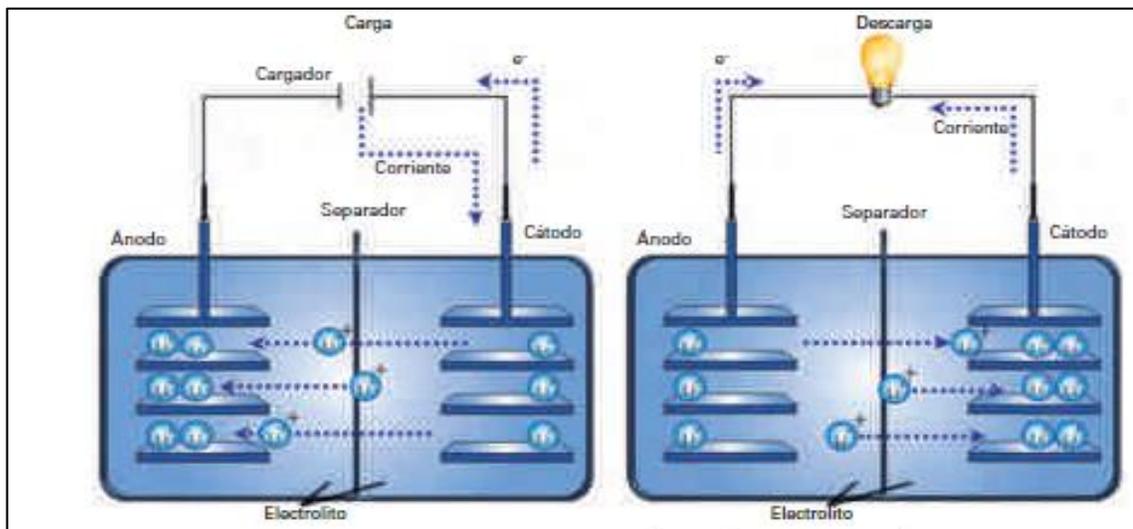


Fig. 3.7 Sistema de batería ion-litio. Fuente [21]

En el estado de carga completa, el litio se almacena, intercalado, en el material de ánodo (típicamente, grafito). Durante la descarga, el litio migra desde el ánodo a través del electrolito hacia el cátodo en forma de iones $+$. Al mismo tiempo, los electrones fluyen del ánodo transfiriéndose por un circuito externo y entrando en el cátodo. Durante el ciclo inicial de la batería, una capa delgada, conocida como interfase sólido de electrolito (SEI), se forma espontáneamente sobre la superficie de los electrodos como consecuencia de la descomposición del electrolito. Esta capa es generalmente aislante pero iónicamente conductora y se forma, en general, en el ánodo de grafito que opera a potenciales a los que el electrolito es termodinámicamente inestable (menos de 600 mV vs. Li / Li^+), creando una fase heterogénea compleja con muchas interfases secundarias. La composición, el comportamiento y las propiedades de la SEI varían con los diferentes sistemas de electrodo/electrolito y condiciones de operación, siendo actualmente el foco de numerosos estudios sobre la estructura interfacial y la dinámica electroquímica de transferencia de carga. [21]

Ventajas y desventajas

Su principal ventaja está relacionada con el fenómeno de la intercalación del litio, pero ello también es responsable de su paulatina degradación, al degradarse la estructura

crystalográfica de los electrodos a causa de la intercalación en sí misma y generando una creciente impedancia interna en la batería. Los atractivos de esta tecnología radican en: [21]

- La alta densidad energética.
- El reducido peso y el pequeño volumen.
- La alta eficiencia por ciclo: valores en el rango entre el 85 y el 98%, según la variante tecnológica.
- El bajo mantenimiento requerido.
- El bajo nivel de auto descarga: 0,1% por día.
- El alto voltaje de la reacción redox por celda.
- El hecho de que facilite alta potencia en cortos períodos de tiempo, así como más bajos niveles de potencia en más largos períodos de tiempo (horas), con tiempo de respuesta de segundos.

En cuanto a sus inconvenientes, cabe mencionar que estas baterías necesitan mantener un voltaje de seguridad y rangos de temperatura de operación debido a su compleja fragilidad interna, requiriendo circuitos de protección. Por otro lado, el uso de electrolitos orgánicos inflamables plantea cuestiones acerca de su seguridad. [1]

3.2.4.Nuevas líneas de investigación

Al considerar que cambios y nuevos desarrollos son posibles, o incluso probables, en los próximos años es lógico el pensar que la necesidad de almacenamiento crecerá sustancialmente. Esto no es solo debido al crecimiento natural de todas las tecnologías en las que el almacenamiento es un componente importante, sino también a cambios importantes en el paisaje de producción y utilización de energía.

3.2.4.1 Baterías con estructuras de electrodos que se mueven físicamente.

Un enfoque muy diferente al almacenamiento de energía reversible ha surgido en los últimos años que implica un tipo de batería de iones de litio que contiene un flujo mecánico

material semisólido que contiene finas partículas reactivas. Se puede considerar como un tipo de batería de flujo en el que los materiales reactivos son en realidad partículas finas suspendidas en un líquido viscoso. Este nuevo enfoque está siendo desarrollado por estudiantes y asociados del Prof. Yet-Ming Chiang en el MIT, y la comercialización está siendo desarrollada por la nueva empresa 24M Technologies. [17]

3.2.4.2 Materiales de electrodos orgánicos para baterías de Litio

Los enfoques actuales para las baterías de iones de litio implican el uso de aleaciones de metales y materiales inorgánicos como reactivos de electrodo. Existen varias investigaciones recientes sobre el potencial del uso de materiales para en esta aplicación. Un ejemplo reciente es el uso de materiales de policarbonato.

Una de las ventajas de estos materiales es que es posible sintonizar el potencial de reacción. Por otro lado, su solubilidad en electrolitos puede ser un problema. Sin embargo, se cree que esto se puede solucionar aumentando el peso molecular y la magnitud de la carga negativa. [17]

3.2.6.3 Electrolitos alternativos.

Existe un interés creciente en el uso de electrolitos acuosos en sistemas de litio, principalmente para la aplicación en sistemas grandes en los que el bajo costo, la tasa alta, y la seguridad son de particular interés. Nuevos electrolitos también están siendo investigados. Un grupo de estos electrolitos que está generando mucha atención incluye materiales llamados líquidos iónicos, son sales fundidas que tienen bajas temperaturas de fusión. Parece que algunos de estos materiales son estables en presencia de batería de litio componentes del electrodo. [20]

Capítulo IV Resultados y Conclusiones

4.1 Resultados

Derivado de la recopilación de información acerca de los SAE, se presenta un análisis de las diferentes tecnologías, tomando como base la Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4 que facilitan una visualización de las diferentes características técnicas, así como las ventajas y desventajas de cada uno de los SAE.

Tabla 1 Características técnicas de los sistemas de almacenamiento de energía

Tecnología de Almacenamiento	Densidad de Energía(Wh/kg)	Potencia Nominal (MW)	Capacidad de energía nominal (MW h)	Costo Capital (US\$/kWh)	Eficiencia (%)	Ciclo de vida (Años)(ciclos)	Tiempo de Descarga
Almacenamiento por Bombeo Hidráulico	0.5-1.5	100-5000	500-8000	8-100	70-80	30-50 años()	1-24 hr
Almacenamiento por aire comprimido	30-60	100-3000	580-2860	2-100	64	30 años	1-24 hr
Almacenamiento por volante de inercia	10-30	<1.65	0.0052	400-800	90	20 años	min
Almacenamiento por hidrogeno	50-300	0-58.8	0.312	15	25-58	5-20 años(1000-20000)	-
Almacenamiento por metano	-	0.001	-	-	<50	-	-
Capacitor	0.05-5	0-0.05	-	500-1000	60-65	5 años(750,000)	ms-60 min
Supercapacitor	0.05-5	0-0.03	0.0005	300-2000	90-95	20 años (>100,000)	ms-60 min
Superconductor Magnético	0.5-5	0.1-10	0.0008	1000-72000	95-98	20 años (>100,000)	-
Almacenamiento Térmico	80-200	0.1-300	-	3-30	50-90	10-20 años	-
Almacenamiento Termoquímico	-	0.01-10	-	-	50-100	10- 20 años	-

Las tablas se generan de los enfoques planteados en ésta investigación, tomando en cuenta que la Tabla 1 y Tabla 2 se refieren a los diferentes SAE que se consideran interrelacionados con las Energías Renovables. La Tabla 3 y Tabla 4 se basan específicamente a lo que previamente se denominó **Tecnologías de Interés** (acumuladores).

Tabla 2 Análisis comparativo de los sistemas de almacenamiento de energía

Tecnología de Almacenamiento	Ventajas	Desventajas	Impacto ambiental
Almacenamiento por Bombeo Hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Madurez tecnológica. ▪ Costos de operación y mantenimiento bajos. ▪ Larga vida útil. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Restricciones impuestas por limitaciones geográficas. ▪ Limitaciones impuestas por los tiempos de arranque y de transición entre regímenes de funcionamiento. ▪ Inversión inicial muy elevada. 	Alto
Almacenamiento por aire comprimido	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elevada densidad de potencia y energía. ▪ Rápida capacidad de respuesta. ▪ Poco mantenimiento y esperanza de vida de 20 años. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elevado costo. ▪ Utilización de equipamiento pesado. 	Mediano
Almacenamiento por volante de inercia	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gran capacidad de almacenamiento. ▪ Rápidamente implementable en el mercado. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bajo rendimiento adiabático. 	Bajo
Almacenamiento por hidrogeno	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Almacenamiento distribuido. ▪ Es factible darle otro uso al hidrógeno producido. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baja eficiencia. ▪ Altos costos de inversión. ▪ Electrónica de potencia y control. ▪ Necesidad de carga estable. 	nulo
Almacenamiento en baterías	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buen almacenamiento. ▪ Buena configurabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Altos costos de inversión. ▪ Ciclo de vida dependiente de la temperatura. 	Alto
Capacitor	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baja densidad de energía. 		Bajo
Supercapacitor	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta densidad de potencia. ▪ Tiempos de respuestas rápidos. ▪ Nulo mantenimiento. ▪ Un elevado número de ciclos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Densidad energética baja. ▪ Alto nivel de autodescarga. ▪ Fluctuaciones en los valores de voltaje de carga y descarga. 	Bajo

Superconductor magnético	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta capacidad de almacenamiento de energía magnética. ▪ Larga vida útil. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Necesidad de disponer un sistema criogénico. ▪ Costos elevados. 	Mediano
Almacenamiento térmico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Posibilidad de combinar sistemas de almacenamiento basados en calor sensible con bombas de calor. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costos de inversión altos difíciles de recuperar. ▪ Baja densidad energética. ▪ Gran pérdida de calor a lo largo del tiempo. 	Mediano
Almacenamiento termoquímico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta densidad de almacenamiento. ▪ Pérdidas de calor bajas (almacenamiento a temperatura ambiente). ▪ Largo periodo de almacenamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Altos costos de capital. ▪ Complejidades técnicas. 	-

Tabla 3 Características técnicas de almacenamiento de energía electroquímica (acumuladores)

Tecnología de almacenamiento	Densidad de energía (Wh/kg)	Costo capital (US\$/kWh)	Potencia nominal (MW)	Capacidad de energía nominal (MWh)	Eficiencia (%)	Tiempo de vida(años)	Ciclo de vida (ciclos)	Tiempo de descarga
Zn-aire	150-3000	10-60	0-0.1	-	50	5-10	2000	5-24hr
Ni-Cd	50-70	400-2400	0-40	6.75	70	10-20	2000-2500	1-8 min
Ni-H	50	--	-	-	-	-	-	--
Ni-Hidruros metálicos	60-80	-	-	-	70	--	-	hr
Na-S	150-240	500	0.5-34	0.4-244.8	95	10-15	2500	<8 hr
Cl-Ni-Na	100-120	100-2000	0-0.3	-	90	10-14	2500	seg-hr
VRB	10-30	150-1000	0.03-3	<60	85	5-10	12000	min-hr
Plomo-acido	30-50	50-310	0-40	0.001-40	80	5-15	500-1000	1-8 min
Ion-litio	75-200	2500	0-100	0.024	95	5-15	10000	min-hr
Fe-Cr	10-50	250	0.05-0.25	-	70-80	5-10	12000	seg-hr

Potencia Nominal y Capacidad de Energía Nominal

La figura 4.1 se muestra una distribución grafica de características técnicas como la potencia nominal (MW), la capacidad energética nominal (MWh) y el tiempo de descarga (segundos-meses). Cabe aclarar que este grafico retoma datos presentados en la Tabla 1 y

Tabla 3, con la finalidad de obtener un espectro general del posicionamiento de todos los SAE.

Tabla 4 Análisis comparativo de los sistemas de almacenamiento de energía electroquímica (acumuladores)

Tecnología de almacenamiento	Ventajas	Desventajas
Li-FeS₂	<ul style="list-style-type: none"> Manejan voltajes elevados y tiene bajo desgaste en sus electrodos. 	<ul style="list-style-type: none"> Elevado costo por sus componentes.
Zn-aire	<ul style="list-style-type: none"> Alto valor de energía específica. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta contaminación de su electrolito y no tiene reversibilidad.
Ni-Fe	<ul style="list-style-type: none"> Largos ciclos de vida. 	<ul style="list-style-type: none"> Rendimiento inferior a bajas temperaturas, presenta corrosión y autodescarga relativamente elevadas.
Ni-Cd	<ul style="list-style-type: none"> Tecnología madura, robustez, larga vida de ciclo, mejor rendimiento que plomo-ácido a pequeña escala. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta toxicidad del cadmio, elevado costo, efecto memoria.
Ni-H	-	<ul style="list-style-type: none"> Altos costos de inversión y es necesario mantener presiones elevadas para su funcionamiento.
Ni-Hidruros metálicos	<ul style="list-style-type: none"> Con mayor densidad de energía que Ni-Cd. 	<ul style="list-style-type: none"> Dependencia de metales de tierras raras, escalado limitado al orden de kW.
Na-S	<ul style="list-style-type: none"> Eficiencia de energía, pulsos de elevada potencia, rápida capacidad de respuesta, alta densidad de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> Pérdidas por mantenimiento de la temperatura de la batería.
Cl-Ni-Na	<ul style="list-style-type: none"> Rápida capacidad de respuesta, robustez, buena densidad de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> Pérdidas por mantenimiento de la temperatura de la batería.
VRB	<ul style="list-style-type: none"> Amplia gama de aplicaciones 	<ul style="list-style-type: none"> Baja densidad energética.
Plomo-acido	<ul style="list-style-type: none"> Tecnología madura. 	<ul style="list-style-type: none"> Largos tiempos de carga, excesiva influencia de la temperatura ambiente, mantenimiento excesivo, baja densidad energética y de potencia, bajo número de ciclos.
Ion-litio	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia, alta densidad de energía, , altos tiempos de respuesta, baja velocidad de autodescarga, bajo mantenimiento, reducido peso y volumen. 	<ul style="list-style-type: none"> Costo elevado para aplicaciones de escala media y alta, mantener un voltaje de seguridad y rango de temperatura de operación.
Metal-aire	<ul style="list-style-type: none"> Gran potencial por su elevada densidad de energía, materiales abundantes y no tóxicos y bajo costo. 	<ul style="list-style-type: none"> En fase de desarrollo, problemas de ciclabilidad, baja eficiencia de energía.

Tabla 5 Implicaciones ambientales de sistemas de almacenamiento de energía electroquímica (acumuladores)

Tecnología de almacenamiento	Implicación ambiental.
Ni – MH	<ul style="list-style-type: none"> • Níquel tiene alto grado de toxicidad(extracción difícil / insostenible) • No es un elemento raro pero se encuentra limitado en la naturaleza • Reciclable
Pb-A	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclabilidad a alta temperatura limitada • El plomo es tóxico, pero el reciclaje es eficiente al 95%
Ion-Li	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos agotables (cobalto) en la mayoría de las aplicaciones; • Los reemplazos de manganeso y hierro son verdes (abundantes y sostenibles) • Química de litio relativamente verde pero puede ser mejorada • Reciclaje factible pero a un costo extra de energía
Sulfuro-magnesio	<ul style="list-style-type: none"> • El magnesio y el azufre son verdes. (abundantes y sostenibles) • Reciclable • Pequeña huella de carbono
Cl-Ni-Na	<ul style="list-style-type: none"> • Níquel tiene alto grado de toxicidad • Limitación del elemento Níquel
VRB	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo impacto ambiental
Zn-aire	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo impacto ambiental
Na-S	<ul style="list-style-type: none"> • Baja emisión de gases
Litio-organico	<ul style="list-style-type: none"> • Recargable • Poca huella de carbono • Electrodo renovables • Reciclaje fácil

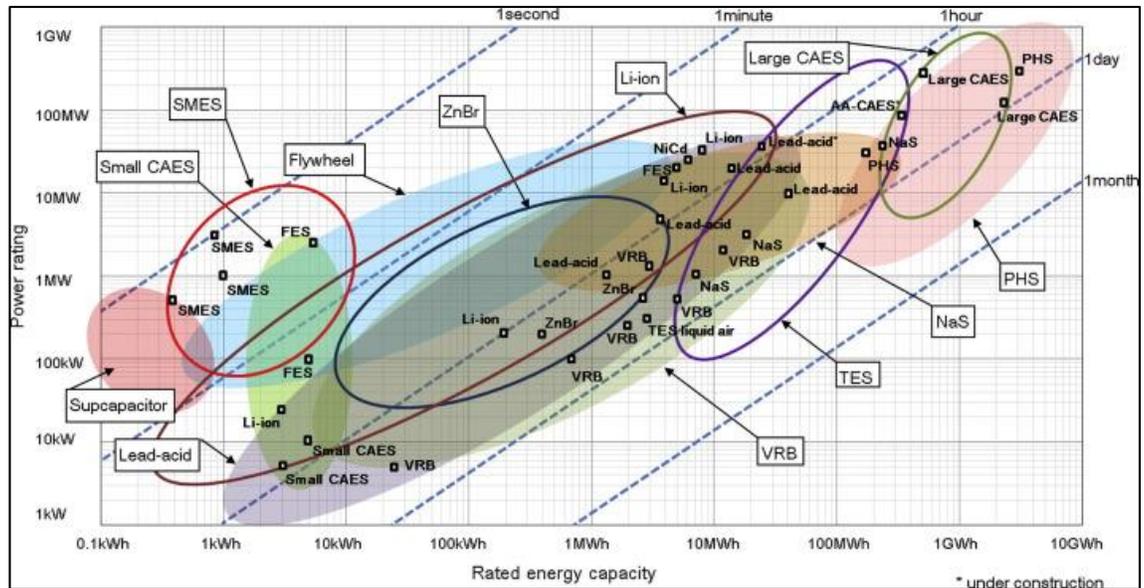


Fig. 4.1 Comparación de la potencia nominal y la capacidad de energía nominal con la duración del tiempo de descarga. Fuente [30]

La grafica presentada en la Fig 4.1 nos permite observar una relación de magnitud respecto a la potencia nominal y la capacidad de energía nominal de los sistemas de almacenamiento, y además se agrega la característica técnica del tiempo de descarga, permitiendo relacionar las diferentes tecnologías en un solo gráfico. Se aprecia que las tecnologías de mayor capacidad tanto de energía como de poder cuentan con tiempos de descarga relativamente largos, tal es el caso de los PHS, así como de los de Aire comprimido, en la parte central se ubican las tecnologías con tiempos medios de descarga, en el orden de minutos-horas y de igual manera las tecnologías que se consideran de almacenamiento de media escala. En la sección inferior izquierda de la gráfica, se ubican las tecnologías con cortos tiempos de descarga y baja capacidad tanto de energía como de potencia, como es el caso de los supercapacitores y capacitores.

Tiempo de descarga

Dentro del análisis de la Fig. 4.1 previamente mencionada es visible una clasificación en función de su tiempo descarga:

- Tiempos de descarga menores de 1 hora: Volante de inercia, Superconductores Magnéticos, supercapacitores.
- Tiempos de descarga >1 hr < 10 hrs: Baterías
- Tiempos de descarga >10 hrs: Sistemas de Aire Comprimido, PHS, Sistemas de Almacenamiento Térmico.

Respecto a las Tecnologías de interés las baterías de Zn-Aire y Na-S destacan sobre todas las demás con tiempos de descarga dentro del rango de horas (5-24 hrs). Para el resto de los acumuladores los tiempos de descarga se consideran generales en un rango de (minutos-horas).

Eficiencia

Tomando los datos de las eficiencias presentes en las tablas, se muestra en la figura 4.2 una gráfica descriptiva del posicionamiento de esta característica técnica, se engloban eficiencias tanto de los SAE como de las tecnologías de interés, uniendo datos de las tablas 1 y 3.

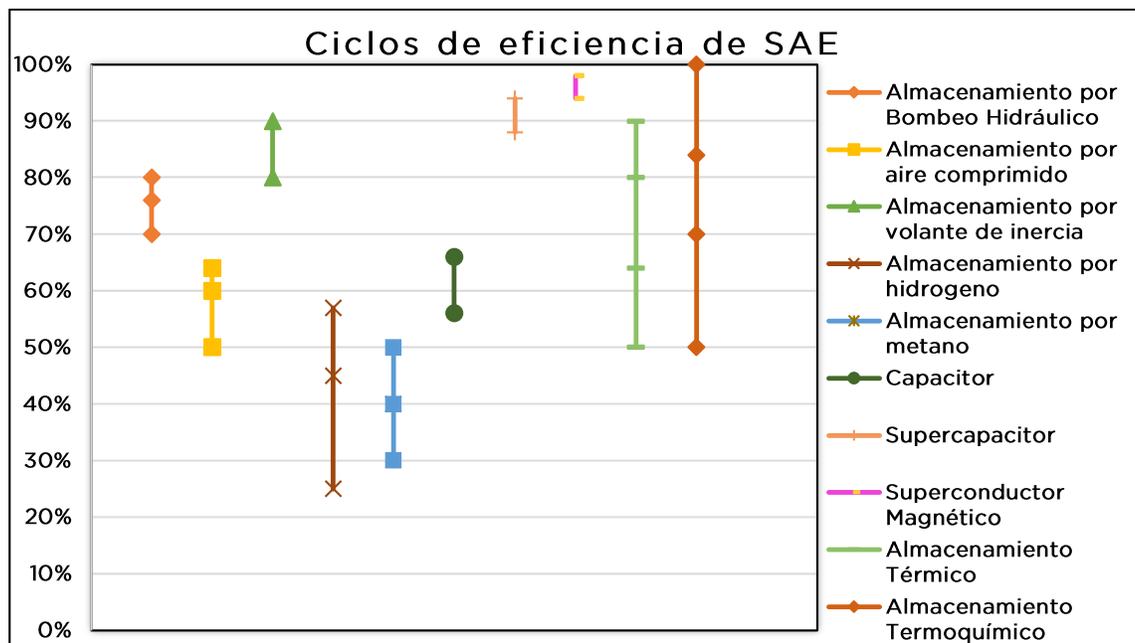


Fig 4.2 Comparación de la eficiencia de los Sistemas de Almacenamiento de Energía. Fuente:

Retomado de [30]

De manera general los sistemas como el volante de inercia, los supercapacitores y superconductores magnéticos, están un paso arriba de las demás tecnologías, con eficiencias por encima del 95 %, los sistemas como el Bombeo Hidráulico, Aire comprimido y la mayoría de las baterías se encuentran en un valor de eficiencia promedio entre el 50 y 90 %. Para el caso del almacenamiento de Energía Térmica, y Química como el Hidrogeno o Metano se posicionan con valores de eficiencia muy bajos, esto se atribuye a las perdidas por transmisión de calor, lo que los hace menos viables cuando de porcentajes de eficiencia se refiere.

Para el caso particular de las baterías son tres las que destacan sobre las existentes, son las baterías de ion-litio (Li-ion), Sulfato de Sodio (Na-S) y ZEBRA (Cl-Ni-Na) que manejan eficiencias por arriba del 90 %, aunque pudieran considerarse ideales por este aspecto, sus altos costos y cortos tiempos de vida son factores que deben considerarse. El resto de las baterías como las de Plomo-acido, Ni-Cd, BRV, Ni-hidruros, Fe-Cr, Z-aire manejan eficiencias en un rango de 60 hasta 85 %, no hay tecnologías en esta rama que manejen eficiencias por debajo del 50 %.

Densidad de energía

La densidad de energía (Wh / kg o W h/ litro) se calcula como una energía almacenada dividida por el volumen. El volumen del dispositivo de almacenamiento es el volumen de todo el sistema de almacenamiento de energía, incluido el elemento de almacenamiento de energía, accesorios y estructuras de soporte, y el sistema inversor. La variación de densidades dentro de los diferentes tipos de sistemas, permite diferenciar tres tipos:

- **Baja densidad:** Los capacitores, supercapacitores, superconductores magnéticos y los PHS son los que presentan densidades por debajo de los 5Wh/kg.
- **Media densidad:** Los volantes de inercia y la mayoría de los acumuladores se manejan en un rango de 10 a 60 Wh/kg, uno de los principales factores por los cuales las baterías son utilizadas para almacenamiento de mediana escala.

- **Alta densidad:** Los sistemas de Aire Comprimido, Almacenamiento por Hidrogeno y sistemas de almacenamiento Térmico son considerados de alta Densidad, manejando valores por encima de los 100 Wh/kg.

Impacto ambiental

Existen pocas tecnologías de almacenamiento que generan un bajo o nulo impacto en el ambiente, como lo es el Almacenamiento de Hidrogeno quien se ha planteado como el combustible para el futuro, debido a su baja emisión de contaminantes. El resto de los sistemas de almacenamiento traen consigo una huella considerable de carbono. Por ejemplo, la utilización de PHS, implica que para su construcción se debe afectar el ecosistema del sitio donde se realiza, los sistemas de Aire Comprimido forzosamente emplean gas que en su combustión generan un alto impacto ambiental.

En cuestiones del impacto ambiental generado por las tecnologías de interés, es claramente visible y entendible que éste tipo de almacenamiento conlleva implicaciones ambientales, debido a los químicos utilizados para su construcción, sin embargo existen algunas baterías que tienen un impacto muy bajo sobre el ambiente como las de sulfuro-magnesio. Dentro de los acumuladores podemos diferenciar a los de ion-litio, plomo-acido, Ni-Cd que tienen un mayor impacto ambiental, aun considerando que se le da el tratamiento requerido para su disposición, ya que son considerados desechos tóxicos.

Costo capital

Los sistemas de Aire comprimido, Bombeo Hidráulico y Almacenamiento Térmico se encuentran dentro del rango más bajo referido a costo capital, podemos considerar estos como sistemas con mayor desarrollo y como consecuencia de esto, costo bajo. Otra tecnología que se encuentra dentro de este selecto grupo es el almacenamiento por Hidrogeno, sin embargo, este se encuentra aún en desarrollo. El Sistema de almacenamiento por aire comprimido presenta el costo capital más bajo.

La mayoría de las baterías, el volante de inercia y los capacitores se encuentran dentro de un rango de costo capital de 400-1000 \$/kWh por lo cual se pueden considerar dentro de un costo capital mediano. Para el caso de los supercapacitores, superconductores magnéticos y algunos tipos de baterías son considerados los sistemas con un elevado costo capital, por arriba de los 1000 \$/kWh, sin embargo, son tecnologías recientes y se espera que estos costos disminuyan a medida que se optimicen sus procesos de fabricación.

En el análisis a las baterías se pueden diferenciar claramente dos rangos de costo capital:

- El costo capital más bajo contempla a los acumuladores de plomo-acido, Zn-aire y Fe-Cr. El costo capital es uno de los principales motivos por los cuales las baterías de plomo acido son las mayormente comerciales desde hace algunas décadas.
- Los costos de capital elevados se presentan en las baterías de Na-S, Cl-Ni-Na, VRB, Ni-Cd, ion-litio, Estos acumuladores se consideran de creación reciente por lo cual la tendencia va a la baja y se espera que en poco tiempo se alcancen costos rentables.

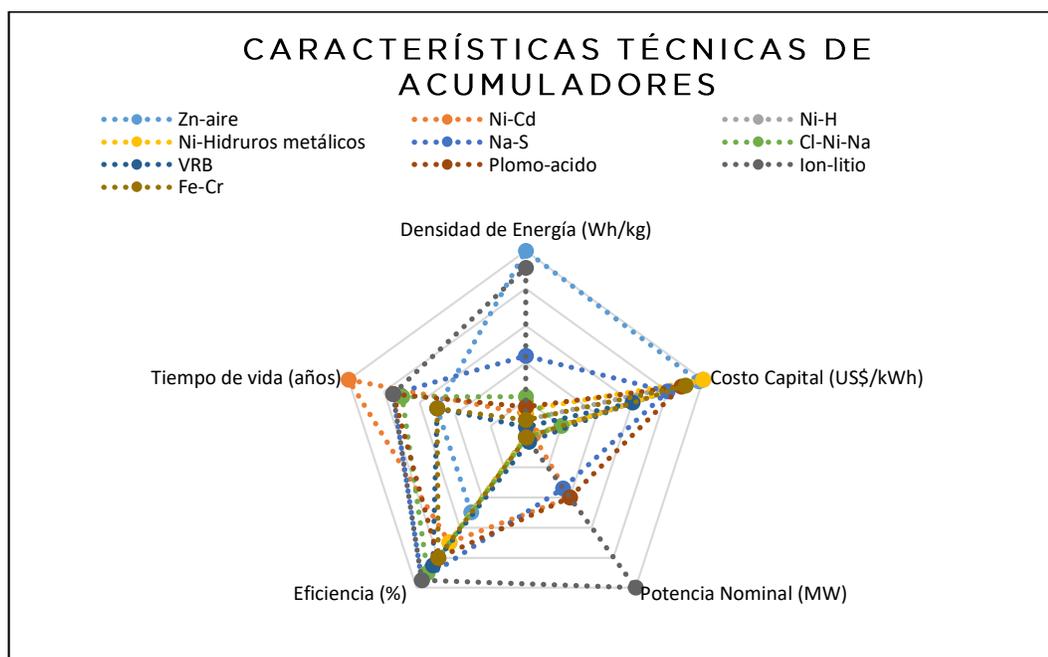


Fig. 4.3 Comparación de las características técnicas de acumuladores

La figura 4.3 muestra de manera conjunta las características de los diversos acumuladores estudiados en esta investigación, los valores en cuanto a cada característica se ponderaron en porcentajes, es decir los más altos valores de eficiencia, tiempo de vida, potencia nominal y densidad de energía corresponden a un alto porcentaje, específicamente para el caso de costo capital igualmente se estimaron los costos en porcentajes, pero en este caso se invirtieron, es decir a valores más altos de costo capital, el porcentaje que le corresponde es mayor, esto con el fin de que el gráfico proyecte en sus vértices, los valores más óptimos. Se esperaría que la mejor tecnología en este gráfico se viera representada por un pentágono regular, sin embargo es apreciable que no existe una tecnología que sea mejor que alguna otra ya que solo se muestran polígonos irregulares

4.2. Conclusiones

Como objetivo general de este proyecto se tenía contemplado otorgar una visión general de las diferentes tecnologías de almacenamiento con las que se cuentan en la actualidad, se abordaron los tipos de almacenamiento de energía, clasificándolos en 5 grupos como lo fueron almacenamiento mecánico, eléctrico, químico, térmico y de manera más específica el almacenamiento electroquímico, derivado de que esta área es de mayor interés por su adaptabilidad para trabajar con sistemas de generación eólicos y fotovoltaicos de pequeña y mediana escala.

Mediante esta investigación de manera general se puede concluir que todas las tecnologías de almacenamiento son viables, pero bajo ciertas condiciones. No existe actualmente una tecnología de almacenamiento ideal para cualquier tipo de aplicación que pueda estar por encima de otras, esto debido a que son varios los factores que deben considerarse para elegir cierto tipo de almacenamiento, es por esto que es recomendable la implementación de varios tipos de sistemas de almacenamiento cuando las necesidades lo ameriten, con la finalidad de tener un óptimo aprovechamiento energético.

Si bien se tiene como tendencia la utilización de energías que sean amigables con el medio ambiente, ha quedado claro que la mayoría de los sistemas de almacenamiento de

ésta conllevan un impacto ambiental significativo como es el caso de las baterías. Estas generan contaminantes ambientales, incluyendo residuos peligrosos, emisiones de gases de efecto invernadero y gases tóxicos, de diferentes maneras durante su fabricación, uso, transporte, recolección, almacenamiento, tratamiento, eliminación y reciclaje. El desarrollo acelerado de las tecnologías aplicables a dispositivos electrónicos implica la utilización de baterías de baja escala, pero no por ser baja conlleva a un bajo impacto en el ambiente, y lo que es importante también es la repercusión que pudiera tener en la salud pública.

La madures en los SAE es variable, existen tecnologías que han estado a la disposición del usuario durante algunas décadas, como es el caso de los SBH, los volantes de inercia y las baterías de plomo-acido, algunas otras se han desarrollado en años recientes y sin embargo ya se encuentran disponibles comercialmente, el caso de las baterías de Metal-Aire se encuentran en desarrollo y se espera que en el corto plazo sean alternativas viables en la mayor cantidad de características técnicas posibles, ya que actualmente vislumbran grandes promesas por su elevada densidad energética y su bajo impacto al ambiente.

Ha quedado claro que existen sistemas que implican un elevado costo capital, sin embargo, las innovaciones y el desarrollo científico han hecho que lo que hace un par de décadas era considerado excesivamente costoso, ahora sea algo rentable, siguiendo la tendencia, se espera que, mediante nuevas investigaciones de optimización, los costos actuales vayan a la baja y sean económicamente flexibles. Especialmente para el caso de los capacitores y supercapacitores, así como las baterías de Ni-Cd, Na-S y ion-litio los cuales son sistemas prometedores que se ven limitados por sus altos costos.

Claramente el almacenamiento de la energía es el talón de Aquiles de los sistemas de energía renovable aislados, pero es también el factor que los podría potenciar de la manera que se espera. El papel crucial del almacenamiento surge cuando la fuente generadora de energía se encuentra aislada e imposibilitada para conectarse a la red eléctrica.

Hablando específicamente del área de interés que es el almacenamiento electroquímico, es este tipo de tecnologías las que fácilmente pueden complementar a cualquiera de los SAE antes mencionados, cuando se habla de la hibridación de sistemas, las baterías siempre serán una opción viable y adaptable a cualquier tecnología. Se espera que el desarrollo de este tipo de tecnologías disminuya sus altos costos de capital pero que además lleguen a ser una opción netamente amigable con el medio ambiente, mediante la implementación de nuevos materiales ya que su puede ver en las tablas comparativas datos claros, referentes al impacto que tienen al ambiente, principalmente cuando ya no son útiles y no se les da la disposición adecuada.

Para el área de aplicación que genera interés por la adaptabilidad a sistemas de generación eólicos y solares, las baterías son los SAE ideales por varios aspectos como su densidad de carga, su volumen, costo, etc. Derivado del análisis de las características técnicas de esta tecnología, queda claro porque las baterías de ion-litio son la tecnología que le está ganando terreno a otras de mayor madures, aun teniendo en cuenta su elevado costo, aun teniendo por delante retos tecnológicos que incluyen obtener una alta densidad de de energía, larga duración y capacidad de aumentar un número considerable de ciclos.

Queda claro también porque las baterías de plomo-acido se han arraigado desde hace años para el almacenamiento de ER de baja y mediana escala, esto en función de su durabilidad y bajo costo, así como su capacidad de suministrar altas corrientes de descarga. Sin duda alguna existen algunas que en próximos años se consoliden dentro del mercado, el caso de las baterías de Zn-aire es sin duda especial y prometedor, por su alta densidad, bajo costo y bajo impacto ambiental.

Bibliografía

- [1] Morante, Juan Ramón, El almacenamiento de la electricidad, 1a ed., Barcelona: Fundación Gas Natural Fenosa, 2014.
- [2] A. Afif y S. Rahman, «Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage,» *Journal of Energy Storage*, vol. 25, p. 100852, 2019.
- [3] L. Liu, Y. Feng y W. Wu, «Recent progress in printed flexible solid-state supercapacitors for portable,» *Journal of Power Sources*, pp. 69-77, 2019.
- [4] M. Hutchins, «Pv magazine,» 25 julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.pv-magazine-mexico.com/2019/07/25/el-imec-anuncia-planos-de-estado-solidos-para-baterias/>. [Último acceso: 3 septiembre 2019].
- [5] Q. Zhou y D. Du, «A review of thermal energy storage in compressed air energy storage system,» *Energy*, vol. 188, p. 115993, 2019.
- [6] «Híbridos y Eléctricos ecotecnología del vehículo,» 28 septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/empresa-espanola-investiga-baterias-aluminio-aire-recargables/20150928175645009962.html>. [Último acceso: 8 septiembre 2019].
- [7] Y. Wang y D. Leung, «Combining Al-air battery with paper-making industry, a novel type of flexible primary battery technology,» *Electrochimica Acta*, vol. 319, pp. 947-957, 2019.
- [8] W. Liu y J. Li, «Anode material NbO for Li-ion battery and its electrochemical properties,» *Rare Metals*, vol. 37, p. 118, 2018.
- [9] Y. Tao y T. Y., «Few-layer phosphorene: an emerging electrode material for electrochemical energy storage,» *Applied materials today*, vol. 15, pp. 18-33, 2019.
- [10] F.-B. Wu, B. Yang y J.-L. Ye, Grid-scale Energy Storage Systems and Applications, Academic Press, 2019.

- [11] C. Pérez Dominguez, N. Elortegui Escartin y F. Jarabo Friedrich, El Libro de las Energías Renovables, Madrid, España: Artes Gráficas Gala, 1988.
- [12] Banco-Mundial, «Banco Mundial BIRF AIF,» 2018. [En línea]. Available: <https://datos.bancomundial.org>. [Último acceso: 23 Marzo 2018].
- [13] IEA, «International Energy Agency,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/>. [Último acceso: 23 Marzo 2018].
- [14] CENACE, «gob.mx,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.cenace.gob.mx/GraficaDemanda.aspx>. [Último acceso: 25 Marzo 2018].
- [15] SIE, «Sener,» 2017. [En línea]. Available: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=VA2C01>. [Último acceso: 28 Marzo 2018].
- [16] B. Kilkis, Kakac y S. , Energy Storage Systems, 1 st ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 1988, p. 746.
- [17] R. A. Huggins, Energy Storage, Springer, 2015.
- [18] P. A. Tipler y G. Mosca, Física para la ciencia y la tecnología, Barcelona: Reverte, 2010.
- [19] A. Ter-Gazarian, Energy Storage for Power Systems, 2nd ed., London: The Institution of Engineering and Technology, 2011.
- [20] L. Matthew D. y M. Efstathios E. , «Energy storage needs for the substitution of fossil fuel power plants,» *Renewable Energy*, pp. 951-966, 2019.
- [21] M. Aneke y M. Wang, «Energy storage technologies and real life applications – A state of the art,» *Applied Energy*, p. 350–377, 2016.
- [2] A. Rohit y S. Rangnekar, «An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector: Part II – energy storage applications, benefits and market potential,» *Journal of Energy Storage*, vol. 2, n° 13, pp. 447-456, 2017.

- [23] F. S. Barnes y J. G. Levine, *Large Energy Storage Systems*, NY: Taylor & Francis Group, 2011.
- [24] Y. Guney y M. Tepe, «Classification and assessment of energy storage systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 2 75, pp. 1187-1197, 2017.
- [25] S. Mousavi, F. Faraji y A. Majazi, «A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 477-490, 2017.
- [26] J. Uebbing y L. K. Rihko-Struckmann, «Exergetic assessment of CO₂ methanation processes for the chemical storage of renewable energies,» *Applied Energy*, vol. 233, pp. 271-282, 2019.
- [27] M. S. Guney y Y. Tepeb, «Classification and assessment of energy storage systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016.
- [28] Guadalupe G. González, «Almacenamiento de energía por superconducción,» *Tecnología a fondo*, vol. 4, 2013.
- [29] N. Kularatna, *Energy Storage Devices for Electronic Systems*, Academic Press Elsevier, 2015.
- [30] X. Luo y J. Wang, «Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,» *Applied Energy*, pp. 551-536, 2015.
- [31] H. Branco, C. Rui y A. Setas Lopes, «Battery energy storage systems as a way to integrate renewable energy in,» *Energy for Sustainable Development*, p. 90–99, 2018.
- [32] R. Zito, *Energy Storage A New Approach*, Wiley-Scrivener, 2010.