



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Industrial Electrónica y
Automática

**SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO
DE ENERGÍA**

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

AUTOR:

GUILLERMO JAVIER MARTÍN CHICHARRO

TUTOR:

JOSÉ MIGUEL RUIZ GONZÁLEZ

Valladolid, Julio de 2016.

Resumen:

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es tener una idea general sobre los diferentes tipos de sistemas de almacenamiento disponibles en la actualidad y realizar un estudio sobre los mismos, acerca de su funcionamiento, costes, aplicaciones y viabilidad y líneas futuras. Además se analizará, de manera general, la problemática actual de la energía, las SmartGrids y la relación existente con los sistemas de almacenamiento de energía.

Palabras clave:

SmartGrid, SAE, energías renovables, medio ambiente, viabilidad.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción.....	7
Capítulo 2. Problemática de la energía	9
Capítulo 3. Distribución de la energía. (SmartGrid).....	13
3.1 SmartGrids.	13
3.2 Coche eléctrico: almacenamiento de energía (V2G).	15
3.3 Situación actual en España.	18
Capítulo 4. Sistemas de almacenamiento de energía (SAE)	21
4.1 Almacenamiento biológico	29
4.1.1 Introducción.....	29
4.1.2 Biomasa.....	30
4.1.3 Combustibles fósiles	36
4.2 Almacenamiento mecánico	37
4.2.1 Aire comprimido	37
4.2.2 Volante de inercia	41
4.2.3 Bombeo hidráulico	49
4.3 Almacenamiento térmico	53
4.4 Almacenamiento químico y electroquímico	57
4.4.1 Hidrógeno	57
4.4.2 Pilas de combustible.	61
4.4.3 Baterías	71
4.4.3.7 Powerwall (Tesla) y competidores.....	92
4.5 Almacenamiento eléctrico y electromagnético.....	95
4.5.1 Ultracondensadores (EDLC)	95
4.5.2 Superconductores (SMES).....	107
Capítulo 5. Conclusiones.....	115
Capítulo 6. Bibliografía.....	123
6.1 Referencias.....	127
6.2 Índice de imágenes.	128
6.3 Índice de tablas.	132
6.4 Índice de esquemas.	133

Capítulo 1. Introducción.

El propósito de este trabajo es analizar los sistemas de almacenamiento de energía actuales, establecer una comparativa entre ellos, analizar cuál es el estado de estos tipos de tecnología e intentar visualizar líneas futuras, qué usos podemos darle a la tecnología disponible y a la que se está investigando. El Trabajo de Fin de Grado se centrará principalmente en los sistemas de almacenamiento más afines con el Grado de Electrónica y Automática debido a la capacidad de establecer criterios y de su mayor conocimiento.

¿Qué es el almacenamiento de energía?

«El almacenamiento de energía son todos aquellos métodos que utiliza el ser humano para conservar la energía en cualquier forma y poder liberarla cuando sea requerida, en la misma forma energética o en otra diferente. Esta energía puede ser potencial (química, gravitacional, elástica, etc.) o cinética» [1].

Existen diferentes tipos de almacenamiento según su capacidad:

- Almacenamiento a gran escala (GW). El ejemplo más claro de este tipo son las centrales hidroeléctricas.
- Almacenamiento en redes (MW): podemos citar los volantes de inercia (flywheels), superconductores o baterías.
- Almacenamiento para consumidor final (kW). Los ejemplos pueden ser los mismos que en el caso anterior.

¿Cuál es la importancia de almacenar energía?

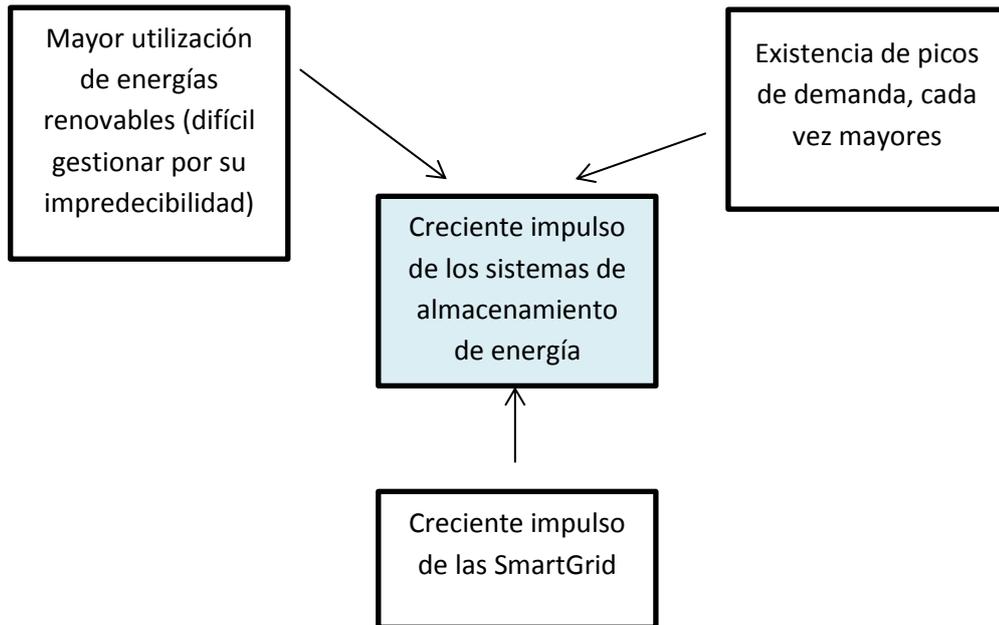
La importancia del almacenamiento energético radica en tres factores principalmente, como son la reducción de las enormes diferencias de la curva de demanda, la integración de las fuentes de energía renovables y el desarrollo de las SmartGrid.

Aplanando la curva de demanda se consigue una mayor calidad en el suministro, una mayor estabilidad del sistema y se evita el sobredimensionamiento del mismo, aumentando así su eficiencia.

Por otro lado, almacenamiento de energía y producción de energía a través de fuentes renovables son dos conceptos que son inconcebibles por separado; es necesario desarrollar adecuadamente los SAE para a su vez permitir el desarrollo de las fuentes de energía alternativas. Las fuentes renovables tienen una producción imprevisible en muchas ocasiones, y será necesario el almacenamiento de una producción de energía descompensada con la demanda.

Las SmartGrid permiten la bidireccionalidad de la energía eléctrica, convirtiendo a viviendas o negocios en productores a pequeña escala, pudiendo así aportar energía a

la red o recibirla. Entra aquí el concepto de generación distribuida, lo que probablemente marcará el futuro eléctrico en todo el mundo.



Esquema 1. Crecimiento de los sistemas de almacenamiento de energía.

Capítulo 2. Problemática de la energía

En la actualidad nos encontramos en la conocida como era de la energía y el desarrollo industrial de la sociedad moderna necesario para producir bienes y servicios exige gran cantidad de la misma. El grado superior de sociedad desarrollada podemos denominarlo como sociedad posindustrial, la cual exige una cantidad desmesurada de materias primas y energía (se alcanza una cifra superior a 18500 kWh por habitante y año). Además de por muchos otros factores, es posible determinar el grado de desarrollo de una sociedad midiendo su consumo energético y la eficiencia de transformación de la energía.

Entre los años 1950 y 2000 el consumo de energía primaria se quintuplicó, así como las emisiones en CO₂, mientras que la población únicamente se multiplicó por dos. Estrechamente relacionado con esto, existe una problemática con la energía: por un lado tenemos una gran dependencia de fuentes de energía fósil, ampliamente extendida e investigada, las cuales generan una contaminación muy superior a la que la naturaleza puede absorber por sí misma; esto nos lleva a los bien conocidos cambios climáticos producidos por la actividad humana, principalmente debidos a las actividades industriales y al transporte. Por otro lado tenemos la escasez de energía producida mediante fuentes de energía renovables debido al costo de producción de la misma, limitaciones de la tecnología, viabilidad de los proyectos, etc.

En España el porcentaje de energía procedente del petróleo es el 42.9%, siendo mayoritariamente destinado al transporte. Si se consiguiera por ejemplo que el coche eléctrico tuviera un importante peso en el mercado, poco a poco se podría ir reduciendo esa dependencia energética que se posee del petróleo (aplicable al resto de países en el mundo). Por otro lado, se aprobó el Real Decreto-Ley 1/2012 con el cual se pone una traba más para el autoconsumo energético, debido al impuesto que hay que pagar por el ser parcialmente autosuficiente aplicado a pequeños consumidores y al impuesto por el uso de baterías para este fin.

A continuación, las imágenes 1 y 2 que muestran la demanda y la generación española actual (Abril 2016).

Demanda energética eléctrica:

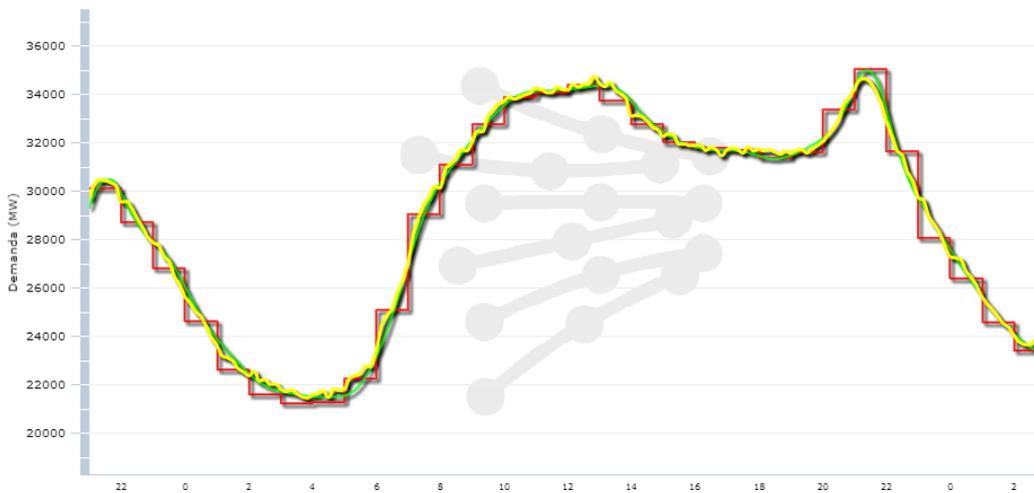
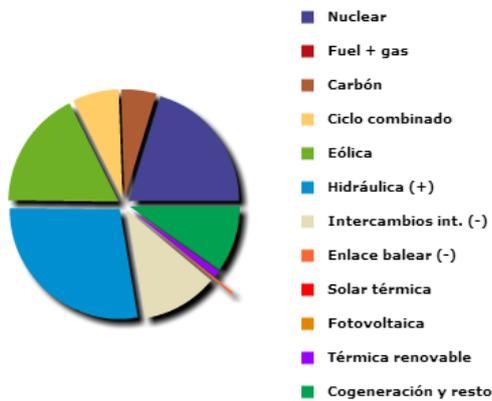


Imagen 1. Curva de demanda energética en España.

Producción energética:

Estructura de generación a las 21:10



Estructura de generación a las 02:50

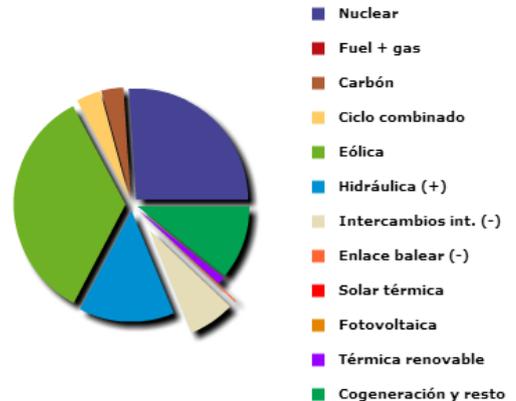


Imagen 2. Producción energética en España.

Tal y como se puede apreciar en la imagen 2 la producción energética varía mucho, existiendo una dominancia de energía hidráulica durante el día y eólica durante la noche. El problema que surge a continuación es el siguiente: observando la imagen 1 se aprecian los dos picos de demanda durante el día, debido principalmente a la actividad industrial y al sector servicios, mientras que durante la noche se presenta el

valle de energía (en el periodo entre las 12 de la noche y las 6 de la mañana el consumo energético se reduce de forma muy significativa). Si existe por la noche una mayor generación eólica de la que se va a consumir en ese momento, se deberá reducir la producción eólica hasta que se ajuste al consumo. Esta energía está siendo desperdiciada al no disponer actualmente un sistema de almacenamiento viable para la generación eólica. Una posible solución podría ser, gracias a la introducción del coche eléctrico a gran escala, la utilización de las horas valle para la recarga de baterías del coche eléctrico o almacenarlo como otro tipo de energía.

Red Eléctrica Española y algunas empresas están trabajando en almacenamiento en sistemas hidráulicos y otros tipos de sistemas de almacenamiento de energía, integrando en la medida de lo posible las energías renovables y evitando la pérdida de energía eléctrica generada cuando no tenemos grandes demandas. Para realizar estos proyectos primero se procede a evaluar el impacto que conllevan las nuevas instalaciones de almacenamiento y su capacidad de integración de las renovables, se estudian los aspectos de gestión y técnicos necesarios para así, realizar propuestas de carácter normativo y regulatorio a la administración correspondiente. Los sistemas de almacenamiento ayudarán notablemente en la optimización de la infraestructura eléctrica, así como en la eficiencia del sistema.

En el siguiente gráfico se puede ver la procedencia del consumo energético final en España:

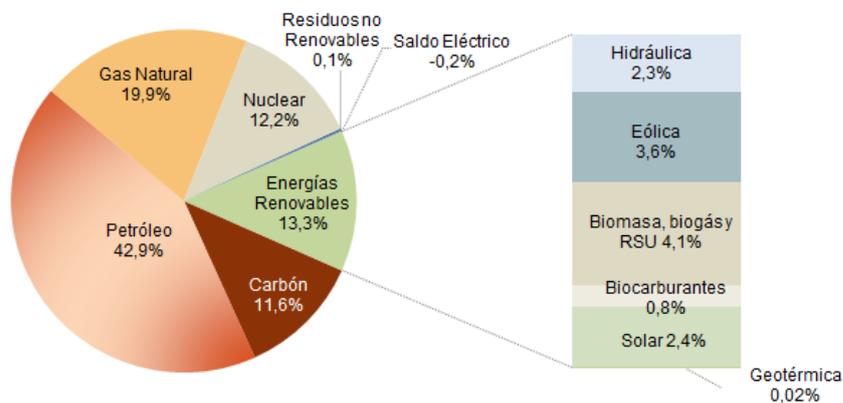


Imagen 3. Consumo energético final en España.

Solo un pequeño porcentaje de la energía consumida proviene de las energías renovables de cualquier tipo. Tenemos una clara dependencia de los combustibles fósiles al igual que el resto de países del mundo, unos en mayor medida y otros en menor. Es necesaria la investigación y desarrollo de todos los tipos de energías

renovables, los cuales no han alcanzado ni de lejos todo su potencial, y permitir así una mayor introducción de las renovables en nuestro mercado energético.

Si ahora se compara la producción de energía renovable en Europa (2013) puede verse que algunos países han logrado alcanzar el 50 o 60% del consumo total de energía de procedencia limpia.

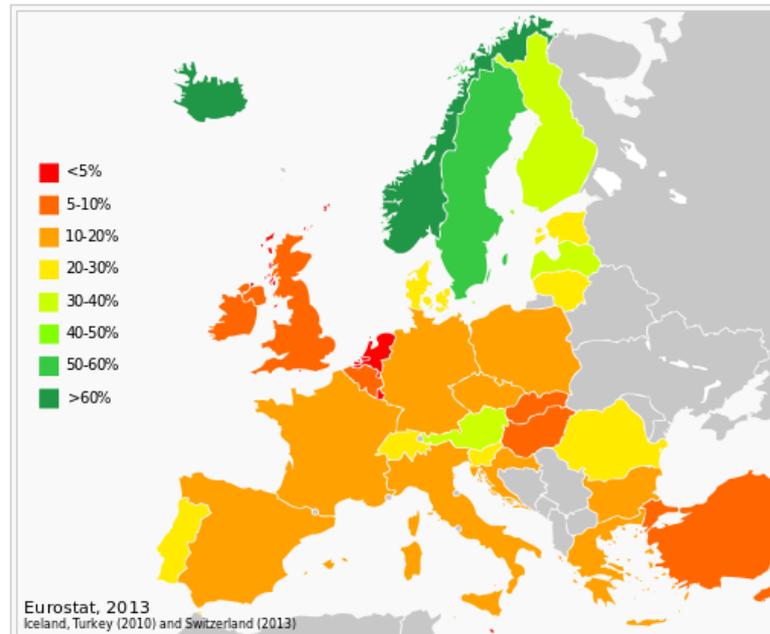


Imagen 4. Penetración de las energías renovables en Europa.

La localización del país, el clima y diversos factores son clave para la explotación de los recursos renovables, pudiendo aprovechar más su potencial. Algunos ejemplos pueden ser las horas de sol al año de las que disponemos en España, pudiendo sacar mayor partido a la energía fotovoltaica, o el aprovechamiento de Alemania de los vientos marítimos con molinos instalados en plataforma continental mar adentro.

La Unión Europea tiene como objetivo la integración de las energías renovables en las políticas energéticas, exigiendo que al menos el 20% de la energía primaria que sea consumida proceda de las energías renovables en todos los países de la UE. Entre 2004 y el 2012 se ha aumentado considerablemente la producción en nuestro país, del 8.3% al 14.3% (datos de la oficina estadística Eurostat).

Mientras que ya algunos países han cumplido este objetivo, según la evolución de la producción energética española no podrá cumplir dicho objetivo, según determinó Günther Oettinger, comisario europeo de Energía. El método desarrollado por la Comisión está basado en el análisis de los modelos económicos y las medidas estratégicas de los países.

Capítulo 3. Distribución de la energía. (SmartGrid).

3.1 SmartGrids.

Definición. «Son redes de distribución eléctrica en las que la electricidad no va hacia únicamente un sentido, sino que es bidireccional. Se basa en una sinergia entre las instalaciones, su monitorización y el envío y recepción de datos de las mismas gracias a los sistemas actuales de telecomunicaciones. Además en ella se integran las acciones de consumidores y generadores de forma inteligente, para establecer un servicio más eficiente, económico y sostenible».

Podemos ver en el siguiente gráfico todo lo que implica y que está implicado en el concepto de SmartGrid.

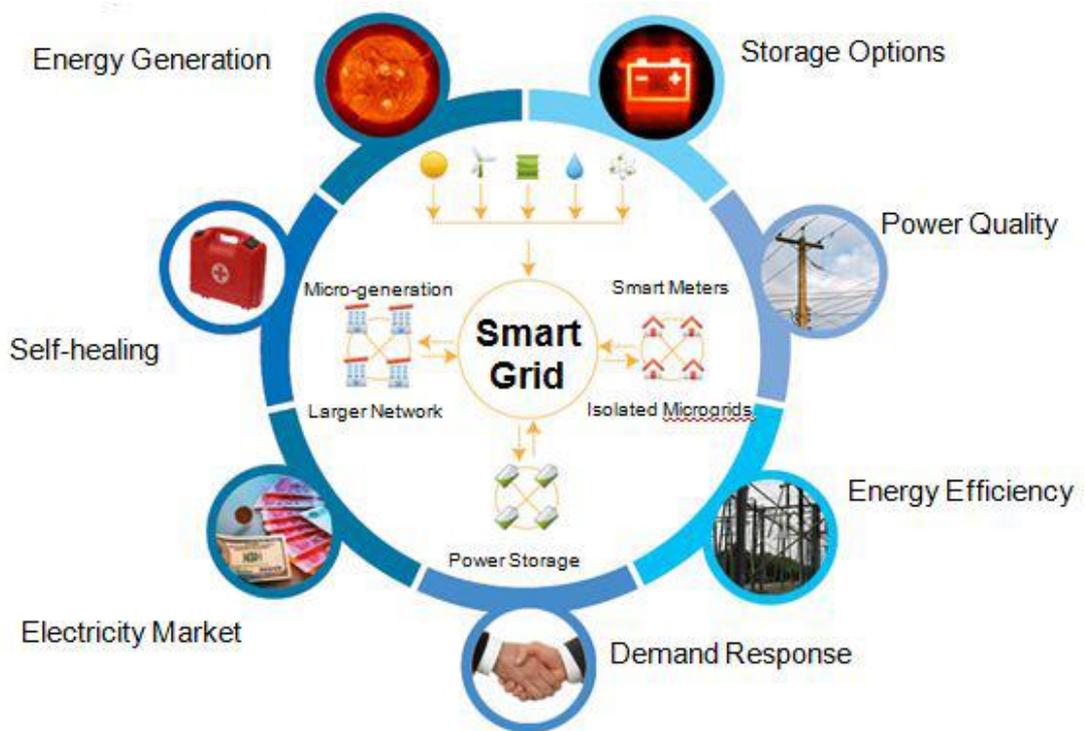


Imagen 5. Esquema SmartGrids.

¿Qué implica una SmartGrid?

Lo primero que implica una red inteligente es que los usuarios tomarán parte no solo en la recepción de energía, sino también en la producción (microgeneración). Esto no implica la desaparición de la generación centralizada, sino que se producirá que ésta sea más eficiente y mejore la calidad del suministro y se evitarán los microcortes, perturbaciones, etc. Además, la red entera se encontrará automatizada, pudiendo

gestionar de forma remota la demanda (habrá medidores electrónicos y sistemas automáticos en las los edificios para conocer la producción y demanda), de forma que pueda ser mucho más eficiente la gestión de las energías renovables, y por lo tanto, su integración en el sistema eléctrico. Resumiendo, la SmartGrid está basada en la utilización de sensores, comunicaciones y control por computación, lo que permite un progreso en todas las posibles funcionalidades de la red eléctrica.

En la siguiente imagen veremos la optimización gracias a las redes inteligentes de la curva de consumo:

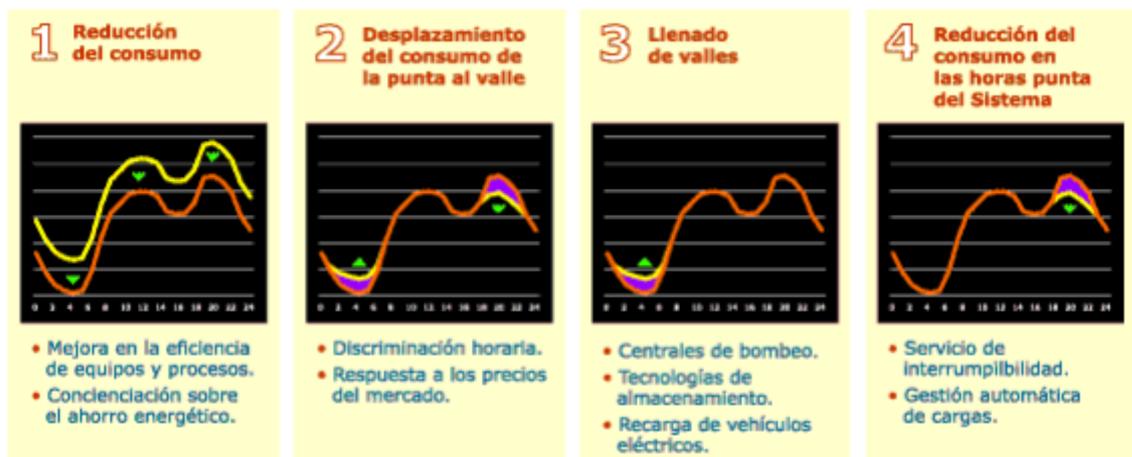


Imagen 6. Cambios en la curva de consumo gracias a las SmartGrids.

Existe una problemática con la red eléctrica instalada, que aunque cumple con las expectativas puestas en ella, necesita una mejora de cara al usuario final. Además, el consumo de energía aumenta vertiginosamente, y se ha de pensar en algún método que pueda ayudar en el ámbito de las redes. Es aquí donde surge la importancia de las SmartGrids, cuya flexibilidad permite la obtención o devolución de energía según las necesidades. Como principales problemas de la red eléctrica actual podemos citar la limitación de la monitorización (casi exclusiva al transporte de electricidad), que los sistemas de protección son totalmente pasivos, al igual que también lo son los consumidores, baja posibilidad de gestión de la demanda dependiendo de la franja horaria o del estado de la red, o la calidad del suministro eléctrico (la posibilidad de problemas como huecos de tensión o perturbaciones en la red son bajas).

Es necesario señalar que es necesaria la intervención de las compañías eléctricas para poder implementar las SmartGrids, aunque estas presentan el inconveniente para estas compañías de la reducción del consumo debido a las nuevas redes, y por tanto, reducción de sus beneficios. Se han de establecer pues una serie de políticas que fomenten el desarrollo de las redes inteligentes.

A continuación se van a ver las ventajas de las SmartGrids sobre la red eléctrica convencional:

- Transmisión de energía más eficiente, mayor fiabilidad y calidad en el suministro.
- Después de perturbaciones en la red, la restauración es más rápida.
- Se reducen los costes de operación y gestión de la energía y por tanto el precio para los consumidores.
- Se reducen los picos de demanda y evitamos el sobredimensionamiento del sistema.
- Integración de las energías renovables a gran escala, y con ello el consiguiente menor consumo de combustibles fósiles.
- Se mejora la seguridad.
- Mayor eficiencia de los sistemas de almacenamiento de energía de cara al usuario.

En la siguiente tabla veremos los beneficios en el sistema por regiones en 2013:

Tabla 1. Beneficios de las SmartGrids.

Escenario SmartGrids	UE		EEUU		EEGI	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Reducción consumo electricidad (%)	2	7	5	15	5	10
Reducción punta de demanda (%)			5	20	5	10
Reducción CO2 (%)	2	7	2.5	20	5	10

Nota: EEGI (European Electricity Grid Initiative)

Gracias a las SmartGrid y al control de la demanda de la energía es posible reducir el consumo, la demanda y las emisiones de CO2 en mayor o menor medida, pero siempre será un valor a tener en cuenta, más aún en un futuro. Cuanto más desarrollado esté el complejo, mayor será el ahorro en cada uno de estos casos.

3.2 Coche eléctrico: almacenamiento de energía (V2G).

Este apartado bien podría integrarse más adelante, en el apartado de aplicaciones de las baterías, ya que desde el punto de vista de la red eléctrica, el vehículo eléctrico (VE) es simplemente una batería (normalmente) de Ión-Litio. Sin embargo, componen una importante línea futura en el desarrollo de las SmartGrid.

V2G es el acrónimo de *Vehicle to Grid*. La introducción del vehículo eléctrico en las redes puede suponer una oportunidad para aumentar la eficiencia del sistema actual. Debido a la pasividad de los usuarios con la distribución de energía, ya que actualmente la red eléctrica es unidireccional, dicha red está sobre dimensionada para poder dar servicio a la mayor potencia que se demande.

Gestionando las cargas y descargas de las baterías es posible conseguir un aplanamiento de la curva de demanda, reduciendo los sobrepicos, aumentando la eficiencia del sistema y evitando el sobredimensionamiento de la red. Cargando las baterías de los vehículos en las horas valle, donde el consumo de energía es mucho menor y en numerosas ocasiones se producen excedentes de energía (energía que se pierde al no poder ser almacenada), y aportando energía al sistema en horas pico lograremos este aplanamiento. En España este excedente de energía proviene mayoritariamente de la producción eólica, y por lo tanto, gracias a esta gestión lograremos también una mayor integración de las fuentes de energía renovables.

Perfil de demanda para una penetración de un millón de vehículos:

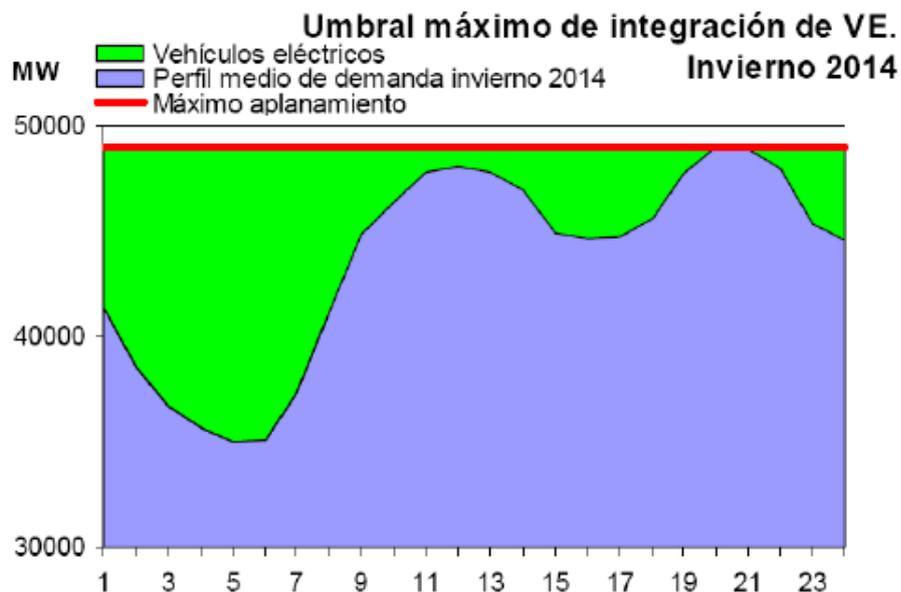


Imagen 7. Integración del VE en la curva de consumo.

Este modo de almacenamiento tiene una ventaja potencial: no se requiere instalar grandes complejos y no es situacional, sino que actúa como un sistema de almacenamiento de energía a gran escala gracias a la aportación de miles o millones de vehículos en conjunto. Pero para que este sistema pueda ser implementado es necesaria primero la implantación la bidireccionalidad de la energía en las redes actuales (entre otros muchos factores), característica de las redes inteligentes.

En la imagen 8 podemos ver el crecimiento de las ventas del vehículo eléctrico de transporte de pasajeros en los últimos años:

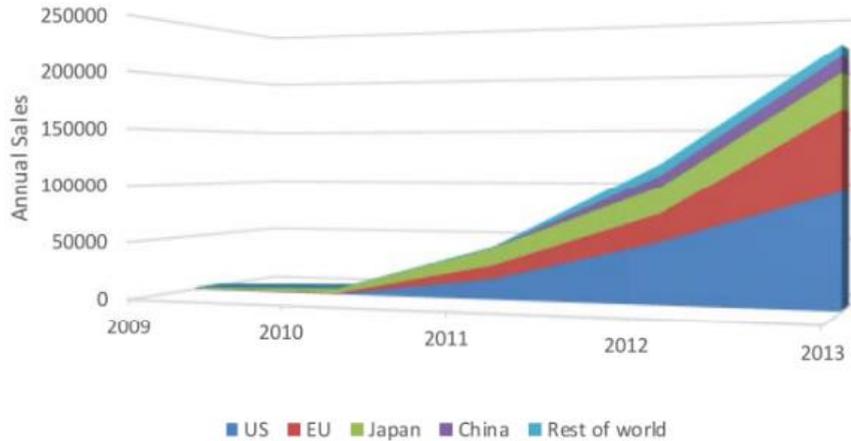


Imagen 8. Crecimiento del VE a nivel mundial.

Las ventas han llegado a duplicarse de un año para otro en todo el mundo, sin embargo, el mercado del VE crece mucho más lento de lo que se esperaba y actualmente suponen una cuota muy baja de la flota mundial (6780 coches en España en 2014) [2]. Son necesarias políticas de incentivación del VE por parte de los gobiernos, no sólo en España, donde el mercado tiene un crecimiento especialmente lento, sino en todos los países para facilitar su introducción en el mercado, abaratando los costes de adquisición para los usuarios. Para ello también será necesario ampliar la infraestructura de carga de vehículos, instalando conectores específicos para garantizar la carga correctamente.

Como es conocido, existen diferentes modos de carga para el VE. Sin entrar en mucho detalle en este aspecto, es necesario recalcar que para el modo de carga rápido se necesita un desarrollo de infraestructura específico (serán utilizadas en edificios públicos y en las electrolineras para largos trayectos principalmente). Para el modo de carga lento, que se podrá realizar en cada vivienda o garaje, no se necesita dicha infraestructura específica, pero es necesario incentivar este tipo de carga y además que sea en el periodo de horas valle. Esto será más beneficioso primero que las baterías sufrirán menos en ciclabilidad, y segundo, que en la red eléctrica se evitarán picos de tensión, se podrá mejorar la gestión de la energía y el sistema será más estable.

3.3 Situación actual en España.

El gran problema que existe en España con respecto al autoabastecimiento y almacenamiento de energía es legislativo, aunque se ha de aclarar que no es el objetivo de este apartado profundizar en el plano legislativo, sino que se mostrará a grandes rasgos el panorama actual. Nos basaremos principalmente en el autoconsumo gracias a la energía solar fotovoltaica, la más extendida actualmente para dicho objetivo en todo el mundo.

España cuenta con una producción energética dedicada al autoconsumo que apenas llega a los 22 MW, mucho menor que otros países de Europa, como Francia (1000 MW) o Alemania (2000 MW), a pesar de ser un país muy favorable para la implantación de la misma debido a su alta tasa de radiación solar y horas de sol al año. Es el Real Decreto del Autoconsumo (2015) y el llamado “impuesto al Sol” (peaje de respaldo) (2013), con el cual es obligatorio pagar una tasa de mantenimiento a las personas que dispongan de este tipo de dispositivos (usen la red eléctrica general o no), los que lastran actualmente la expansión, no sólo al autoabastecimiento energético, sino a todo lo que ello implica: mayor desarrollo y expansión de los sistemas de almacenamiento y de algunas fuentes energéticas renovables.

Con un sistema de almacenamiento en las viviendas se podría llegar al autoabastecimiento (o hacerlo en parte), donde el consumo medio no alcanza los 30kWh en un día. Existen ocasiones en las que sí podría ser viable el autoabastecimiento, si la vivienda o el complejo se desconecta de la red permanentemente (en el caso de que exista un tendido eléctrico hasta él) o también puede verse como una alternativa en el caso de tener una vivienda aislada y cuyo coste de llevar el tendido eléctrico hasta la misma sea demasiado costoso.

Además de esto, esta inexistencia de bidireccionalidad de la energía que existe en otros países de Europa, permitiendo que en horas de mayor producción que consumo la energía se venda y pase a la red eléctrica (en España “se regalaría” al sistema eléctrico), provoca que la amortización de la instalación no sea viable en muchos casos o amortizable a muy largo plazo.

¿Cómo afecta todo esto a los sistemas de almacenamiento energético?

En realidad, los impuestos establecidos por el RD del Autoconsumo y el peaje de respaldo no afectan de manera directa a los sistemas de almacenamiento, ya que el impuesto no está sobre ellos. Sin embargo, sí que afecta de manera indirecta, ya que ante menor instalación de sistemas de autoconsumo, menores serán los sistemas de almacenamiento instalados (hablando siempre de sistemas aplicados a pequeña escala, no a gran escala como centrales de bombeo o almacenamiento de aire comprimido), menor será su inversión en investigación y su comercialización.

Indudablemente el autoconsumo aumentará en nuestro país, pero parece que el ritmo de la progresión es demasiado lenta, estancada debido a leyes que impiden su crecimiento natural.

Por último sólo indicar que se puede acceder al Real Decreto del Autoconsumo con el enlace de la referencia [22].

Capítulo 4. Sistemas de almacenamiento de energía (SAE)

La necesidad del almacenamiento de energía viene dada por el desfase que existe entre la generación y el consumo de la energía. Ya que este desfase es debido a la aleatoriedad de producción de las energías renovables y a los ciclos de consumo de energía, es necesario almacenarla para su aprovechamiento. En la sociedad actual existen picos de consumo de energía a lo largo del día que deben ser cubiertos; se requeriría un sobredimensionado enorme e innecesario de las plantas de generación el producir toda la energía en el momento que se consume, perdiendo así también eficiencia en la producción (actualmente así está diseñado el sistema, sobredimensionado para poder hacer frente a la máxima demanda posible). Estas plantas de generación no podrían estar basadas en energías alternativas, ya que como se ha indicado, su producción algunos casos es aleatorio. Solamente con centrales de energía no renovable podríamos suplir tal demanda.

El objetivo fundamental de la energía para que pueda resultar de utilidad es la necesidad de que se encuentre a nuestra disposición cuando sea requerida. Por ejemplo, la energía que se está presente en los enlaces químicos de los combustibles fósiles puede transformarse rápidamente en otras formas de energía, mientras que la energía térmica se disipa con mucha facilidad. Además, una ventaja clara de los combustibles fósiles es que siempre están situados de forma concentrada en yacimientos localizados, de donde serán extraídos (es necesaria la distinción entre yacimientos que existen y yacimientos que son económicamente rentables). Es común encontrar yacimientos que por falta de desarrollo tecnológico actual no podrán ser explotados porque económicamente no son viables.

Las energías renovables se caracterizan por su deslocalización y baja intensidad con la que aparecen. Como ventajas ante esta situación tenemos la posibilidad de explotar estos recursos en múltiples puntos geográficos y la improbabilidad de que caiga en el monopolio actual en el que se encuentra el petróleo. La deslocalización permite crear una red de almacenamiento dispersa por multitud de puntos en una zona y distribuir fácilmente la energía producida, o también construir grandes plantas como se hace tradicionalmente para su tratamiento. Sin embargo, una desventaja importante es que las energías renovables dependen de los flujos naturales, por ello su producción no se ajusta en muchos casos al momento de su requerimiento (un caso muy típico es el de producción de energía eólica por la noche en España, tal y como se reflejó previamente en la imagen 2). Es en este punto donde nos damos cuenta de la importancia del almacenamiento de la energía para sacar el máximo partido a las instalaciones productoras de energías renovables.

Otra característica muy importante del almacenamiento energético, no es sólo la potencia que es capaz de almacenar, sino también el tiempo que podemos almacenarla

hasta su utilización, idealmente, sin tener ningún perjuicio o pérdida de la misma, ya que en muchos casos de almacenamiento de energía esta se pierde a lo largo del tiempo.

La elección del tipo de almacenamiento se puede realizar basándonos en los siguientes factores:

- Factor energético:
 - Rendimiento del dispositivo de almacenamiento.
 - Vida útil del sistema: números de ciclos de carga y descarga.
 - Uso del sistema: salida del sistema de almacenamiento instalado.
 - Cantidad de energía que se requiera almacenar.
 - Almacenamiento a corto o largo plazo.
- Factor económico:
 - Precio por kW del sistema de almacenamiento.
 - Precio por kW del sistema de transformación.
- Factor social:
 - Repercusiones que dicho sistema de almacenamiento tenga sobre las personas de su alrededor o que vayan a consumir dicha energía posteriormente.
- Factor ambiental:
 - Repercusiones que ocasione sobre el medio ambiente, ya sea por su fabricación o por su utilización e instalación.

Se verá ahora en los siguientes subapartados diferentes clasificaciones dependiendo de los parámetros que se analizan.

5.0.1 Almacenamiento según su potencia y energía específicas.

En la siguiente imagen se puede ver la relación en términos de energía específica y potencia específica cuando hablamos de los diferentes sistemas de almacenamiento y las posibilidades que ello representa.

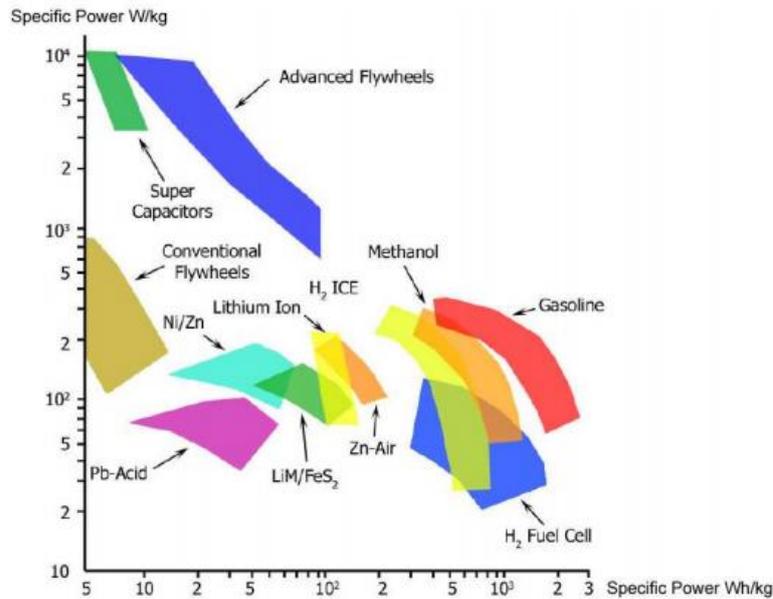


Imagen 9. Comparativa de potencia específica/energía específica.

Como puede observarse, la gasolina posee muy buena relación de potencia específica en relación a su energía específica, lo que significa que será capaz de desarrollar una potencia bastante elevada y posee una muy alta energía por unidad de masa. Estos dos parámetros que se muestran en la tabla son de los principales parámetros energéticos de los sistemas de almacenamiento y determinarán en muchos casos las aplicaciones posibles de los mismos.

5.0.2 Almacenamiento según su aplicación.

Existe una clasificación de tipos de almacenamiento de energía según la duración del tiempo de almacenamiento con la que son analizadas tres categorías: almacenamiento de energía a gran escala para utilizarse a nivel de carga, generación distribuida para ser utilizada en picos de demanda y calidad de energía para alta fiabilidad en el consumidor.

En la siguiente tabla se verán las características más relevantes de las diferentes clases:

Tabla 2. Aplicaciones de almacenamiento energético.

Categorías	Potencia de descarga	Tiempo de descarga	Almacenamiento de energía	Aplicaciones comunes
Almacenamiento masivo	10 – 1000 MW	1 – 8 hrs	10 – 8000 MWh	Nivelación de carga.
Enlace de potencia	100 – 2000 kW	Sec-min	50 – 8000 kWh	Transmisión, neutralización de picos.
Calidad de la energía	0.1 - MW	1 – 30 sec	0.028 – 16.67 kWh	Energía de utilización final de calidad y fiable.

En la tabla se puede observar claramente la relación existente que hay entre la función general que realizará un determinado sistema de almacenamiento respecto de su tiempo de descarga

Se puede visualizar diferentes sistemas de almacenamiento según su aplicación, tal y como vemos en la siguiente imagen:

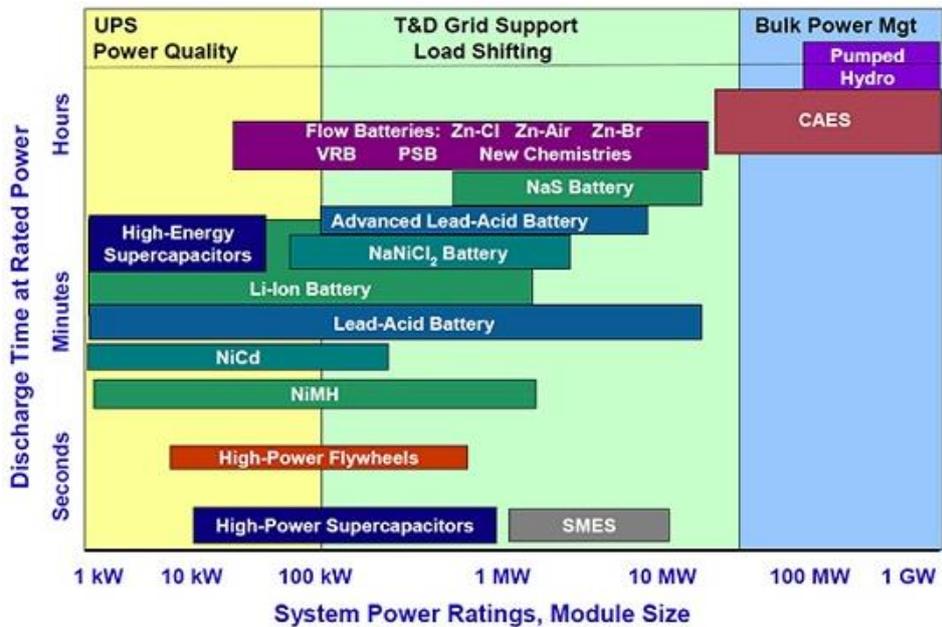


Imagen 10. Almacenamiento según su aplicación

En almacenamiento masivo de energía, la energía será utilizada a lo largo de un periodo de tiempo de horas o días normalmente para lograr una independencia energética entre las fuentes que producen energía y su posterior consumo.

En enlace de potencia se aplica la energía almacenada durante apenas unos segundos o minutos para en caso de cortes o problemas de suministro evite un corte del mismo, asegurando de este modo su continuidad.

En aplicaciones de calidad de la energía se libera la energía almacenada durante un tiempo de segundos o milisegundos para evitar problemas que surgen en las redes de distribución y así asegurar un buen suministro eléctrico.

5.0.3 Almacenamiento según peso y tamaño.

Estos dos factores se consideran especialmente relevantes en aplicaciones móviles, especialmente en aplicaciones de vehículos eléctricos, donde ambos factores determinarán si es posible su uso o por el contrario, será necesario escoger otro tipo de SAE.

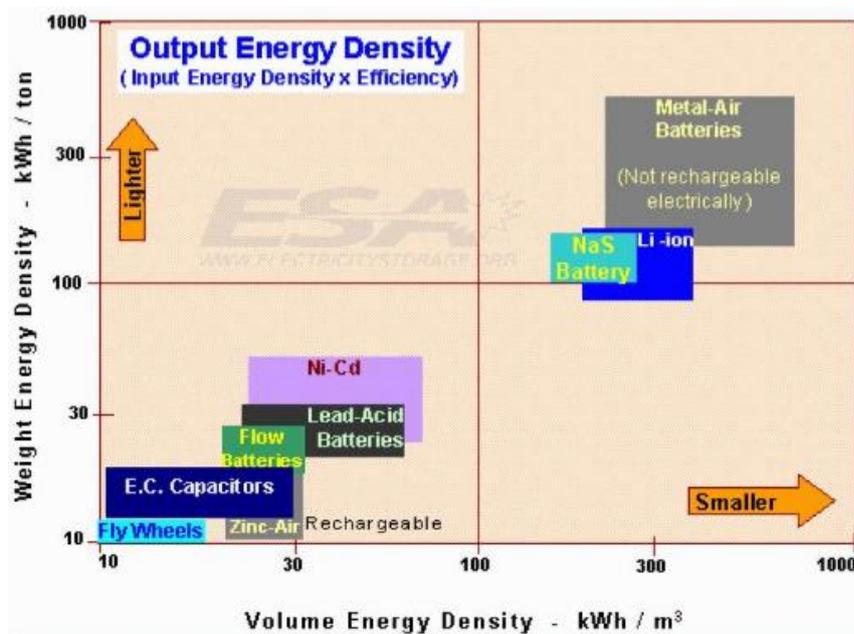


Imagen 11. Almacenamiento según peso y tamaño.

Un mayor peso implica un mayor consumo de energía, y por lo tanto, una menor autonomía del vehículo eléctrico. El volumen ocupado también es importante, ya que a mayor volumen, mayor necesidad de agrandar el vehículo, o por el contrario menor capacidad disponible para el sistema de almacenamiento, en el caso de tener un volumen máximo fijo.

Se aprecia que lidera la gráfica en cuanto a mejores características las baterías de metal-aire (mayor densidad energética), sin embargo, estas ofrecen una vida útil mucho menor, ya que no se recargan de la forma habitual.

5.0.4 Almacenamiento según su coste.

El coste es un parámetro clave en la mayoría de ocasiones, eliminando algunas excepciones como proyectos aislados, determinan en muchos casos la elección de ese sistema de almacenamiento u otro, debido a la inversión que implica. Es cierto que las tecnologías serán viables económicamente o no si son capaces de cumplir ciertos requisitos, y entre ellos destacan los costes totales del sistema, en los que están incluidos también su vida útil, su posible sustitución o reparación, los costes de mantenimiento y los costes necesarios para el desarrollo de la tecnología.

Podría ponerse un ejemplo con las baterías de plomo-ácido, las cuales son una tecnología madura, poseen gran disponibilidad en todo el mundo y son muy baratas. Sin embargo, esto no significa que constituyan la mejor opción para almacenamiento a gran escala, debido a su baja densidad energética y su baja ciclabilidad, que obligará a reemplazarlas.

En la siguiente imagen no se incluirá el coste que implica la conversión de potencia de cada sistema de almacenamiento.

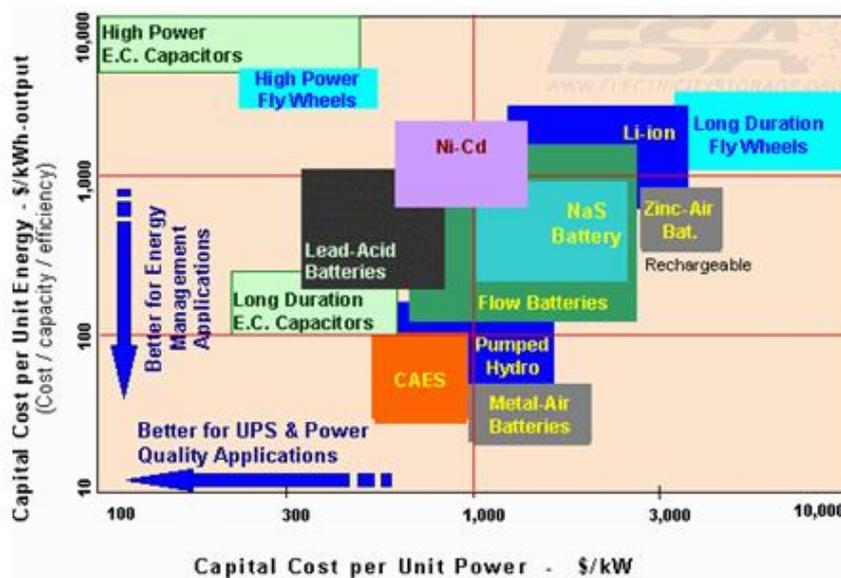


Imagen 12. Almacenamiento según coste capital.

Es apreciable que el coste total varía enormemente para cada tipo de SAE y la capacidad de almacenamiento que posee.

A continuación se verá el coste por ciclo, el cual se considera la mejor forma de evaluar el coste real de un sistema de almacenamiento, ya que se puede ver la aplicación que se logra con cargas y descargas realizadas de forma frecuente. Los costes aquí reflejados tienen en cuenta la vida útil del sistema de almacenamiento y su rendimiento.

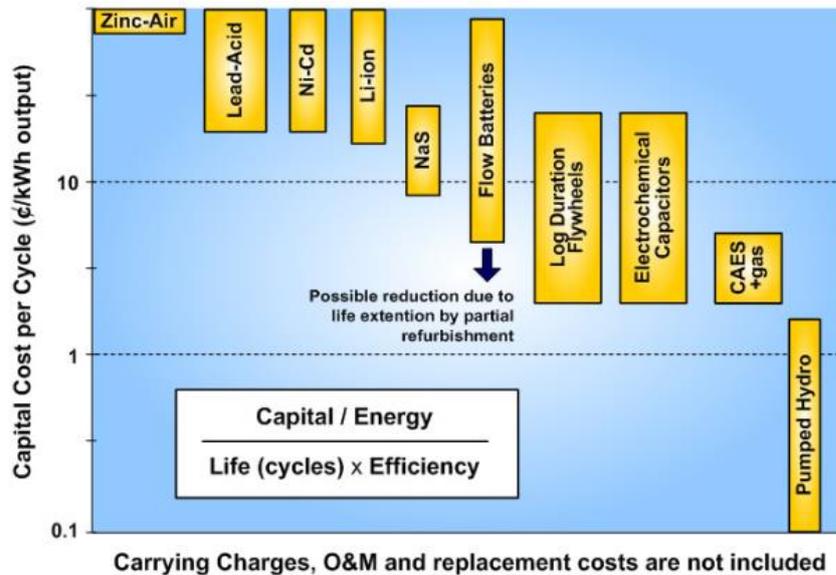


Imagen 13. Almacenamiento según coste capital y ciclabilidad.

Es necesario recalcar que esta forma de análisis de costes es mucho menos eficiente para aplicaciones que requieran una cantidad baja de cargas y descargas, como puede ser la neutralización de sobrepicos en la red. Su utilización casi espontánea y debido al coste de la energía dará como resultado un aumento del coste capital del SAE.

5.0.5 Almacenamiento según su desarrollo.

No solo el coste capital, su densidad de potencia o su densidad energética determinará la aplicación de un sistema de almacenamiento de energía, sino que el desarrollo tecnológico que posea será también importante, debido a que cuanto mayor sea, mayor conocimiento se poseerá sobre todas sus características, su mejor aplicación, inversión necesaria y posible solución de problemas que puedan surgir. Además el grado de desarrollo tecnológico está directamente relacionado además con el precio de almacenamiento.

Technology Trends and Readiness Electric Energy Storage Options

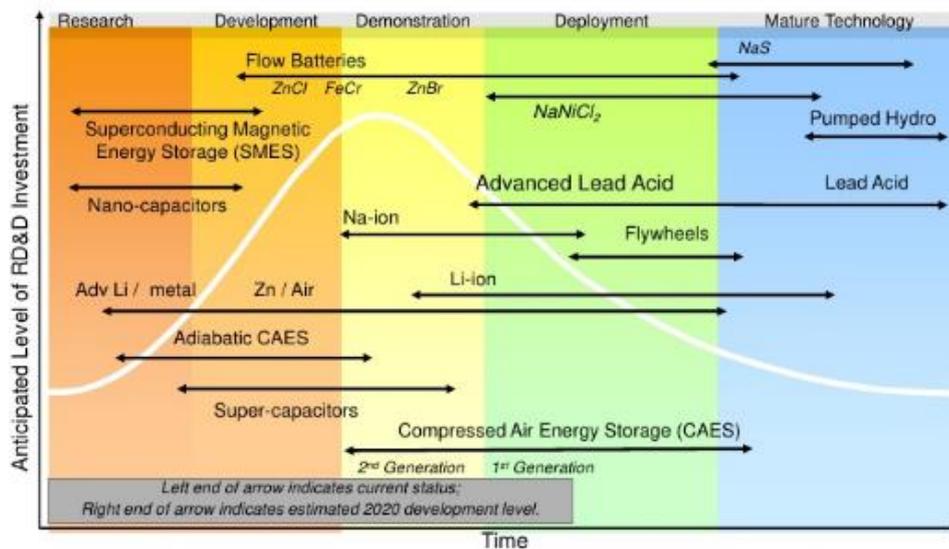


Imagen 14. Almacenamiento según su desarrollo tecnológico.

En resumen, cuanto mayor madura sea la tecnología mayor conocimiento se poseerá sobre ella y más fácil será su implantación debido a que las posibilidades que ofrece están suficientemente investigadas. Sin embargo hay que tener algo en cuenta, que la tecnología sea madura no implica que no se siga investigando en ella.

5.0.6 Almacenamiento según su eficiencia y ciclo de vida.

Ambos parámetros, eficiencia y ciclabilidad, son muy importante a la hora de determinar la aplicación de según qué sistema de almacenamiento. Dichos parámetros estarán directamente relacionados con su coste, debido a que un mayor rendimiento implicará una menor cantidad de energía desperdiciada, y una ciclabilidad mayor implicará una perdurabilidad mayor en el tiempo sin necesidad de reemplazamiento del SAE.

Teniendo en cuenta los costes que implican ambos parámetros deberán ser añadidos al coste inicial del sistema de almacenamiento, además del coste de funcionamiento para así sumar el coste total que poseerá el sistema de almacenamiento.

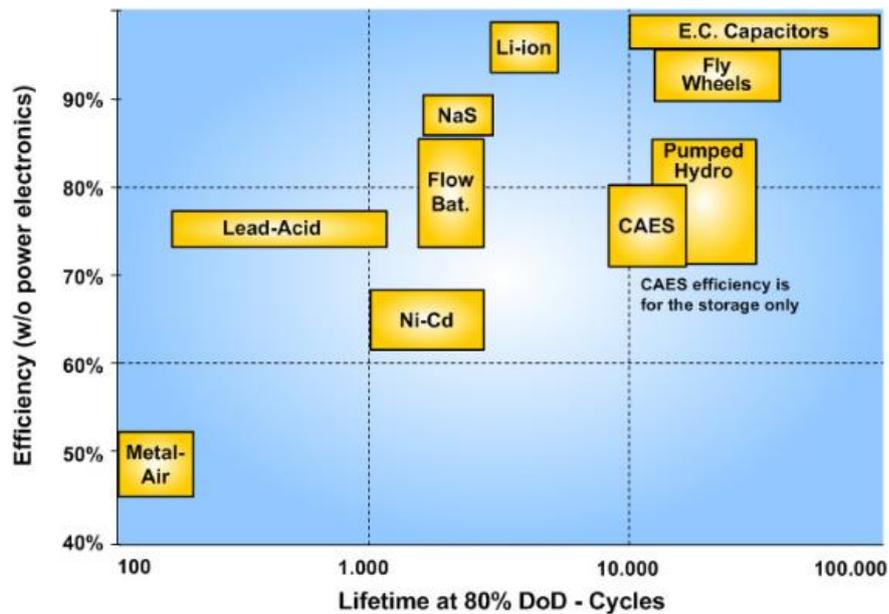


Imagen 15. Almacenamiento según eficiencia y ciclabilidad.

4.1 Almacenamiento biológico

4.1.1 Introducción

Los sistemas de almacenamiento biológico son además fuentes de energía. Son considerados sistemas de almacenamiento ya que es posible almacenar la materia prima para una posterior conversión en otro tipo de energía. Es necesario diferenciar entre dos tipos de almacenamiento biológico:

- Almacenamiento biológico renovable, el cual incluye biomasa, residuos sólidos urbanos, residuos forestales y agrícolas. Este tipo de almacenamiento tiene un tiempo de almacenamiento mucho menor que el de los combustibles fósiles, ya que es materia que se degrada rápidamente. Tendremos por tanto un sistema de almacenamiento a corto plazo.
- Almacenamiento biológico no renovable. Este tipo incluye el petróleo, el gas natural y el carbón. Constituyen también un tipo de almacenamiento biológico ya que tienen un origen animal y vegetal que durante miles de años se ha ido transformando y ha dado lugar a los combustibles fósiles. Por lo tanto estamos ante un sistema de almacenamiento a largo plazo, ya que permanecerá inalterable durante muy largos periodos de tiempo y podrá ser utilizado cuando sea conveniente.

Ambos tipos de almacenamiento están basados en la energía que acumulan en enlaces químicos que forman la materia, la cual es liberada en la combustión u otros procesos. Esta forma de energía tiene una nobleza menor que la energía cinética o potencial, aunque también es elevada. La gran diferencia entre ambos es que el almacenamiento biológico renovable podemos producirlo en la medida en la que sea posible, mientras que sobre el almacenamiento biológico no renovable los últimos estudios estiman que las reservas de petróleo se acaben en aproximadamente 50 años, las de gas natural en 60 años y las de carbón en 200 (duración variable según opiniones de los expertos, debido a que hay yacimientos que no se pueden explotar actualmente por falta de rentabilidad económica o por estar en una zona protegida, además del creciente impulso de las energías alternativas).

4.1.2 Biomasa

4.1.2.1 Introducción.

La definición utilizada por las directivas europeas es la siguiente:

«Biomasa es la fracción biodegradable de productos, deshechos y residuos de la agricultura (incluyendo sustancias vegetales y animales), silvicultura e industrias relacionadas, así como la fracción biodegradable de los residuos municipales e industriales». [3]

La energía de la biomasa proviene en última instancia de la energía solar y además constituye el mayor sistema de almacenamiento energético que existe, superando ampliamente a cualquier otro tipo, aunque tenga una caducidad debido a su componente biológico. Además la biomasa no es un vector energético, sino que es una fuente de energía disponible para su utilización sin necesidad, en algunos casos, de tratamiento.

Hemos de diferenciar dos términos relacionados con la biomasa:

- La biomasa tradicional consiste principalmente en leña que se obtiene sin ningún tipo de transacción comercial (presente principalmente en países subdesarrollados y en vías de desarrollo).
- La biomasa moderna, que se caracteriza por las transacciones en el mercado, por poseer una eficiencia más elevada, no causa problemas de salud si está adecuadamente tratada, y es utilizada principalmente para la generación de electricidad, calor, combustibles o refrigeración. Cuando se habla de biomasa en los países de la OCDE se refiere a este segundo tipo de biomasa.

El ser humano ha utilizado la biomasa como una fuente de energía denominado como biocombustible, con potencial importancia en países en vías de desarrollo.

Hasta después de la revolución industrial (finales del siglo XIX) la biomasa fue la principal fuente de energía y actualmente representa una muy significativa cifra en países subdesarrollados y en vías de desarrollo (en algunos países pobres esta cifra llega al 90% en la actualidad, según datos del Fondo de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)). En países como Asia, Latinoamérica y África es la principal fuente de energía. En países económicamente desarrollados el porcentaje de biomasa utilizado como fuente de energía es muy bajo comparado con el resto, pero se ha de resaltar que esta biomasa procede de procesos en su mayoría de elaboración sostenible.

Este sistema de almacenamiento permite ahorrar dinero, contribuye a la sostenibilidad, es capaz de reducir el riesgo de incendios, ect. La creciente utilización de biomasa en países desarrollados y en vías de desarrollo es debida principalmente al aumento de la población, cambio en las formas más primitivas de uso energético, aumento de la eficiencia energética, además de para ayudar a frenar el cambio climático si se gestiona adecuadamente. El problema de utilización de biomasa en países subdesarrollados o en vías de desarrollo, debido a la falta de una planificación sostenible, es que la mayoría de la biomasa utilizada procede de leña.

4.1.2.2 Tipos de biomasa.

- **Biomasa sólida:** constituye la materia orgánica animal o vegetal. Dependiendo de la utilización que le demos a la misma la biomasa sólida puede clasificarse a su vez en:
 - **Primaria:** está formada por cultivos energéticos de biomasa que serán utilizados única y exclusivamente para este fin, la producción de energía.
 - **Residual o secundaria:** está formada por residuos de la silvicultura, residuos agrícolas de diferentes tipos (leñosos, herbáceos) y residuos industriales orgánicos.
- **Biogás:** el biogás se obtiene gracias al proceso de fermentación anaerobia de residuos orgánicos denominado como metanización. También puede ser obtenido por el proceso conocido como desgasificación, en el que los RSU son depositados en vertederos.

Como usos del biogás podemos destacar la generación de calor y electricidad en una caldera, utilización en pilas de combustible (previamente tratado), generación de electricidad gracias a motores y turbina, utilización como

combustible o ser el material base para síntesis de metanol o gas natural licuado.

- Fracción Orgánica de Residuos Sólidos urbanos (FORSU): son procedentes de residuos orgánicos de jardines y parques, de cocinas y alimentación en las viviendas, bares, restaurantes, tratamiento de alimentos, etc. La contribución de este tipo de biomasa como energía es a través de la incineración.
- Biocarburantes: son combustibles líquidos con origen biológico. Son utilizados para reemplazar al petróleo en los casos que sea posible utilizando únicamente biocarburantes, o combinándolo con el gasóleo o gasolina.

4.1.2.3 Almacenamiento de biomasa.

Se hará una breve reseña en este apartado sobre los requisitos fundamentales para el almacenamiento de biocombustibles sólidos, que son los que tienen una importancia mayor para su producción en viviendas o edificios públicos, con los que puede interaccionar el usuario. Los biocombustibles líquidos por lo general serán producidos en grandes plantas y almacenados de modo muy similar al petróleo.

Existen una serie de requisitos obligatorios que requieren los sistemas de almacenamiento de biocombustibles sólidos expuestos en el Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios, RITE (2007).

En lo referente al lugar de almacenamiento, deberá ser un lugar únicamente destinado a este uso sin excepción, y podrá hallarse en el interior o en el exterior del edificio. En el caso de almacenamiento exterior, este podrá ser construido en la superficie o bajo. Según el suministro y distribución de biocombustible, el tamaño de la caldera y almacén y almacenamiento anual de biomasa que se vaya a necesitar será elegido el volumen y el tipo de sistema de almacenamiento. Como dato se puede aportar que el mínimo tamaño exigido para el caso de que el edificio sea de nueva construcción es aquel que pueda almacenar biomasa necesaria para cubrir las necesidades de las calderas con una potencia $P \geq 70 \text{ kW}$ durante dos semanas.

La forma de almacenar el biocombustible tiene repercusiones directas en el transporte utilizado y en los sistemas de suministro, siendo diferentes dependiendo de si el almacenamiento es superficial o subterráneo.

4.1.2.4 Costes de la biomasa.

Para hablar de los costes de la biomasa se debe hacer referencia a la materia prima necesaria, el suministro de dicha materia, combustibles y procesos de conversión de la biomasa en energía. Todos estos factores estarán reflejados en los costes de producción, aunque debido a su extensión se omitirán en este trabajo.

Costes de las materias primas:

Se incluirán en el coste de las materias primas el aprovisionamiento de semillas y plantones, posesión de la tierra, su labranza, cosecha, fertilización de la misma y el costo de los pesticidas.

Cadenas de suministro:

Un inconveniente de la biomasa frente a los combustibles fósiles es la menor densidad de energía que esta posee, por lo tanto se necesita mayor espacio para almacenarla, transportarla, y mayor espacio para su tratamiento para la misma cantidad de energía producida. Entre el 20 y 50% de los costes totales de producción de energía suponen los costes logísticos de pre-tratamiento, almacenamiento y transporte hasta la planta donde se transforma la biomasa en energía aprovechable.

Es posible un ahorro en las cadenas de suministro de un 20% si la biomasa se produce en cultivos energéticos, ya que es posible especializar la producción, las mecánicas, etc.

Costes de la transformación de la biomasa en energía.

Los costes de producción de energía a partir de biomasa vienen dados por el coste de la inversión y operación, mantenimiento de la planta y eficiencia de la misma, tiempo de vida estimado de la planta y su tamaño.

Los mayores costes de producción provienen de plantas de incineración de RSU, mientras que los menores costes pertenecen a la co-combustión, donde se prepara la biomasa para su inyección a la caldera de carbón. Estos costes son referidos a costes de inversión y operación y mantenimiento. En cuanto al tratamiento del biogás, es menos costoso producir a partir de biomasa procedente de vertederos que a partir de residuos agrícolas.

Coste normalizado de energía (LCOE)

Según la publicación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en 2011 existen actualmente sistemas de bioenergía que pueden hacer la competencia a los combustibles fósiles, aunque los costes de producción de energía son muy variables dependiendo de la región, tipo de conversión o tipo de biomasa.

Dependiendo del país y de la función de utilización de la energía tendremos un precio u otro por kWh consumido, por lo que será bastante variable.

4.1.2.5 Emisiones producidas.

En lo referente a emisiones, en el documento de European Comisión (2010) se resaltan las menores emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero utilizando biomasa frente a combustibles fósiles e incluso frente a la utilización de otros tipos de energías renovables. Las aplicaciones energéticas más comunes de biomasa según este documento son capaces de reducir actualmente entre un 55-98% de las emisiones de CO₂, comparado con los mismos usos si se utilizan combustibles fósiles, siempre y cuando la producción de esta biomasa no genere estragos en la tierra de la que se obtiene. Los gases de efecto invernadero se reducen en un porcentaje mayor al 80% cuando la biomasa procede de residuos agrícolas o forestales, comparando igualmente con la utilización de combustibles fósiles para los mismos fines.

4.1.2.6 Resumen de características.

Se expondrán a continuación las características más relevantes de este SAE:

- Posibilidad de almacenamiento a gran escala.
- Fácil de almacenar.
- Almacenamiento de energía a corto plazo.
- Puede actuar como sumidero de CO₂.
- Mal gestionada produce pérdida de biodiversidad.
- Conflicto de producción de biomasa con otras actividades agrícolas.
- Baja eficiencia de la fotosíntesis.
- Tecnología no madura.
- Altos costes de producción, generando escasos beneficios.

Para información más detallada de la biomasa, acerca de su producción, costes, tipos de biomasa, líneas futuras, etc, consultar referencia [25].

4.1.2.7 Líneas futuras.

¿Por qué razón la biomasa no alcanza todo su potencial actualmente? Primero, la biomasa no se presenta de forma muy rentable para muchos negocios o aplicaciones

ya que en muchas ocasiones el beneficio es muy pequeño, y segundo, la falta de inversores a largo plazo debido probablemente al potencial de la biomasa como almacenamiento de energía y fuente de energía renovable, el desconocimiento de la biomasa como almacenamiento de energía renovable supone el mayor obstáculo. Es cierto que la eficiencia de conversión de la energía solar en biomasa es baja, aproximadamente del 0.1%, sin embargo, a gran escala esto supone una cantidad de energía masiva.

Muy posiblemente el consumo global de biomasa aumente y así lo determinan las previsiones de los expertos, pero debemos recordar que la biomasa tiene también grandes limitaciones, como son la enorme cantidad de agua necesaria para su producción y la baja eficiencia de la fotosíntesis. En numerosas ocasiones la producción de biomasa entra en conflicto con otros posibles usos de la tierra, ya sea producción de alimentos o protección de espacios naturales. Esto podría considerarse un factor muy importante de desequilibrio ecológico.

La previsión de la situación de la biomasa en un futuro según el IPCC estima que producción mundial estaría entre un 25 y un 46% de la energía total producida en el año 2100. Además, remarca que el potencial técnico de la biomasa futuro depende de diferentes factores que son desconocidos, tales como el desarrollo tecnológico y económico, la población, demanda de alimentos y piensos y desarrollo de la agricultura. Otros factores reseñables son la relación entre el cambio climático con la utilización de la tierra, posible pérdida de biodiversidad y las consecuencias relacionadas con la falta de agua y degradación del terreno. Según sus estudios tomarán una gran relevancia la utilización de residuos agrícolas y procedentes de la silvicultura.

A pesar de estas adversidades, la utilización de biomasa podría alcanzar el rango de utilización de esta para producir energía de 100 a 300 EJ/año (actualmente es de 50EJ/año).

European Climate Fundation (2010) expuso el gran potencial que posee la biomasa refiriéndose a la reducción de los costes para su utilización en la generación de energía y calor. Según esta organización, la biomasa puede ser considerada una fuente de energía renovable competitiva, pero no posee aún una tecnología madura, necesita todavía un margen de desarrollo importante.

A modo de resumen, se expondrán las condiciones que deberían darse para el adecuado desarrollo de este sistema de almacenamiento y que la producción de la biomasa sea sostenible:

- El equilibrio energético total debe ser positivo, incluyendo en este la producción, transformación de los biocombustibles y su transporte.
- La producción de biocombustibles no puede entrar en conflicto con recursos esenciales como el agua o el suelo, produciendo así desequilibrios naturales.

- La producción de biocombustibles no debe competir con la producción de alimentos.
- Desarrollo de cultivos más eficientes que los que existen actualmente.
- La utilización como biomasa con fin energético la parte que no sea utilizada para el consumo humano.
- Es importante que para la producción de biomasa se utilicen especies de plantas que puedan ser rentables en tierras con escasez de agua o tierras marginales.

4.1.3 Combustibles fósiles

También los combustibles fósiles son biomasa que a lo largo de millones de años se ha ido transformando, aumentando su densidad de energía. Estos presentan una serie de ventajas frente a la biomasa: como se ha referenciado previamente, la densidad energética es mayor, por lo que será más fácil transportarlos (para una idéntica cantidad de energía liberada en la combustión necesitaremos una menor masa de combustibles fósiles). Además de esta ventaja se añade la estabilidad en el tiempo, lo que facilita su disponibilidad.

En la imagen 3 de este documento se puede observar ver también el consumo en España de ese mismo año de petróleo (42.9%), gas natural (19.9%) y carbón (11.6%), lo que muestra la clarísima dependencia existente con los recursos no renovables.

En la siguiente imagen se aprecia ver la evolución de consumo de las diferentes fuentes de energía a nivel mundial a lo largo de estas últimas décadas:

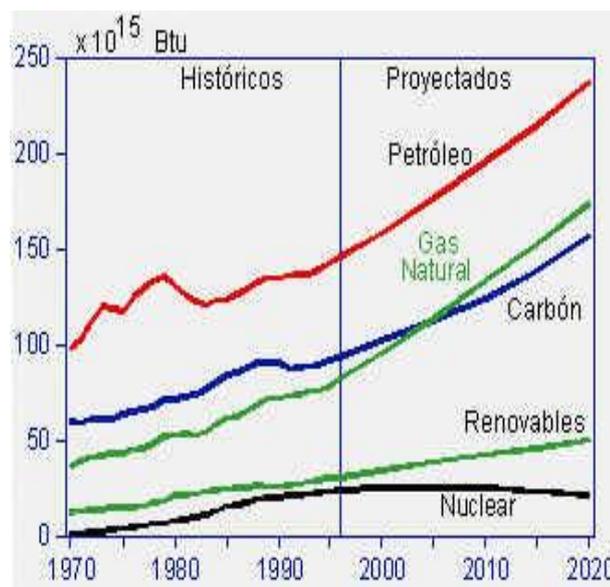


Imagen 16. Evolución de las diferentes fuentes de energía.

Además las técnicas de tratamiento de dichos combustibles, su forma de transporte y su utilización están extendidas por todo el mundo. Se han perfeccionado estos métodos a lo largo de todos estos años, desde que empezó a utilizarse como principal forma de energía, y su abuso ha sido el causante del calentamiento global debido a la emisión de gases de efecto invernadero.

Es posible combinarlos con fuentes de energía alternativa, como por ejemplo los sistemas de molinos eólicos híbridos, pero igualmente no fomentan el desarrollo de las energías renovables ni el resto de SAE. Aunque han sido sumamente relevantes para el desarrollo alcanzado actualmente, no tienen un protagonismo especial como modo de almacenamiento de energía. Debido a ello, se expondrá nada más sobre los combustibles fósiles, ya que no es el objetivo del trabajo analizar en profundidad este apartado.

Para más información consultar la referencia [24].

4.2 Almacenamiento mecánico

4.2.1 Aire comprimido

4.2.1.1 *Introducción.*

El almacenamiento de energía mediante aire comprimido o CAES (Compressed Air Energy Storage) consiste en almacenar aire a altas presiones de 60-70 bar en cubículos bajo tierra. Dicho aire se presurizará de forma progresiva con enfriamientos intermedios en el proceso para lograr un mayor rendimiento de energía en periodos donde se posea energía excedente. La compresión de aire se realizará normalmente en las horas de bajo consumo (horas valle) para después producir energía en las horas pico.

En la mayoría de ocasiones estos compartimentos donde se almacena el aire son antiguas minas, pozos petrolíferos o de gas natural o acuíferos, lo cual permite un almacenaje de aire masivo y sin los enormes costes que supondrían la realización del cubículo subterráneo.

4.2.1.2 *Tipos de proceso.*

Se distinguen tres tipos de procesos que son utilizados para el almacenamiento de aire comprimido, a saber:

- CAES diabático: gracias a la combustión de gas natural, carbón, petróleo, etc, el aire comprimido aumenta su temperatura. Podemos calentar el aire o almacenar dicho calor en otros medios (ej. Sales fundidas).
El aire se expandirá debido a este aumento de calor y se hará atravesar una turbina, con la cual se obtendrá la energía eléctrica. Con este método se alcanzan rendimientos $\eta \geq 75\%$ [4] y la energía producida será totalmente destinada a la producción eléctrica, nada para la compresión del aire. Este factor limita el rendimiento de la turbina de gas.
- CAES adiabático sin emisiones: en este caso el aire será calentado gracias a calor extraído al aire en la compresión, por ello es necesario un sist. De almacenamiento térmico.
El aire es comprimido a 10-20 MPa y calentado a 650°C, por lo tanto es necesario utilizar un sistema de compresor adiabático, además de turbinas de expansión con un tiempo de respuesta bajo. Este tipo de almacenamiento posee un rendimiento de $\eta \approx 70\%$ [5].
- CAES isoterma: la compresión y expansión del aire se realizan a temperatura constante gracias a que se intercambia calor con el ambiente. Este sistema es ideal, ya que no pueden evitarse las pérdidas de calor.

4.1.2.3 Tipología y componentes.

Almacenamiento a gran escala.

Se ha de destacar que el CAES únicamente es válido tanto para almacenaje de grandes cantidades de energía como para pequeños usos. Sin embargo, solo el almacenamiento de hidroelectricidad bombeada puede equipararse en potencial de almacenamiento en términos masivos. La capacidad de almacenaje varía entre aproximadamente 50 -330 MW y es considerado un sistema de almacenamiento a largo plazo (superior a un año y con pérdidas reducidas).

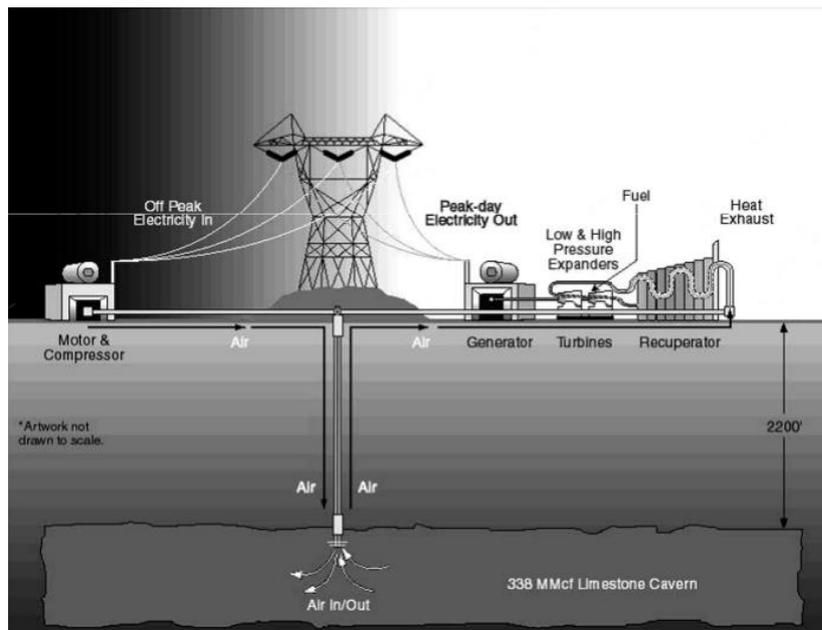


Imagen 17. Esquema almacenamiento de aire comprimido.

Tal y como se puede apreciar en la imagen, el CAES de gran escala está formado principalmente por: motor gracias a la cual comprimimos el aire, un generador que nos permitirá generar la electricidad producida por las turbinas, un recuperador de calor, tren de turbinas (de alta y baja presión), equipos de control y equipos auxiliares.

Almacenamiento a pequeña escala.

Este sistema, denominado micro-CAES, no necesita grandes cámaras para almacenar el aire comprimido establece esa dependencia de accidentes geográficos. Se utilizarán depósitos mucho menores de forma que pueda establecerse una red de energía distribuida. La gran ventaja de los micro-CAES es que permite hibridación con otros sistemas de energía distribuidos.

Las grandes diferencias con el sistema de almacenamiento masivo son que no es posible realizar el proceso de forma adiabática debido al volumen mucho menor de la cámara y que las presiones que necesita dicha cámara son mayores.

4.1.2.4 Costes del CAES.

Para el caso de almacenamiento masivo es muy complicado establecer el coste de almacenamiento o de producción de energía de un CAES, ya que intervienen muchas variables: tamaño de la planta, cantidad de aire almacenado, tipos de turbinas, motores,

compresores, etc. Lo que sí podemos establecer es que cuanto mayor sea la planta, más ahorro energético conseguiremos a corto y largo plazo.

El fabricante Silvent nos proporciona un ejemplo aproximado del coste de producción con unos determinados componentes:

Tabla 3. Costes del CAES de una planta específica.

Componentes	Valor
Compresor helicoidal	6.080 l/min
Motor	37 kW
Coste de kWh	≈0.112€
Gasto eléctrico/gasto total	70%
COSTE TOTAL	0.016 €/Nm ³

Para la construcción de un CAES de almacenamiento masivo es necesaria inversión inicial, alrededor de 41.200.000€ en España [6], en el cual se incluyen los equipos y creación de la cavidad.

Para establecer un valor general, el almacenamiento de una planta entre 50-300MW supone un coste estimado de 350-450€/kW actualmente [7] y 9-13 €/kWh [8]. Los costes de almacenamiento de los CAES son muy bajos, debido sobre todo a su almacenamiento masivo, pero hay que tener en cuenta la inversión inicial que supone, sobre todo si no se almacenará el aire en una cavidad, sino en un depósito.

4.1.2.5 Resumen de características.

A continuación se presentarán las principales características de este método de almacenamiento:

- Muy beneficioso al combinarlo con fuentes de energía renovables (ej. eólica, solar).
- Posibilidad de almacenamiento masivo.
- El coste es rentable a corto y largo plazo.
- Alta velocidad de respuesta.
- El almacenamiento está limitado a la situación geográfica.
- La compresión necesita una gran cantidad de energía para llevarse a cabo.
- En las turbinas de gas se generan emisiones de CO₂.
- Pérdidas entre 20-50% en funcionamiento normal.
- El aire comprimido es uno de los vectores energéticos más caros de la industria.
- Es una tecnología no madura.

- Requiere cámaras de almacenamiento selladas.

4.1.2.6 Líneas futuras.

Las plantas CAES tendrán posiblemente tengan un potencial futuro debido a que tienen capacidad de almacenamiento de energía de forma masiva, lo cual siempre reduce los costes. Sin embargo, será sobre todo esa sinergia que logra con otros sistemas de producción de energías alternativas uno de los factores claves para su desarrollo, tales como la generación eólica. El almacenamiento de aire comprimido puede tener un enfoque modular, lo que puede ser muy beneficioso si se combina con las estaciones de producción de energía, aumentando así la eficiencia de los mismos.

Además, los gobiernos de los países están cada vez más implicados en la conservación del medio ambiente, fijándose principalmente en las plantas adiabáticas, con las cuales se reducen las emisiones de CO₂ (aun con el inconveniente de que es una tecnología poco madura y mucho más cara que el CAES convencional). Nuevos proyectos prácticos se han desarrollado en Alemania y EE.UU. de plantas diabáticas con el fin de que su funcionamiento ayude al desarrollo de diferentes plantas de CAES.

Sin embargo, la opción más beneficiosa, almacenamiento a gran escala, posee el gran inconveniente geográfico, dependiendo totalmente de la situación de la cavidad. Es por esta razón que se están investigando diferentes mecanismos, componentes diversos y recursos naturales diversos para reducir el costo total. Además se están probando diferentes cámaras, subterráneas y terrestres, para determinar su almacenamiento.

4.2.2 Volante de inercia

4.2.2.1 Introducción.

El volante de inercia, también conocido como batería mecánica, es un elemento capaz de almacenar la energía en forma de cinética mediante una rotación, la cual será liberada en el momento que sea necesario. En la antigüedad se utilizaba el volante de inercia en los tornos que moldean arcilla para mantener una velocidad constante, y fue a partir de la revolución industrial cuando se empezaron a emplear en automóviles, prensas, trenes, etc.

4.2.2.2 Funcionamiento y componentes.

Los volantes se cargan y descargan gracias a la acción de una máquina eléctrica que actúa como motor o generador y gracias a esta máquina y utilizando la energía proporcionada por la red eléctrica provocamos el movimiento del rotor del volante hasta alcanzar su velocidad nominal (proceso de carga). Después la energía mecánica almacenada se transformará en el momento de su utilización a energía eléctrica mediante el generador, disminuyendo en el proceso la velocidad del rotor del volante hasta su valor mínimo de diseño. Acto seguido se transformará a corriente alterna mediante un inversor y un sistema de control se encargará de controlar los valores de utilización.

Además existe un máximo de energía que podemos almacenar, la cual estará condicionada a la resistencia a la tracción del material con el que esté construido el volante.

Se pueden ver los elementos indispensables para la aplicación de un volante de inercia en la imagen:

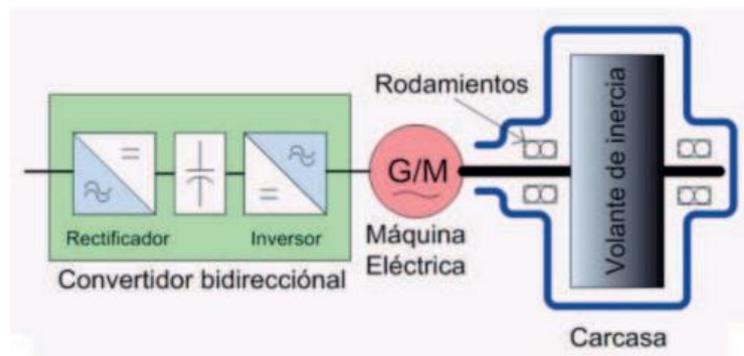


Imagen 18. Esquema componentes volante de inercia.

Tabla 4. Componentes de un volante de inercia.

Componentes	Función
Volante de inercia	Almacenar energía y liberarla para un uso posterior
Máquina eléctrica (generador/motor)	Convertir la energía eléctrica en mecánica y viceversa. Normalmente se utilizan máquinas asíncronas.
Convertidores AD/DC y DC/AC	Permite la circulación de la energía en ambos sentidos.
Electrónica de control	Controlar la energía de potencia y de la instrumentación auxiliar, tales como alarmas, monitorización, etc)
Rodamientos	Permitir el movimiento relativo y soportar cargas del eje. Los rodamientos convencionales necesitan lubricación y mantenimiento, mientras que los magnéticos no necesitan ninguna de las anteriores y son idóneos para trabajar en vacío total, además tienen menos pérdidas.
Carcasa	Aislamiento del volante. Debe resistir las tensiones producidas por la fuerza centrífuga del mismo.
Bomba de vacío (opcional en volantes de baja velocidad)	Reducir las pérdidas aerodinámicas. También es posible reducir las pérdidas utilizando un gas menos denso que el aire, como el helio.

4.2.2.3 Tipología

En la siguiente tabla se muestran las características de las dos modalidades de volante de inercia que existen, volante de inercia de bajas y altas velocidades (pequeña y gran escala):

Tabla 5. Tipos de volante de inercia.

Características	Velocidades Bajas	Velocidades Altas
Rango de velocidad	$<6 \cdot 10^3$ rpm	10^4 - 10^5 rpm
Material del volante de inercia	Metales	Materiales compuestos
Tipo de máquina eléctrica	Asíncrona, de imanes permanentes y de reluctancia	De imanes permanentes y de reluctancia
Integración del volante y la máquina eléctrica	Sin integración o con integración parcial	Integración total o parcial
Atmósfera de confinamiento	Vacío parcial o gas ligero	Vacío total
Peso de la carcasa	2*Peso volante	$\frac{1}{2}$ * peso volante
Tipo de rodamientos	Mecánicos o mixtos (mecánicos y magnéticos)	Magnéticos
Principales aplicaciones	Estacionarias: calidad de la energía	Móviles: tracción e industria aeroespacial

4.2.2.4 Materiales.

Los recientes avances en investigación de materiales permitieron reavivar el interés del volante como un SAE. Ya que la elección del material con el que está fabricado el rotor es un factor crítico, existen dos clases de volantes de inercia en base a su composición:

- Rotor de composite avanzado, como grafito o fibra de carbono. Estos son los más avanzados y tienen un precio mucho mayor. Estos materiales son muy resistentes a esfuerzos mecánicos y poseen baja densidad, lo que los hace idóneos para esta función.
- Rotor de acero. Este modelo tradicional puede ser utilizado para bajas velocidades con grandes diámetros, bajas potencias y densidad de energía, además de volantes para altas prestaciones, por lo que es muy versátil. Se debe trabajar con aceros poco densos y posee el riesgo de rotura (dispersión de fragmentos).

Cabe destacar que los volantes fabricados con metales son mucho más económicos y el material está disponible en todos los países del mundo, mientras que la fabricación de volantes de inercia con materiales compuestos requiere gran especialización y su costo se eleva mucho, del orden de 20 a 30 veces superior.

4.2.2.5 Aplicaciones.

Forman parte de su ámbito de aplicación actividades de calidad de energía (regulación de frecuencia, sistemas híbridos y sistemas de alimentación ininterrumpida), industria del transporte (vehículos híbridos y catenarias de trenes), industria aeroespacial (satélites y catapultas en portaviones). Actualmente se está investigando y desarrollando para ampliar el campo de utilización del volante de inercia en actividades comerciales.

Sistemas de alimentación ininterrumpida:

Son el campo en el que mayor éxito se han implantado los volantes de inercia debido a la alta fiabilidad. El 97% de los cortes en el suministro eléctrico tiene una duración inferior a 3 segundos [9] y además el 80% de ellos con una duración inferior a 1 segundo [10]. Debido a estas características de los cortes de suministro, la utilización de este tipo de sistema de almacenamiento es idóneo, ya que puede aportar energía almacenada durante unos 15 segundos hasta que pueda iniciarse el generador diésel, el cual tarda alrededor de 10 segundos. Gracias a este generador el sistema podrá funcionar durante horas hasta que el suministro eléctrico se restablezca.

Regulación de frecuencia:

La potencia generada debe ser igual a la demandada en cada momento, y para ello es necesario mantener constante la frecuencia. Como es conocido, la frecuencia en Europa es de 50Hz y la de América de 60Hz. Por lo tanto, si en algún momento hay se produce un desequilibrio entre potencia consumida y demandada debemos utilizar algún sistema que nos permita dar solución a este problema. Una de estas posibles soluciones son los volantes de inercia, muy adecuados a este fin debido a sus características de admisión y entrega de energía.

Sistemas híbridos:

Los volantes de inercia son también empleados en sistemas que combinan generadores diésel con turbinas eólicas. El generador diésel se activará cuando la potencia entregada por la turbina eólica no sea suficiente debido a la falta de viento. Sin embargo, la disminución de utilización de combustible es menor de la esperada, ya que se consume hasta un 40% del caudal nominal de combustible [11] aun cuando no tengamos carga conectada. Es aquí donde entra en juego el volante de inercia, con el cual se almacena energía cuando exista una cantidad suficiente de viento y utilizarla más adelante, con lo que evitaremos el arranque y la parada del generador diésel. De esta forma, se ahorra combustible y alarga la vida útil del generador.

Vehículos híbridos:

Mientras que en un vehículo tradicional necesita sobredimensionar su motor para poder hacer frente a la peor situación de aceleración, lo cual es altamente ineficiente, un vehículo que incluya un volante de inercia permitirá reducir el sobredimensionamiento y el consumo. En los vehículos híbridos se incluye un volante de inercia para absorber energía en las frenadas y devolverla en la aceleración posterior (la energía podrá ser almacenada en baterías o en ultracondensadores). Este sistema se conoce como frenado regenerativo y ayuda a reducir el consumo de combustible y a reducir las emisiones de gases contaminantes con ello. Además puede ser utilizado tanto en automóviles como en transporte público.

Catenarias de trenes:

Al igual que la aplicación anterior, el volante de inercia almacenará la energía que se produce durante la frenada del tren, y se devolverá en el arranque. El volante reduce la energía consumida y el consumo de potencia es más regular. Este caso es igualmente aplicable a por ejemplo ascensores que se utilizan en grandes almacenes o para montacargas en las minas.

Industria aeroespacial:

La alimentación de los satélites se produce gracias a paneles solares instalados en el mismo. El inconveniente que presentan es que hay periodos de tiempo en que el satélite no recibe luz solar. Hasta hace poco, se utilizaban baterías para suplir esta carencia, aunque poco a poco los volantes de inercia se están utilizando más, debido a la reducción de masa y volumen comparado con las baterías, incrementa la vida útil hasta diez veces [10].

Encontramos empresas que satisfacen esta necesidad Flywheel Energy Systems Inc o como Tribología Systems Inc. (esta última también suministra volantes de inercia para transporte, servicios energéticos y empresas de fabricación).

Aplicaciones comerciales:

Existen en la actualidad más de doce empresas que fabrican volantes de inercia con fines comerciales. Algunos de los más famosos son Elytt Energy, ActivePower, BeaconPower, Enercon, Piller o Caterpillar.

4.2.2.6 Costes.

No se conocen con precisión los costes de este tipo de almacenamiento, pero para almacenamiento a gran escala supone aproximadamente 140-370€/kWh [7] y 80 – 700 €/kWh [8]. El coste de inversión inicial que supone un volante de inercia puede superar los 3000€, y será una cantidad mucho mayor dependiendo de su aplicación.

Los costes de almacenamiento de los volantes de inercia a pequeña escala (p.e. para vehículos) no serán considerados, ya que son las marcas de vehículos los propios fabricantes y sus precios son variables, aunque pueden encontrarse multitud de ellos en venta por internet. No existen precios de fabricantes aún para el almacenamiento energético en volantes de inercia a pequeña escala. Los de pequeña escala (con una utilidad diferente al puro almacenamiento energético) tendrán un precio también variable dependiendo de su aplicación, podemos encontrar volantes de inercia desde 10€ hasta miles de euros.

4.2.2.7 Resumen de características

Como conclusión se resumirán las principales ventajas e inconvenientes que poseen los volantes de inercia:

- Capacidad de descarga muy rápidas, mucho mayor que las baterías basadas en reacciones químicas.
- Adecuado a sistemas mecánicos con un ciclo energético no continuo.
- Mayor potencia energética entregada y absorbida que las baterías actuales (kW y MW).
- Elevada eficiencia energética (>85%).
- Muy alta ciclabilidad, independientemente de la temperatura y de la profundidad de descarga.
- Su vida útil media es de 20 años, lo que triplica el de las baterías.
- El tiempo de almacenamiento de energía es limitado.
- Alto coste para volantes fabricados para altas velocidades.
- Tecnología no madura.
- Pérdidas del 3-20% por hora.

Los volantes de inercia son el sistema de almacenamiento con mayor potencia en relación a su masa, con lo cual podrá entregar potencias muy grandes, aunque acumulará menos energía en un espacio mayor que el resto de sistemas de almacenamiento.

4.2.2.8 Proyecto Volante de Inercia (REE).

En Lanzarote, España, se ha desarrollado por parte de Red Eléctrica Española un proyecto de estabilización de frecuencia y tensión gracias a un volante de inercia. Uno de los mayores problemas cuando existe un sistema eléctrico aislado es la falta de estabilidad de la frecuencia, lo cual puede producir desconexiones automáticas de

ciertas cargas del sistema eléctrico, un efecto potencialmente indeseable. Este hecho hace necesario volver a restablecer el equilibrio entre demanda y generación. Además, estos desastres empeoran la calidad del suministro eléctrico de los demandantes.

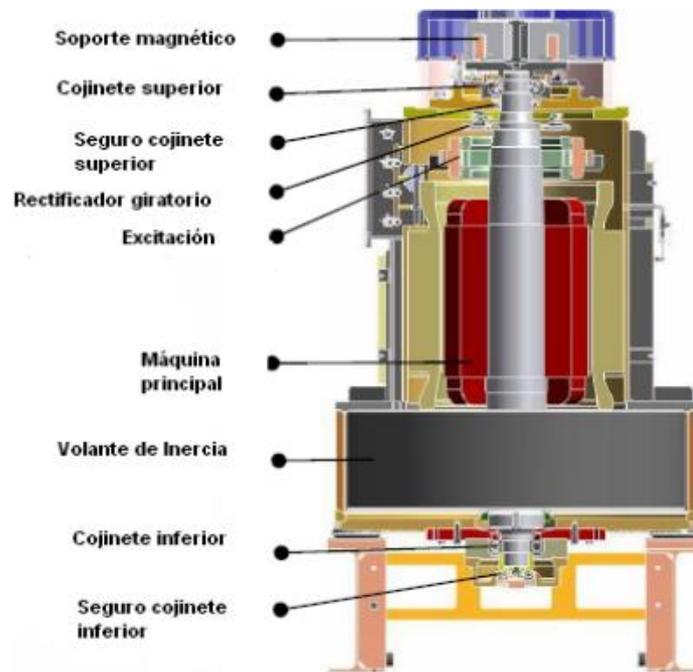


Imagen 19. Proyecto volante de inercia de REE.

La razón de utilización de un volante de inercia para solventar este problema es que es la tecnología con mayores ventajas de viabilidad económica, y debido también a que ofrece mayores ventajas de seguridad del sistema, ya que el volante de inercia es capaz de dar una gran cantidad de energía en muy poco tiempo, contribuyendo a la estabilización de la frecuencia, control de las tensiones, capacidad para ofrecer una tensión determinada a una carga, evaluar de la viabilidad técnica y económica de futuros proyectos de volantes de inercia y también la mayor posibilidad de integrar las energías renovables en el sistema eléctrico.

Elementos con los que cuenta el sistema estabilizador:

- Posición móvil: son elementos con los cuales podemos conectar las entradas y salidas de las líneas de la red eléctrica con las subestaciones.
- Transformador de tensión: transforma de altas tensiones a bajas, de la línea al volante de inercia.

- Convertidor: transforma la corriente alterna utilizada para transportar la energía por la red a corriente continua, que es con lo que trabaja el volante de inercia.
- Volante de inercia.

Tabla 6. Proyecto volante de inercia de REE.

Características del proyecto	Valor
Energía entrada/salida a la red	1.65 MW
Energía entregada por tiempo	Durante 12 aporta 18MWs
Tensión de la red sistema Fuerteventura-Lanzarote	66kV
Tensión de funcionamiento volante	440V
Velocidad de giro del rotor del volante	3600 rpm
Masa del rotor	2.9 toneladas
Presupuesto	1.5 millones de €

4.2.2.9 Líneas futuras

El volante de inercia se presenta como una forma de almacenamiento muy adecuada a la sociedad tan tecnificada en la que vivimos y que, gracias a la investigación, puede ser un método viable de almacenamiento. Se están investigando nuevos materiales y nuevas formas de producción y mecanizado para que el volante tenga una eficiencia mayor con un coste menor. Se intenta suplir con ello el principal problema actual de este SAE: el escaso desarrollo tecnológico necesita ser compensado con una bajada del precio de construcción y funcionamiento para que pueda ser competitivo (a gran escala). Por otro lado, los volantes de inercia a pequeña escala están incrementando mucho su número, gracias sobre todo a sus aplicaciones en transporte, y se prevé que este aumente exponencialmente debido al incremento de los coches eléctricos e híbridos en el mercado.

4.2.3 Bombeo hidráulico

4.2.3.1 Introducción.

El bombeo hidráulico es un sistema de almacenamiento muy desarrollado y utilizado para producción de energía a gran escala, el cual, es su único fin, y se combina muy fácilmente con sistemas eólicos, donde la energía sobrante se utiliza para revertir el agua. Para que funcione como un sistema de almacenamiento se devuelve el agua a una presa superior donde queda almacenada, sin embargo, la variabilidad de

almacenamiento interanualmente es alta, ya que depende del clima. Es necesario además tener unas reservas mínimas para el almacenamiento.

4.2.3.2 Funcionamiento y componentes.

Este SAE está basado en la acumulación de energía potencial en forma de agua almacenada que se encuentra a una cierta altura. Gracias al movimiento que provoca por su caída moverá una turbina conectada a un generador con el cual se generará electricidad.



Imagen 20. Esquema de una central hidroeléctrica de bombeo.

Tal y como se aprecia en la imagen, una estación de bombeo hidroeléctrica estará formada por:

Tabla 7. Componentes de una central hidroeléctrica de bombeo.

Componentes	Función
Presa superior	Retención del agua en la medida necesaria.
Galería de conducción	Conduce el agua hacia la tubería forzada
Tubería forzada	Conduce el agua hasta las turbinas
Chimenea de equilibrio	Regula la presión del agua circulante por los conductos.
Generador	Transforma la energía producida por el paso del agua por las turbinas en energía eléctrica.
Turbinas	La energía cinética del agua hace girar los álabes de la turbina, y se convierte en energía mecánica rotatoria.
Transformadores	Transforman la electricidad en media tensión y alta intensidad para enviarla posteriormente a la red eléctrica.
Canal de desagüe	Conducto por el que circula el agua que acaba de atravesar la turbina.
Embalse inferior	Retiene el agua utilizada para posteriormente (en ocasiones) bombear de nuevo a la presa superior y cerrar así el ciclo.

4.2.3.3 Tipología

Existen dos tipos de centrales hidroeléctricas, a saber:

- De bombeo puro: el agua procedente de la presa inferior ha de ser bombeada previamente a la superior para poder producir electricidad.
- De bombeo mixto: es posible producir electricidad sin el bombeo previo a la presa. Su funcionamiento es equivalente a una central tradicional, exceptuando a que puede almacenar energía bombeando agua a la presa superior desde la inferior.

4.2.3.4 Aplicación.

El único objetivo de este sistema de almacenamiento de energía, aunque no por ello menos importante, es el almacenamiento de agua para a posteriori producir

masivamente energía que será utilizada en los picos de demanda. Este tipo de almacenamiento es el que menos restricciones posee frente a variaciones de carga.

4.2.3.5 Costes.

Los costes de almacenamiento del bombeo hidráulico son los menores entre los diversos sistemas de almacenamiento (a gran escala) , aproximadamente 10-40 €/kWh [8] y 500-800€/kW. En este precio se tienen en cuenta el rendimiento de los motores, turbinas, diversas pérdidas, etc. El precio puede ser muy variable, ya que incluye otros factores, como su sinergia con la producción eólica o la variabilidad del precio de la electricidad. A pesar de este bajísimo precio de almacenamiento energético y su baja necesidad de mantenimiento, es necesario tener siempre en cuenta la gran inversión inicial que supone la creación de un nuevo complejo, siendo la más alta de todos los sistemas de almacenamiento de energía.

4.2.3.6 Resumen de características.

Las ventajas más importantes de las centrales hidroeléctricas como SAE son:

- Rendimientos 72-80%.
- Actualmente es la forma más rentable de almacenamiento en términos económicos.
- Larga vida.
- Bajo mantenimiento.
- Tecnología madura.

Principales inconvenientes:

- Son necesarios al menos 100m de desnivel entra ambas presas.
- Muy alta inversión inicial.
- Dificultad de emplazamiento. Depende completamente de la geografía.
- El emplazamiento suele estar ubicado en lugares aislados, con el consiguiente coste de redes de distribución y transporte.
- Producen un gran impacto ambiental.

España cuenta actualmente con 16 centrales de bombeo mixto que producen 2500MW y 8 centrales de bombeo puro de hasta 5000MW [11].Según se vio en la imagen 3, el consumo total procedente de bombeo hidroeléctrico actual en nuestro país equivale al 2.3%.

4.2.3.7 Líneas futuras

Hasta pasado el 2020 no se espera un aumento significativo en la producción de energías renovables. El programa de la UE considera que el bombeo hidráulico en España tiene una vital importancia como SAE, ya que así lo reflejan los estudios energéticos realizados.

Existe un factor de capacidad en las centrales de bombeo, el cual disminuye cuando aumentamos la potencia instalada. Por ello hay un compromiso entre ambos valores que permite recuperar el máximo de vertidos de energía renovable y a su vez ser rentable en el plano económico. Aunque existe un porcentaje de aproximadamente el 25% de energía remanente que será producida en momentos concentrados y no podrá ser almacenada ni aún con los sistemas más eficientes de bombeo hidráulico. Como una posible solución al problema la UE propone el almacenamiento distribuido en baterías de vehículos eléctricos.

De acuerdo a los resultados presentados por la comisión europea acerca del almacenamiento energético en España, las plantas de bombeo hidráulico serán un factor decisivo para aprovechar hasta un 70% de energía de procedencia renovable que de otro modo sería desperdiciada [12].

4.3 Almacenamiento térmico

4.3.1 Introducción.

La razón principal de almacenamiento de energía térmica es la misma que la del resto de formas de energía, energía que sería perdida o desaprovechada de otro modo. Pero también existen otras razones, como la de aumentar la eficiencia de los procesos. Tiene la enorme ventaja de que gracias a los materiales que se utilizan, la energía se puede transportar con facilidad.

El almacenamiento térmico se basa en métodos que incluyen desde refrigeración mediante acumulación de hielo hasta altas temperaturas (1250°C). Consiste en acumular energía en materiales que permitan retenerla y liberarla de manera controlada. Es ampliamente utilizado en fabricación, en la industria alimentaria y en la climatización de edificios. Sin embargo posee grandes problemas, como las fugas caloríficas y el establecimiento de superficies para la transmisión de calor.

Existen dos tipos de almacenamientos térmicos superficiales, conocidos como calor sensible y calor latente, y almacenamiento térmico subterráneo.

4.3.2 Calor sensible.

Consiste en el almacenamiento de energía aumentando la temperatura de un sólido o un líquido sin cambiar de fase, y la energía que se almacena es directamente proporcional a la temperatura del sistema.

Se denomina capacidad térmica a la relación que existe entre la temperatura del medio y su cambio de energía térmica. Es el agua uno de los materiales con más capacidad térmica, únicamente superado por el helio, además es económica, existe en abundancia, no es tóxica ni inflamable. Por estas razones es el medio que más se utiliza actualmente.

Usualmente se utiliza para temperaturas menores a 200°C y sus componentes son bastante baratos. Para temperaturas mayores a 500°C se utilizan metales fundidos, los cuales son baratos y no son tóxicos. Algunos de ellos son el aluminio, sodio, magnesio, plomo o estaño. Los silos de calor formados por rocas y piedras almacenan energía térmica residual o solar, tienen rendimientos del 50%. Para temperaturas de 1000-1100°C tenemos intercambiadores solares y silos de bolas refractarias, las cuales al calentarse expanden el volumen de aire y lo obligan a circular por una turbina.

Posee como inconvenientes de este tipo de almacenamiento tenemos la baja densidad energética, variaciones de volumen debido a la variación de la temperatura y es difícil conseguir a la salida una temperatura constante.

4.3.3 Calor latente.

Se basa en la energía almacenada en un cambio de fase, fusión o vaporización, mientras que en sentido inverso, con la solidificación o condensación se recupera la energía. Este método se caracteriza por tener siempre una temperatura constante.

Este método posee una densidad de energía mayor que el calor sensible. Otras ventajas destacables son que como la temperatura constante a lo largo del proceso, no tendremos variaciones de volumen, además de una extensa variabilidad en los materiales a utilizar y temperaturas de operación. Sin embargo, los materiales son más costosos que en calor sensible y es más complicado transmitir calor al medio.

Algunos de los posibles materiales a utilizar son denominados materiales de cambio de fase, los cuales necesitan gran cantidad de energía empleada con el fin de

cambio de estado, manteniendo la temperatura en este punto constante. Las sales fundidas son uno de los ejemplos más avanzados de esto, utilizadas como sistema de almacenamiento.

Una gran ventaja que tiene el almacenamiento térmico es que no sólo se limita a la utilización de cada tipo de almacenamiento por separado, sino que se pueden conjugar ambos, calor sensible y latente.

4.3.4 Almacenamiento subterráneo de energía térmica (ASET).

De sus siglas en inglés UTES (Underground Thermal Energy Storage), es una forma de almacenamiento energético, que ofrece posibilidades de ahorro energético y sinergia con la producción de fuentes de energía renovables.

Los anteriores tipos de almacenamiento se encontraban en la superficie y podían incluso transportarse. Sin embargo, es posible almacenar energía térmica de forma subterránea (frío o calor), debido a la alta capacidad calorífica del subsuelo y su buen aislamiento.

Nos permite almacenar la energía durante largos periodos de tiempo, alcanzando algunos meses. Un ejemplo de esto podría ser el almacenamiento del calor debido a la alta radiación en verano para su utilización en invierno, o el ejemplo contrario, almacenamiento de frío en invierno para ser utilizado en verano para refrigerar.

Como tipos de suelo tenemos arenas, areniscas, arcillas, gravas, etc.

4.3.5 Aplicaciones.

Calor sensible: sus principales aplicaciones son el almacenamiento de calor solar, centrales térmicas con turbinas de vapor y la climatización, siendo este último donde más extendida está su aplicación.

Calor latente: como aplicación principal tenemos la calefacción de viviendas, y no se aplica en producción de energía debido a que no existe un material que cumpla todos los requisitos para el proceso.

Almacenamiento subterráneo: almacenamiento de energía y climatización.

4.3.6 Costes.

En este apartado no serán analizados los costes que supone el almacenamiento energético, debido a su alta variabilidad dependiendo de la utilización o proyecto, los materiales utilizados, la gestión, etc. Sin embargo, algunos estudios estiman su precio en 250-2500€/kWh [13]. Se desconoce la inversión inicial necesaria para este tipo de sistema de almacenamiento, ya que su precio será muy variable según los materiales a utilizar.

4.3.7 Resumen de características.

Se nombrarán a continuación las principales características del almacenamiento térmico:

- Sinergia con las fuentes de energía renovables.
- Rendimiento muy variable dependiendo del rango de temperaturas con el que se trabaje, pero rondan el 80-90%.
- Multitud de materiales a elegir.
- Dependiendo del material y del aislamiento existirán pérdidas energéticas.
- Capacidad: hasta 1000MW.
- Tiempo de descarga: horas.
- Almacenamiento a largo plazo
- Alta ciclabilidad.
- Fácil emplazamiento en calor latente y sensible, moderado en subterráneo.
- Tecnología madura.

4.3.8 Líneas futuras.

Primero es necesario destacar que existe un predominio claro actualmente de las sales fundidas respecto del resto de materiales a utilizar (agua, hormigón, guijarros y aire, etc) debido a su buena relación eficiencia y precio, además de poder utilizarse en grandes plantas. Sin embargo, el agua como recurso de almacenamiento posee buenas cualidades, es mucho más barata y su disponibilidad también es mayor.

Se está investigando en temas de recuperación de energía, gracias precisamente, al claro desarrollo de este tipo de sistema de almacenamiento, lo cual genera un gran beneficio no solo en el plano económico debido al ahorro energético, sino también en el ambiental. Además se desarrollan multitud de proyectos alrededor de todo el mundo basados en la climatización de grandes superficies y viviendas.

4.4 Almacenamiento químico y electroquímico

4.4.1 Hidrógeno

4.4.1.1 Introducción.

El almacenamiento gracias al hidrógeno trata de, gracias a la energía eléctrica o térmica procedente de centrales térmicas, nucleares, eólicas... convertir compuestos químicos para convertirlo más adelante en energía eléctrica.

Este elemento se encuentra en grandes cantidades en nuestro planeta, aunque este no se encuentra en su estado puro. El hidrógeno es un vector de energía que puede ser obtenido de varios productos, como el gas natural, el agua o el refinado de aceites pesados. Sin embargo, la única producción considerada como limpia es la que implica su obtención a base de agua y energía procedente de fuentes renovables.

4.4.1.2 Funcionamiento y componentes.

Se trata de una transformación de la energía eléctrica en energía química en forma de hidrógeno, el cual tendrá posteriores usos.

Este SAE permite tanto el almacenamiento masivo como el almacenamiento a pequeña escala, sin embargo, es más atractiva la idea de almacenamiento masivo, debido a la reducción de costes. Como se ha dicho anteriormente, este sistema de almacenamiento puede combinarse con cualquier fuente de energía, renovable o no, además de poder utilizarse incluso como fuente de energía en sí mismo.

Componentes de la instalación:

- El elemento que almacena la energía, en este caso el hidrógeno, el cual será almacenado en cámaras totalmente selladas (superficiales o subterráneas).
- Un sistema de control de las cargas y descargas.
- Un sistema de conversión de potencia.
- Resto de sistemas ligados a éste, como puede ser la planta que genere la energía eléctrica.

4.4.1.3 Obtención del hidrógeno y almacenamiento.

Únicamente se escribirá una reseña sobre las formas de producción del hidrógeno, brevemente y sin hablar de las implicaciones que supone su producción. Para información más detallada consultar la referencia [23].

Obtención del hidrógeno:

- Procesos termoquímicos: gracias al calor solar concentrado a altas temperaturas se desarrolla un proceso endotérmico termoquímico. Una característica muy beneficiosa de este tipo es que al aumentar la temperatura de reacción, aumenta el rendimiento de la conversión (aunque también aumentan las pérdidas de calor). La eficiencia de este método es mayor que la de los dos siguientes.
- Procesos electroquímicos: se utilizan las plantas solares y/o las eólicas para la transformación gracias a un proceso electrolítico.
- Fotólisis del agua:

Almacenamiento de hidrógeno:

Actualmente existen diversas formas de almacenamiento de hidrógeno, las cuales dependen del tipo de uso que se le vaya a dar al mismo y a dificultad de ejecución. El hidrógeno es un elemento complejo de almacenar y costoso, debido a su baja densidad y alta difusividad, lo que deriva en que los contenedores deban estar perfectamente sellados.

Es posible tener almacenamiento del material en los tres estados. Debido a que su producción resulta en estado gaseoso puede pensarse que este sería el mejor modo de almacenamiento. Sin embargo, nada más lejos de la realidad el almacenamiento en estado gaseoso no es competitivo frente al resto de combustibles, porque su densidad es muy baja y por el coste que suponen los recipientes con la presión necesaria. No solo eso es costoso, sino que aproximadamente el 13% del PCI (Poder Calorífico Inferior) es consumo energético debido al almacenamiento [14].

Se suele almacenar el hidrógeno en estado líquido (criogenizado) debido a su menor volumen ocupado. Los recipientes para este almacenamiento deben estar aislados por vacío o refrigerados gracias a una doble capa con otro elemento criogenizado, por ejemplo nitrógeno. Estos sistemas son complejos y caros.

Por último, se puede almacenar el hidrógeno en estado sólido, permitiendo que sea absorbido por otro material, como hidruros metálicos o materiales muy porosos. Así se logra aumentar la densidad de almacenamiento.

4.4.1.4 Aplicaciones.

La utilidad del almacenamiento de hidrógeno se basa en la producción de energía eléctrica a partir del hidrógeno.

- Combustión de hidrógeno: se quema el hidrógeno para generar electricidad gracias a unas turbinas de gas, ciclos combinados o utilizado simplemente a modo de combustible (de motores por ejemplo). Esta aplicación tiene un potencial inconveniente: la temperatura en la llama supera los 3000°C. Como solución a este problema se puede añadir agua para controlar la temperatura alcanzada.
- Pilas de combustible de hidrógeno: se trata de la principal aplicación del hidrógeno, en el que el hidrógeno actúa como combustible en la pila, la cual genera electricidad a partir de la reacción química. Aunque la pila de combustible también funciona con combustibles fósiles, su rendimiento es mayor con hidrógeno, debido a su mayor densidad energética.

En España el caso más típico es la sobreproducción energía eólica, utilizada para producir hidrógeno de algunas de las maneras vistas anteriormente para almacenarlo posteriormente. En este punto, podrá convertirse de nuevo a electricidad como se ha descrito en este apartado o bien, utilizado como combustible.

4.4.1.5 Costes.

Un sistema de almacenamiento de hidrógeno posee un coste inicial alto, y no solo eso, sino que el coste de producción de H₂ es también alto debido a los procesos a seguir y a la pureza que es requerida del elemento. Como dato se aporta que el coste de producción del hidrógeno actualmente con una central solar a través de electrolisis: de 0.15 – 0.20 \$/KWh o 6- 8 \$/kg [15].

Sin embargo, Coste de almacenamiento es muy reducido en comparación a otros sistemas de almacenamiento: 0.2-0.5€/kWh [7]. A gran escala los costes se reducen, pero también es posible el pequeño almacenamiento (actualmente no viable económicamente). Debido a la fase de desarrollo en la que se encuentra este sistema de almacenamiento no se conoce con certeza su inversión inicial necesaria, aunque para el almacenamiento del hidrógeno en principio lo único que se requerirá es un tanque que permita almacenarlo.

4.4.1.6 Resumen de características.

A continuación se enumerarán las principales ventajas e inconvenientes del almacenamiento de energía en forma de H₂:

- Se puede producir de forma ilimitada (agua).
- Su combustión no contamina.
- Compatible con todas las energías primarias.
- Problemas de seguridad.
- Elevado coste.
- Necesidad de alta pureza del hidrógeno.
- Tiempo de respuesta entre horas y días.
- Baja eficiencia (30-50%).
- Alta densidad energética del hidrógeno.
- Amplio rango de almacenaje (desde kW hasta algunos MW).
- Es posible aplicar una construcción modular, lo que permite redimensionar el sistema.

4.4.1.7 Líneas futuras.

Este método de almacenamiento actualmente se encuentra todavía en fase de investigación, pero en un futuro puede llegar a convertirse en una forma principal de almacenamiento, pudiendo incluso utilizarse como almacenamiento intermedio.

Su lado más prometedor es la sinergia con las plantas de producción eólicas y fotovoltaicas, donde se están realizando diversos progresos. En las instalaciones que se investigan se utiliza el exceso de producción para el proceso electrolítico, y en momentos de mayor demanda respecto a la producción se utiliza el hidrógeno previamente almacenado como elemento en una celda de combustible, gracias a la cual se genera electricidad.

Y no solo eso, sino que la producción de hidrógeno gracias a fuentes de energías renovables podría aumentar hasta un punto que se impusiera el hidrógeno como fuente principal de energía. Sin embargo, actualmente nos encontramos con la barrera de ser comercialmente inviable, debido al alto coste de producción de la materia prima.

4.4.2 Pilas de combustible.

4.4.2.1 Introducción.

Las pilas de combustible son sistemas de almacenamiento electroquímicos que realizan una conversión de energía química-eléctrica, al igual que las baterías, pero con la diferencia que el combustible utilizado es reabastecido continuamente, es decir, dicho combustible procede de un tanque externo que permite un uso prolongado de este sistema, lo que le confiere una capacidad mucho mayor a la de una batería. Son la progresiva degradación de sus elementos o su erróneo funcionamiento los que reducen la vida útil de las mismas.

Los reactivos que se utilizan normalmente son el hidrógeno en el ánodo y el oxígeno en el cátodo, en el caso de una pila de hidrógeno, mientras que en las baterías, los reactivos consumidos son sólidos y cuando se agotan se recargan mediante energía eléctrica. Los productos que resultan de las reacciones de una pila de combustible son calor, electricidad y agua. También existen razones para implantar el hidrógeno como nuevo vector energético: evitar la contaminación que produce la quema de los combustibles fósiles y el carácter inagotable del hidrógeno (aunque éste no se encuentre en estado puro en la Tierra).

4.4.2.2 Funcionamiento.

La pila de combustible, a pesar de los diferentes tipos que existen, se compone de dos electrodos conductores electrónicos los cuales están separados por un electrolito conductor de iones.

El mecanismo de funcionamiento de una pila de combustible se basa en la oxidación del hidrógeno en el ánodo y la reducción del oxígeno en el cátodo, creando de esta manera una diferencia de potencial entre ambos electrodos (justo lo contrario a la reacción electrolítica). Esta tensión, se aplica a una carga conectada a la salida de la pila de combustible, generada gracias a la transferencia de cargas a través de un electrolito aislante por el cual se presenta una fluencia de iones. A diferencia de las baterías, las cuales necesitan llenar su capacidad gracias a una fuente de tensión externa, las pilas de combustible transforman de forma directa el combustible a energía eléctrica.

A continuación se muestra una imagen esquemática del funcionamiento básico de una celda de combustible.

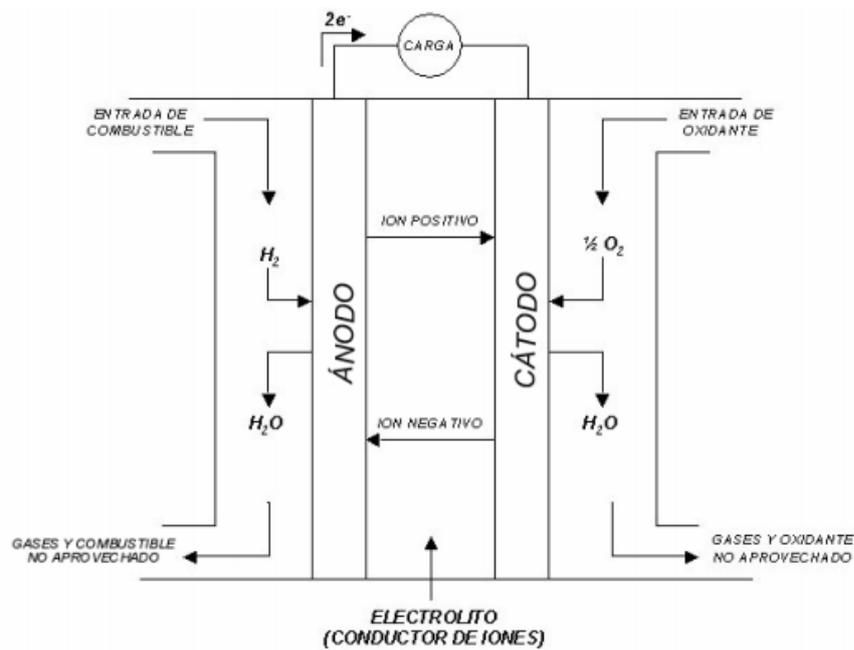


Imagen 21. Esquema de una célula de combustible.

En la imagen se muestra una unidad básica de celda de combustible, también conocida como monocelda. En ella se produce una diferencia de potencial que será después aplicado a una carga. El voltaje que es creado en la monocelda es bastante bajo (algo mayor a 1V), por lo que para obtener una mayor tensión de salida se dispondrán un conjunto de celdas conectadas en serie formando un stack.

Por otro lado, dependiendo del tipo celda se puede emplear como combustible metano o monóxido de carbono entre otros, como alternativa al hidrógeno que es actualmente muy costoso de producir y peligroso si se trata de forma inadecuada, pero dichos combustibles necesitan un reformado o purificación para el correcto funcionamiento de la celda. Sin embargo, el mayor rendimiento se alcanzará con el hidrógeno, además de que lo único que genera este combustible será agua.

Con referencia al electrolito utilizado, se tolera un nivel de pureza de hasta el 20-30%, siempre y cuando contenga hidrógeno, pero se resentirá en gran medida la eficiencia de la celda de combustible. También es posible presurizar las pilas en la entrada del elemento oxidante y el reductor consiguiendo así un aumento de la eficiencia, aunque se debe tener en cuenta los equipos que esto requiere, su peso, volumen y coste, teniendo además un consumo energético mayor.

4.4.2.3 Tipología.

Dependiendo de la tipología de la pila tendrán unos rendimientos, temperatura de operación y densidad de corriente diferentes, aunque los elementos que forman la celda serán siempre los mismos.

Las pilas de combustible se clasifican según el electrolito que se utilice y las principales son:

- PEMCF (Pilas de membrana polimérica)
- AFC (Pilas de combustible alcalinas)
- PAFC (Pilas de ácido fosfórico)
- MCFC (Pilas de carbonatos fundidos)
- DMFC (Pilas de conversión directa de metanol)
- SOFC (Pilas de óxido sólido)

Pila de combustible: membrana polimérica (PEMFC)

Como se había referenciado anteriormente, los diferentes tipos de baterías se caracterizan por su electrolito, y en este caso se contará con una membrana que realiza un intercambio de protones. Dicha membrana está fabricada en polímero (su nombre comercial es Nafion). Los protones del Nafion pueden fluir libremente del ánodo al cátodo, lo que producirá la diferencia de potencial.

Además, el único líquido almacenado en el interior de la pila es H_2O , por lo que los problemas de corrosión serán prácticamente inexistentes. Sin embargo, el mantenimiento necesario de dicha agua es crítico para el buen funcionamiento de la misma. Tendremos en este caso como combustible el hidrógeno y el oxígeno como oxidante.

Las temperaturas de funcionamiento se encuentran en un rango de hasta $120^{\circ}C$, siendo $80^{\circ}C$ el valor típico. Es necesario no superar este máximo debido que la membrana debe estar húmeda, y de no ser así, el funcionamiento no sería correcto. Este tipo de pilas de combustible posee una alta densidad energética, puede funcionar a baja temperatura y su rendimiento ronda el 60%. Otras características son una tensión de celda de aproximadamente 0.7 V si se utiliza hidrógeno como combustible y éste y el oxígeno serán presurizados en la celda.

Como principales ventajas e inconvenientes de este tipo de pilas de combustibles están la sencillez de fabricación de la misma y la baja corrosión que posee, tiene menor peso y volumen que los otros tipos (mayor densidad energética), pueden soportar altas densidades de corriente, poseen un menor coste y su peso es bastante

reducido. Además se puede emplear como electrolito hidrógeno puro o con combustibles tratados.

Por otro lado, al igual que las celdas de combustible alcalinas son muy sensibles al CO y a las impurezas, por lo que a bajas temperaturas de operación obligan la introducción de platino en su composición, lo que encarece su producción. Además exige un mantenimiento bien programado, controlando la cantidad de agua en la membrana, ya que de ello dependerá parcialmente la eficiencia de la celda. Si se quiere utilizar como electrolito combustibles reformados, es necesario saber que disminuirá el rendimiento de la instalación y existen problemas con la diferencia de temperaturas entre la temperatura de operación de la pila de combustible y la de los reformadores del combustible.

Como aplicaciones principales, tenemos que las PEMFC se pueden encontrar en automóviles y aplicaciones estacionarias. Son muy adecuadas para la primera, debido a su rapidez de arranque, relación peso/energía producida y baja sensibilidad a la orientación. También se pueden encontrar en tareas de cogeneración de energía y calor, incluso en transporte pesado, como autobuses o tranvías.

Pila de combustible: alcalinas (AFC)

Este tipo de celda de combustible fue uno de los primeros en aparecer, donde su principal objetivo de aplicación era el programa espacial de EE.UU.

Para este tipo de celda son necesarios hidrógeno y oxígeno con una pureza muy alta, ya que de otro modo, el mal funcionamiento de la misma acabaría por destruirla. En la actualidad también existen modelos capaces de funcionar gracias a aire, eso sí, adecuadamente filtrado.

Posee, al igual que las pilas alcalinas, como electrolito el hidróxido de potasio (KOH), cuya concentración será la que determine la temperatura de funcionamiento de la misma: aproximadamente el 85% de concentración en volumen para temperaturas elevadas (250°C) o entre el 35-50% para bajas temperaturas (usualmente entre 35-90°C). Además, en el caso en el que la concentración es mayor se aumenta la presión para que el electrolito no se evapore.

Como principales características tenemos una tensión en la celda de aproximadamente 0.8V, poseen un rendimiento del 60% (como máximo) y tienen un buen funcionamiento a baja temperatura. Este trabajo a baja temperatura permite un aumento de la vida útil de la pila de combustible. Poseen además baja densidad energética, lo que significa que ocuparán un mayor espacio; sin embargo, son muy económicas a la hora de fabricarlas.

Como desventaja principal está su sensibilidad a la contaminación por CO, el cual provoca el mal funcionamiento de ésta al ser absorbido por el KOH. Es por este

motivo por el que aumentan los costes, ya que son necesarios procesos de purificación. Otro inconveniente que presentan es la gran diferencia que presenta su corriente respecto a su tensión: las corrientes que circulan por ella son muy altas, mientras que la tensión suele ser mucho menor, lo que obliga a realizar conexiones serie entre las pilas de combustible.

Al igual que en las pilas de combustible de membrana polimérica dispone de un catalizador de platino para las reacciones redox en unos porcentajes previamente determinados, lo que también encarecerá su precio.

Las pilas AFC han demostrado ser estables durante un periodo de funcionamiento de más de 8000 horas, y el inconveniente del CO puede solucionarse simplemente utilizando este tipo en aplicaciones en el espacio o en el fondo del mar, pero para aplicaciones en a gran escala no son económicamente viables si no superan las 40.000 horas de funcionamiento. Aparte de las aplicaciones espaciales o submarinas también pueden ser utilizadas para transporte debido a su coste, aunque su utilización real es muy baja.

Pila de combustible: ácido fosfórico (PAFC)

Esta pila de combustible es la única que se comercializa junto con la PEMFC, y es una de las más desarrolladas actualmente. Existen más de 200 unidades que son utilizadas a día de hoy, la mayoría como pila estacionaria para generación de energía o para transporte pesado.

Está compuesta por un electrolito de ácido fosfórico (H_3PO_4) en estado líquido con una concentración del 100% y sus electrodos están formados por carbono poroso con un catalizador de platino.

Cuentan con una rendimiento de hasta el 85% cuando son utilizados para aplicaciones de generación eléctrica y de calor, pero decae al 40% cuando únicamente se dedican a la producción eléctrica. Su temperatura de trabajo se encuentra en el rango aproximado de 150-220°C. Para poder mantener estas temperaturas y garantizar la conductividad del ácido fosfórico se aplican presiones. Además, la densidad energética de estas celdas es menor a la de otras celdas de mismo peso y volumen (como la PEMFC)

Cuando se encuentran a bajas temperaturas, el ácido fosfórico presenta malas cualidades para la conducción, y el platino que sería necesario añadir para solucionar las bajas temperaturas podría ser una mala opción, ya que el monóxido de carbono lo estropearía. Sin embargo, a pesar de estas desventajas, estas celdas de combustible

gracias a su electrolito poseen alta estabilidad termoquímica y baja volatilidad del mismo, comparado con otras pilas.

Como única aplicación se considera la generación de energía y calor, aunque podría aplicarse también a transporte pesado. Su precio ronda los 3500€/kW.

Pila de combustible: carbonatos fundidos (MCFC)

En este caso el electrolito está formado por una mezcla de varios carbonatos alcalinos, como el litio, sodio y potasio, que se encuentran dentro de una matriz cerámica porosa de litio-aluminio.

Su punto de funcionamiento posee rango de temperaturas entre 600-700°C, necesaria para que la fluencia de iones sea adecuada y permite utilizar como catalizadores metales menos nobles. Alcanzar estas altas temperaturas toma algo de tiempo, por lo que no son utilizadas para aplicaciones móviles. Su rendimiento alcanza hasta el 85%, en casos en que el calor desprendido sea utilizado y no se desperdicie.

A diferencia de los casos anteriores, los electrodos no poseerán platino en su composición, sino níquel, debido a su alta temperatura. Además esta pila de combustible no necesita utilizar un gas muy puro y no le afectan las impurezas de CO, puede utilizar por ejemplo combustibles fósiles sin necesidad de ser reformados.

Como ventaja destaca que gracias a las altas temperaturas es posible emplear diversos combustibles, tales como gas de biomasa, gas natural o alcoholes. Sería además conveniente aumentar la temperatura de operación, aunque ello daría lugar a otros problemas: el paso a estado gaseoso del electrolito y la corrosión de los componentes de la pila de combustible. También es necesario resaltar que gracias a las altas temperaturas no se necesita un reformador externo para convertir el hidrógeno en una fuente de energía más densa, reduciendo con ello los costes.

Su principal desventaja es la reducción de vida útil que supone el ambiente corrosivo generado por el electrolito y las altas temperaturas, aunque a pesar de ello este tipo de pila de combustible es muy recomendada para aplicaciones de reformado de combustible, gracias su alto rendimiento y posibilidad de utilizar diversos combustibles, cuya reacción producirá gases a altas temperaturas, lo que dará ese alto rendimiento total. También es necesario recalcar que al aumentar la temperatura, el rendimiento se verá disminuido, así como su tensión de operación.

Debido a sus características, estas pilas de combustible serán utilizadas únicamente para generación eléctrica y de calor y en procesos de cogeneración.

Pila de combustible: conversión directa de metanol (DMFC)

Este tipo de pilas, en vez de funcionar con hidrógeno como las demás, lo hacen con metanol puro mezclado con vapor de agua, el cual se inyectará de forma directa al ánodo de la celda de combustible. Gracias a ello la pila no necesitará reformadores.

Estas poseen una temperatura de operación baja, entre los 60-100°C, con un rendimiento aproximado del 40%, menor que en otras pilas de combustible.

La ventaja de utilizar este combustible, es que el metanol posee una densidad energética mayor que el hidrógeno, y al encontrarse en estado líquido, es más fácil transportarlo y suministrárselo a la demanda existente, sin necesidad de crear nuevas infraestructuras, además de ser más fácil producirlo y estar más disponible. Tiene también un arranque rápido y su electrolito no produce corrosión.

Sin embargo, estas pilas de combustibles son una tecnología bastante nueva, y su investigación todavía está bastante por detrás del resto de tipos, los materiales necesarios son costosos y escasos y son celdas complejas.

Como aplicaciones tenemos sistemas portátiles de baja potencia, como ordenadores, teléfonos o cámaras profesionales (larga duración) y generación de energía estacionaria.

Pila de combustible: óxido sólido (SOFC)

En este caso se tiene que el electrolito es sólido metálico con una estructura con forma cúbica. Los electrodos están formados por materiales cerametos (compuestos formados a partir de materiales cerámicos y metales). Poseen un rendimiento entre el 50-60% en aplicaciones relacionadas con conversión a electricidad algunos combustibles, pero con sistemas de cogeneración, se alcanzan rendimientos de hasta el 85%.

Esta pila de combustible posee una tensión de celda de aproximadamente 0.6V y además la temperatura de operación más alta en comparación con el resto, en torno a los 1000°C, por lo que al igual que en las pilas MCFC, el reformado de combustibles es posible en el interior de la celda, siempre y cuando exista una cantidad de agua suficiente. Además, esto favorece las reacciones redox y se evita la utilización de catalizadores con metales nobles, lo que provoca siempre aumentar el precio.

También es una ventaja que el electrolito sea sólido, ya que permite celdas más compactas y de formas variadas, de forma que se pueda aprovechar mejor el espacio, aunque reinan dos formas: la plana y la tubular. Además estas celdas de combustible no son susceptibles a las impurezas de CO.

Por otro lado tenemos problemas como la corrosión, baja potencia, el arranque es lento, y las elevadas temperaturas provocan la disminución de la vida útil de los materiales que la componen, aunque su vida útil está por encima de las 36.000 horas.

Es especialmente adecuada su aplicación de cogeneración, en la cual se pueda aprovechar su calor residual, por ejemplo para otros procesos industriales o aplicaciones comerciales, aumentando mucho el rendimiento de esta forma.

Actualmente se está investigando en reducir la temperatura de operación para aumentar su duración y reducir los costes, aunque reduciendo la temperatura la electricidad producida es menor. No se ha encontrado aún ningún material con las propiedades deseadas.

4.4.2.4 Resumen tipologías de pilas de combustibles.

A continuación se resumirán en una tabla las tipologías de pilas de combustible con las principales características de las mismas. Estos datos nos permitirán determinar entre un tipo u otro de aplicación, tanto si tiene un fin comercial como industrial:

Tabla 8. Resumen de pilas de combustibles.

Tipo	Electrolito	Combustible	Tª Funcionam.	Rendimiento (%)	Densidad corriente	Aplicaciones
PEMFC	Membrana	H ₂	60-120 °C	60	Alta	Generación estacionaria, aplicaciones móviles, espacial ...
AFC	Alcalino	H ₂	250 °C	35-85	Baja	Generación estacionaria, aplicaciones móviles, espacial ...
PAFC	Ácido	H ₃ PO ₄	150-220 °C	50-85	Moderada	Generación eléctrica y de calor, transporte pesado
MCFC	Carbonatos fundidos	H ₂ , CH ₄	600-700 °C	60-85	Moderada	Producción eléctrica, cogeneración
DMFC	Membrana	CH ₃ OH	60- 100 °C	40	Alta	Generación estacionaria, aplicaciones móviles
SOFC	Óxidos sólidos	H ₂ , CH ₄ , CO ₂	800-1000 °C	60-85	Moderada	Producción eléctrica, cogeneración

Las pilas de combustible ofrecen por lo general una alta densidad de energía, flexibilidad en el combustible que se utiliza y son fáciles de emplazar. Además, aunque en algunas de ellas la respuesta en el arranque sea lenta, tiene una rápida respuesta a las variaciones de carga, ya que simplemente se necesita añadir más combustible a la misma.

Con respecto a la comparación entre baterías y pilas de combustible es necesario destacar su menor peso y volumen para una misma capacidad energética. Esto en parte es debido a que el combustible está almacenado de forma separada, y se irá añadiendo según se necesite, mientras que para conseguir lo mismo con baterías es necesario añadir más baterías, lo que implica un mayor coste, peso, complejidad y posible pérdida de eficiencia.

Además de esto, las pilas de combustible pueden tener una autonomía ilimitada (siempre que se disponga del de combustible), lo que no puede decirse de una batería, que presenta problemas debido a su estado de carga cuando este es muy bajo.

4.4.2.5 Resumen de características.

Se nombrarán en este apartado las principales características de las pilas de combustible (general para todas):

- Elevado rendimiento, alcanzando niveles del 85% y alta eficacia del combustible.
- Admite (algunos modelos) como combustibles diversos elementos.
- La modularidad que posee es un aspecto clave a la hora de diseñar instalaciones, permitiendo mayor flexibilidad.
- Casi no necesitan mantenimiento y no contiene partes móviles.
- Más respetuosas con el medio ambiente, ya que se reducen las emisiones de gases nocivos, comparando con los combustibles fósiles.
- No genera ruidos (aunque los equipos auxiliares que necesite sí).
- Versatilidad y facilidad para su instalación.
- Tecnología en desarrollo.
- Corrosión de los materiales debido a las altas presiones y temperaturas (en ocasiones).
- Alto coste y baja fidelidad de los equipos.
- Funcionamiento complejo y delicado.

4.4.2.6 Costes y fabricantes.

A continuación se nombrarán algunos de los fabricantes de pilas de combustible/electrolizadores y algunos de sus precios. Antes de hacerlo, es necesario aclarar que es sumamente difícil encontrar a día de hoy vendedores de pilas de combustible, a pesar de que existan diversos fabricantes confirmados. Algunos de ellos son la empresa suiza Casale Chemicals S.A. ofrece un modelo de pila de hidrógeno de $10\text{Nm}^3/\text{h}$ con una presión de 10 bar, cuyo precio alcanza los 190.000 €; la empresa GHW desarrolla un electrolizador que opera con KOH que trabaja a 30 bar y 130°C , aunque no se proporciona un precio para la misma; Hydrogen Systems es una empresa belga que fabrica un electrolizador de hidrógeno de $10\text{Nm}^3/\text{h}$ a 10 bar cuyo precio alcanza los 130.000 €.

4.4.2.7 Líneas futuras

Actualmente están en fase de desarrollo, existen aplicaciones en automovilística y aplicaciones estacionarias, pero son únicamente prototipos. Su implantación en el mercado es muy escasa, al igual que su demanda. Sin embargo, se prevé que en un futuro próximo se utilicen a gran escala en aplicaciones móviles, tales como móviles,

portátiles, los ya nombrados vehículos, etc, además de las que alcanzarán una mayor importancia: pilas estacionarias. Gracias a estas pilas estacionarias se podrá producir energía eléctrica a pequeña o a gran escala, con multitud de aplicaciones y multitud posibilidades en el campo de cogeneración. Su extensión en el mercado supondrá una mayor integración de las energías renovables, sobre todo por la afinidad entre la energía solar y eólica con las pilas de combustible.

Pero su desarrollo está también lastrado por la investigación de obtención del hidrógeno, aún demasiado costosa para ser viable económicamente, pero los expertos están de acuerdo en que el hidrógeno será el combustible del futuro y que posiblemente en algunos años las celdas de combustible se extenderán en el mercado mundial, avanzando un paso más hacia las SmartGrids.

4.4.3 Baterías

4.4.3.1 Introducción.

Las baterías suponen actualmente la principal forma de almacenamiento a pequeña escala, aunque están tomando importancia actualmente su utilización a gran escala; cuentan con multitud de aplicaciones, muchas más que cualquier otro tipo de sistema de almacenamiento, debido en parte, a que son el método más antiguo para almacenar energía.

Realmente, las baterías son células recargables que almacenan y devuelven energía eléctrica gracias a reacciones químicas en su interior y como bien se conoce, existen diferentes variantes de ellas. Son sus componentes los que determinan sus cualidades, tales como capacidad de carga y descarga, capacidad, densidad de energía o ciclabilidad. Así, cada tipo de batería tendrá una tensión de operación a una corriente máxima determinada.

Este tipo de SAE posee un rango medio de potencia y energía (comparado con el resto de sistemas de almacenamiento). Entre sus principales inconvenientes se encuentra su coste de almacenamiento, el volumen que ocupan (y su peso), su baja ciclabilidad y su vida útil. Tenemos que tener en cuenta también la autodescarga, aunque por lo general suele ser secundario.

Existe una clasificación general de las baterías, según sean reutilizables o no:

- **Baterías primarias:** son lo que comúnmente se conocen como pilas, las cuales son de un solo uso, por lo que una vez utilizadas se desechan. Como cualquier batería, transforma la energía química en eléctrica, pero cuando se agotan los reactivos se termina su vida útil. El ejemplo más típico es la pila alcalina.

- Baterías secundarias: conocidas simplemente como baterías, son aquellas que pueden actuar cíclicamente un número determinado de veces, cargándose y descargándose, revirtiendo las reacciones químicas en su interior. Algunos ejemplos pueden ser las baterías de plomo-ácido o las de Ión-Litio.

4.4.3.2 Funcionamiento y parámetros.

Las baterías son dispositivos capaces de acumular energía gracias a reacciones de reducción-oxidación (redox) que se producen en su interior, en los enlaces electroquímicos del electrolito. En la reacción redox uno de los componentes gana electrones (se oxidará) mientras el otro los perderá (se reducirá). Se produce esta transferencia de masa entre los electrodos y el electrolito produciendo una fuerza electromotriz, y es esta transferencia de electrones lo que la genera. Es debido a que se emplean los iones para crear un flujo de electrones que la capacidad de una batería dependa de su potencia.

Algunas de las características más notables de estos sistemas de almacenamiento son su tensión de salida constante y su alta energía específica.

Parámetros principales de las baterías, los cuales nos permitirán definir sus especificaciones, son los siguientes:

- Tensión de circuito abierto: voltaje máximo que puede aportar una batería. Hay que tener en cuenta que la batería posee una resistencia interna, por lo que:

$$V_{CARGA} = V_{OC} + I * R_{INTERNA}$$

Tendrán una tensión en la carga algo variable dependiendo del tiempo debido a esta resistencia interna.

- Capacidad: se trata del parámetro más importante en la especificación de una batería y se mide en Ah. La capacidad está relacionada con la capacidad de descarga de la batería, y cuanto mayor es la segunda, menor es la primera. Generalmente se tiene una curva típica de descarga, que nos proporciona una determinada capacidad, establecida por el fabricante, que variará según el régimen de descarga al que sea sometida.
- Estado de carga (SOC, State of Charge): indica el porcentaje de carga en la batería. Aunque en teoría el recorrido de carga/descarga de una batería es del 0-100%, en la práctica, en muchos tipos de baterías no es posible o recomendable descargar a menos de un 20-30%.
- Corriente de descarga máxima: existe una corriente máxima que puede generar una batería, y cuanto mayor sea esta, menor cantidad de energía podrá dar. Si aumenta la corriente de descarga, disminuye la capacidad.

- Vida de la batería (SOH, State of Health): se refiere a la vida útil que posee la batería. Esta disminuirá en mayor o menor medida dependiendo de su uso, la profundidad de descarga alcanzada, número de ciclos completados, etc.
- Estado de funcionamiento: con el estado de funcionamiento se comprobará si la batería funciona correctamente, aportando la tensión especificada a la salida y sin fallos en los otros parámetros.
- Profundidad de descarga (DOD, Depth of Discharge): es el parámetro que indica el porcentaje de descarga que se puede alcanzar en una batería, como hemos dicho antes, en multitud de ocasiones no podemos descargar a un porcentaje inferior.

4.4.3.3 Tipología.

Pilas alcalinas

Se trata de un tipo de baterías de un único uso, en el que un conjunto de celdas electroquímicas producen energía gracias a la reacción química entre el zinc y el dióxido de manganeso (electrodos), teniendo como electrolito hidróxido de potasio (KOH).

Pueden encontrarse dos tipos de pilas alcalinas comunes: unas como baterías cilíndricas con un tamaño relativamente grande, y como baterías de pequeño tamaño con forma de botón.

Curva de descarga típica de las pilas alcalinas se corresponde a la siguiente:

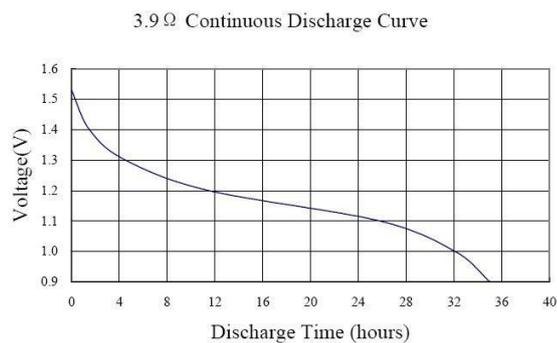


Imagen 22. Curva de descarga de una pila alcalina.

Principales características de las baterías primarias:

- Tensión por celda 1.5V, y es constante durante la mayor parte de su uso.
- Alta densidad de energía.
- Baja autodescarga.
- Poseen una resistencia interna baja.
- No son reutilizables, se desechan tras su uso.
- Se pueden reciclar.
- El continente está sellado para evitar fugas.
- Tecnología madura.

Su precio es bastante bajo, debido a que no permite su reutilización, puede rondar 0.5€/unidad.

Se utilizan en multitud de aparatos electrónicos, pero poco a poco están siendo suplantadas por baterías recargables más modernas. Se prevé que en un futuro desaparezcan al menos, en el plano comercial.

Plomo

Son el tipo de baterías más antiguas y las más disponibles. Poseen un electrodo de plomo y otro de peróxido de plomo; su electrolito es ácido sulfúrico disuelto en agua. Cuando la batería se encuentra descargada, la densidad del electrolito disminuye, y aumenta cuando está cargada.

Dentro de las baterías de plomo existen diferentes variantes:

- Plomo ácido: son las típicas baterías de arranque de motores de combustión en automóviles.
- Plomo-gel: son utilizadas en vehículos eléctricos y no necesitan mantenimiento.
- Plomo-silicona: son las más novedosas y poseen un mayor resistencia que las tradicionales.

Curva de descarga de las baterías de plomo-ácido:

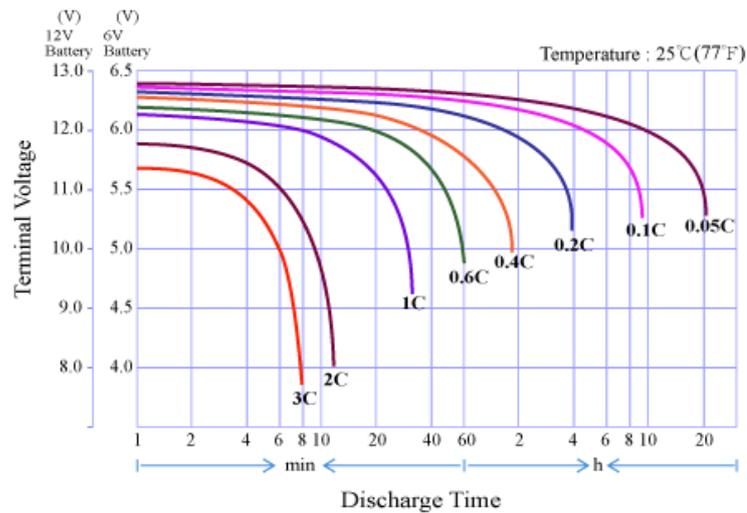


Imagen 23. Curva de descarga de una batería de Pb-ácido.

Sus principales ventajas e inconvenientes son:

- Aportan una tensión elevada ($V_{sal_{celda}} = 2.1V$)
- Son capaces de soportar elevadas corrientes de descarga y por tanto, aplicar una alta potencia de descarga.
- Son muy baratas y fáciles de encontrar.
- Altamente reciclables. En España se reciclan el 95% de las baterías ya usadas.
- Tecnología madura.
- Rendimiento del 80%.
- Baja energía específica (10-40Wh/kg)
- Ciclabilidad muy baja ante descargas muy profundas (400 – 800 ciclos). Con ciclos de descarga menos profundos la ciclabilidad aumenta hasta 4500 ciclos.
- Ocupan un volumen muy amplio y su peso es elevado.
- Existe la posibilidad de explosión debido al desprendimiento de hidrógeno.
- Contaminan mucho debido a los compuestos de plomo, antimonio y arsénico.
- Algunas requieren mantenimiento específico.

Este tipo de baterías posee un inconveniente a mayores: la sulfatación. La sulfatación es el resultado de la descarga de la batería de forma profunda continuadas veces por debajo del mínimo especificado, también una carga incorrecta, o la inactividad de la misma. Se producen cristales que disminuyen la superficie activa del electrodo, y la capacidad de la batería disminuye. Este fenómeno puede paliarse con descargas con altas corrientes para disolver los cristales.

A pesar de los inconvenientes mencionados, se está consiguiendo reducirlos gracias a los nuevos avances para promover la integración de las fuentes de energía

renovables. Las nuevas baterías de plomo ácido llegan al 90% de rendimiento y una profundidad de carga del 80%.

Las baterías de plomo-ácido son ampliamente utilizadas en sistemas fotovoltaicos. Además, tienen una vital importancia actualmente en aplicaciones en automóviles de motor de combustión para su utilización en el arranque del vehículo. No suele ser una opción recomendable para implantar en coches eléctricos debido a sus inconvenientes, sino que se utilizan su variante (plomo-gel), y como ejemplo tenemos el modelo Reva-1 de la empresa Reva Electric Car. También se emplean en tracción (carretillas, vehículos industriales, etc) y en aplicaciones industriales (servicios continuos, regulación de carga).

Los costes de las baterías más avanzadas de plomo-ácido son de aproximadamente de 360€/kWh y su mantenimiento de 2€/kWh.

Acerca del futuro de las baterías de plomo-ácido, son más utilizadas por el aumento constante de la flota de vehículos, y debido a su precio y su disponibilidad son en muchas ocasiones una mejor opción. Además, con el surgimiento de una nueva generación de baterías de plomo ácido, cuyo rendimiento alcanza el 90%, sigue haciendo a estas antiguas baterías aún atractivas a todos los niveles de aplicación.

Níquel – Cadmio

Estas baterías poseen un ánodo de níquel y un cátodo de cadmio. Sus principales ventajas e inconvenientes son:

- Ciclabilidad de aproximadamente 1500 ciclos.
- Tensión de la celda 1.3V constante hasta el 85% de la descarga.
- Admiten cargas y descargas rápidas, además de sobrecargas y descargas profundas.
- Permiten estar largos periodos de tiempo en un estado de carga bajo.
- Pueden operar a baja temperatura.
- No exigen mantenimiento y no liberan gases corrosivos.
- Son muy tóxicas debido al cadmio.
- Baja densidad energética (60 Wh/kg).
- Autodescarga considerable (3-6% / mes).
- Baja capacidad para situaciones de descarga lenta.
- Poseen efecto memoria.
- A altas temperaturas su eficiencia se reduce considerablemente.
- El coste de los materiales para los electrodos es elevado.

Este tipo de baterías era utilizado en modelos de vehículos como el Peugeot 106, Renault Kangoo o Citroën Saxo, pero a partir del año 2008, debido a la legislación, se obligó a retirar estas baterías de los vehículos debido al alto grado de toxicidad del cadmio para el medio ambiente. Las baterías de Ni-Cd fueron prohibidas en la UE, es por ello que no se desarrollará más este tipo de batería.

Níquel-Metal-Hidruro

Las baterías de NiMH se consideran la evolución de las de Ni-Ca, y son muy similares, con la ventaja de que no tenemos cadmio entre sus componentes. El cátodo es de oxihidróxido de níquel (NiOOH), el ánodo está formado por una aleación que puede insertar hidrógeno y el electrolito de hidróxido potásico (KOH).

Curvas típicas de descarga de las baterías de NiMH:

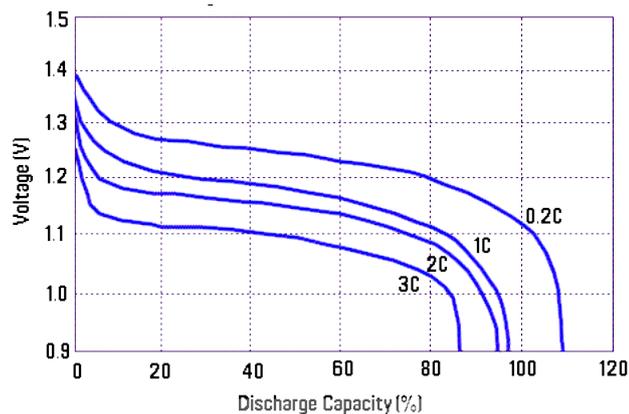


Imagen 24. Curva de descarga de una batería NiMH.

Principales ventajas e inconvenientes:

- Más energía específica que las baterías de plomo ácido (70 Wh/kg).
- Permiten cargas y descargas rápidas, entre 1 y 3 horas.
- Contaminan mucho menos que las dos anteriores, debido a que no presentan cadmio ni plomo.
- No es necesario mantenimiento.
- Disminuye la capacidad notablemente al descargar con corrientes elevadas.
- Baja ciclabilidad (menos de 1000 ciclos) debido a la corrosión del electrolito, y menor aún si son utilizadas en aplicaciones de tracción.
- Precio elevado, en comparación con Pb-ácido (unas 4 veces superior).

- Poseen efecto memoria.
- Autodescarga del 1.5% diario.

Entre sus principales utilidades se encuentra el vehículo eléctrico y el vehículo híbrido: modelos como el Toyota Prius, Honda Insight o Ford Escape incorporan este tipo de baterías, la mayoría fabricadas por PEVE (Panasonic), SAFT o Varta. Es debido a su capacidad de recargas rápidas lo que la hace muy interesante para la aplicación de almacenamiento de energía procedente del frenado regenerativo. Otras aplicaciones actuales son diversos aparatos electrónicos o relojes.

Zebra (NaNiCl)

Se trata de un nuevo tipo de baterías con un futuro muy prometedor, sobre todo en el campo del vehículo eléctrico. Esta peculiar batería denominada de sal fundida debido a su electrolito, funciona a una temperatura que va desde los 270°C a los 350°C, no posee efecto memoria y se compone de materiales realmente económicos (sal, NaCl), níquel y hierro. Son capaces además de operar a voltajes muy altos, del orden de 600 V.

Entre sus principales características se encuentran:

- Precio bajo, hasta 4 veces inferior al de las baterías de Ión-Litio.
- Energía específica elevada (125 Wh/kg), 3 veces superior a las baterías de Pb-ácido.
- Alta ciclabilidad (hasta 3000 ciclos).
- Permite recarga rápida.
- Es 100% reciclable y no tóxica.
- Casi no necesitan mantenimiento.
- Rango de temperaturas de operación elevado (270-350°C), por lo que será necesario aislarlas. Posee problemas de seguridad e inflamabilidad.
- Pérdidas térmicas mientras no se esté utilizando.
- Capacidad de la batería y su tamaño están limitados.

Como aplicación podemos encontrar este tipo de baterías en el vehículo eléctrico Th!nk City. Son muy apropiadas para vehículos pesados, como camiones eléctricos o autobuses eléctricos. Se presentan como alternativa a las baterías de Ión-litio, y no sólo en aplicaciones móviles.

Actualmente en España el uso de estas baterías está estancado pero se espera que, gracias a un mayor de las mismas, tengan una progresiva introducción en nuestro mercado.

Sodio – sulfuro

Estas baterías son de sales fundidas, como las anteriores, pero en este caso son azufre fundido y sodio fundido (electrodos positivo y negativo respectivamente). El electrolito es un material cerámico sólido, a través del cual se realiza el intercambio de iones.

Principales características de las baterías sodio-sulfuro:

- Necesitan temperaturas superiores a 300°C para su funcionamiento.
- Estado mínimo de carga del 10%.
- Alta ciclabilidad (4500 ciclos).
- Rendimiento del 89%.
- Son 100% reciclables.
- Alta densidad de energía.
- Bajo coste de los materiales.
- Permite utilizarse para almacenamiento masivo.
- Madurez comercial.

Su coste de adquisición ronda los 285€/kWh y su coste de mantenimiento 3€/kWh. Empresas japonesas como TEPCO y NGK Insulators se encargan de su desarrollo y fabricación. Se han implantado en Japón 270MW de este tipo de baterías con los cuales se almacena energía de procedencia renovable.

Como se ha dicho, este tipo de baterías son especialmente adecuadas a aplicaciones no móviles y de gran escala. Se utiliza extensamente en almacenamiento procedente de energía eólica.

Metal – aire

Este tipo de baterías están compuestas por un electrodo metálico (normalmente zinc, litio, aluminio o manganeso) y el otro electrodo de aire, con un electrolito de solución acuosa. En el funcionamiento de esta batería, el metal se oxidará y el oxígeno del aire del otro electrodo será el que se reduzca. Este tipo de baterías se encuentra en desarrollo actualmente.

Las características generales de estas baterías son:

- Tecnología en estado de desarrollo.
- Tensión de circuito abierto para zinc- aire es 1.65V, y para litio-aire 2.91V.
- Energía específica (incluyendo el oxígeno) para zinc- aire es 1090 Wh/kg, y para litio-aire 5210 Wh/kg.
- Muy alta densidad energética.

- Los materiales de construcción son muy baratos, abundantes y con gran disponibilidad.
- Rendimientos limitados al 50% como máximo.
- Necesitan una recarga mecánica.
- De momento tienen una vida útil bastante limitada.

Se está investigando en este tipo de baterías para utilizarlas en aplicaciones de gestión de sistemas eléctricos, pero necesitan aún desarrollo. Sin embargo, las baterías zinc-aire ya se conocen desde hace años, pero como baterías primarias (no se pueden recargar, tienen un único uso). Según algunas fuentes, poseen un potencial ocho veces mayor al de las baterías de ión-litio [16], y tendrán posiblemente un fuerte papel que desempeñar en el área de las SmartGrids.

Además de esta aplicación, pueden llegar a ser un tipo de baterías que revolucione el mundo de la automoción, gracias a su utilización en el vehículo eléctrico.

Titanato de Bario (BaTiO₃)

Se trata de una batería diseñada por la compañía texana EESstor, y a diferencia del resto de baterías, esta no produce electricidad a partir de sus reacciones químicas. Su funcionamiento es más parecido al de un condensador que al de una batería.

Características principales:

- Simple de fabricar y costes menores que las baterías de ácido.
- Su ciclabilidad es prácticamente ilimitada.
- Menos dañina para el medio ambiente debido a sus componentes.
- Posee una carga máxima de 52 kW/h, muy superior a otras baterías competidoras.
- Admiten cargas y descargas muy rápidas (en torno a los 5 minutos).
- Costes por kWh muy bajos.
- El efecto de la temperatura no afecta a su capacidad ni sus características.
- Tecnología poco contrastada.

La compañía fabricante de baterías realizó un acuerdo con la compañía ZENN Motor Company, la cual pretende implantarlas en vehículos eléctricos. No se dispone de mucha información de este tipo de batería y su aplicación es bastante desconocida.

Baterías de litio

Ión litio

El litio es un material muy ligero, con un gran potencial electroquímico y puede acumular grandes cantidades de energía. Es característico de las baterías de ión-litio que los dos electrodos pueden absorber o devolver iones reversiblemente, y sólo el ánodo estará compuesto de litio. En su primera versión se utilizaba como cátodo un electrodo de carbón, pero actualmente son de grafito, debido a sus características de descarga.

Se descubrió que este tipo de baterías, debido a la ciclabilidad, reducían la estabilidad térmica de la misma y aumentaba potencialmente la fuga térmica (pueden llegar a arder de forma espontánea).

Curva de descarga de las baterías de ión-litio:

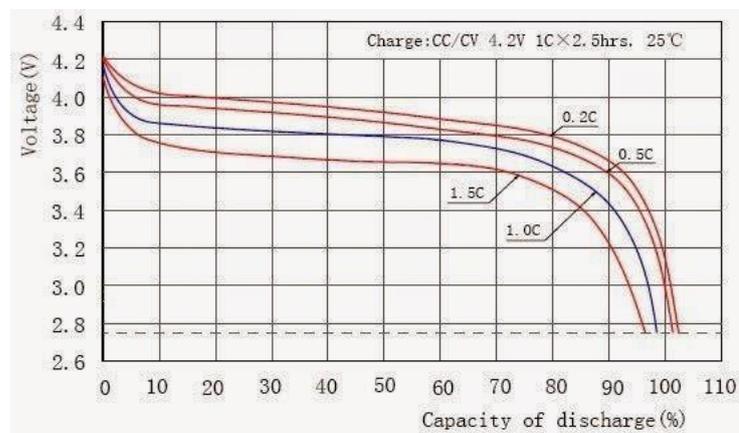


Imagen 25. Curva de descarga de una batería Ion-Litio.

Principales características:

- Poseen un alto voltaje, entre 3 y 4 V/celda, el mayor entre las baterías.
- Alta energía específica (80-170 Wh/kg), más del doble que las de NiMH y más de cuatro veces las de Pb-ácido.
- Alto rendimiento, alcanzando el 94%.
- Alta ciclabilidad. Conservan el 90% de capacidad después de los 1000 ciclos.
- Mucho menos contaminantes, ya que no contienen plomo, cadmio o mercurio.
- Baja autodescarga.
- Su coste es elevado.
- Pierde prestaciones cuando la temperatura supera los 50°C.
- Se degradan rápidamente cuando la descarga es muy profunda o se sobrecarga la batería.
- Mínimo estado de carga del 10%.
- Necesitan un empaquetamiento especial y un circuito de protección interno frente a sobrecargas.

Su coste es bastante elevado en comparación con otras baterías, en torno a los 530€/kWh y los 3€/kWh de costes de mantenimiento y operación. Sin embargo, se estima que su precio se vea reducido con el aumento de su producción, su fabricación en masa y la utilización de materiales menos costosos.

Como aplicaciones principales nos encontramos con su uso en el vehículo eléctrico o híbrido como batería de tracción, en modelos como por ejemplo el Tesla Roadster y también en todo tipo de aparatos de electrónica de consumo, como teléfonos móviles o portátiles. Además, como se verá más adelante en este punto, se puede encontrar en aplicaciones de almacenamiento a gran escala, en el proyecto ALMACENA.

Dependiendo del material utilizado podemos encontrarnos diversas variantes de la batería común de ión-litio:

- Litio-Cobalto
- Litio-Fosfato de hierro
- Litio-Manganeso
- Litio-Polímero

Litio-Manganeso y Litio-Cobalto

Las baterías de Litio-Cobalto son una variante de las baterías de Ión-Litio que buscan aumentar la estabilidad de las mismas. Poseen una menor densidad energética, aunque no demasiado significativa, pero aumenta su seguridad. Pueden descargarse y cargarse con altas corrientes sin sufrir perjuicios (a 5C), además de ser resistentes al choque térmico o a impactos. El inconveniente de estas baterías es el precio que alcanzan.

Por otro lado, las baterías de Litio-Manganeso poseen un precio bajo, muy alta densidad energética, además de alta potencia, baja capacidad, una baja vida útil. Presenta sin embargo problemas de operación con la temperatura aunque son más seguras que las baterías de litio-cobalto y al ser el manganeso un metal más noble, contamina menos.

Ambos tipos de baterías se encuentran aún en fase de desarrollo, aunque se comercializan algunos modelos.

Litio Fosfato de Hierro

Se trata de uno de los materiales más utilizados para el cátodo de la batería, siendo una opción alternativa al cobalto y al manganeso. Poseen alta potencia y buena seguridad, pero vida útil baja. Se trata de una batería robusta, eficiente y a medio/largo plazo más baratas.

Curva de carga y descarga de las baterías de litio fosfato de hierro se corresponde con la siguiente:

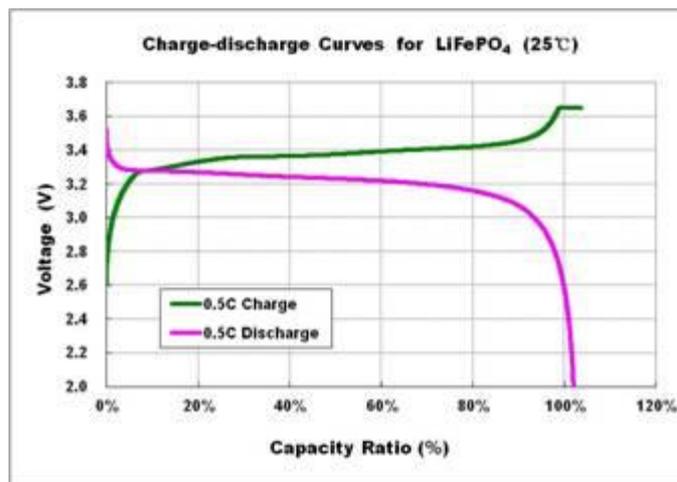


Imagen 26. Curva de descarga de una batería LiFePO₄.

Principales características de estas baterías:

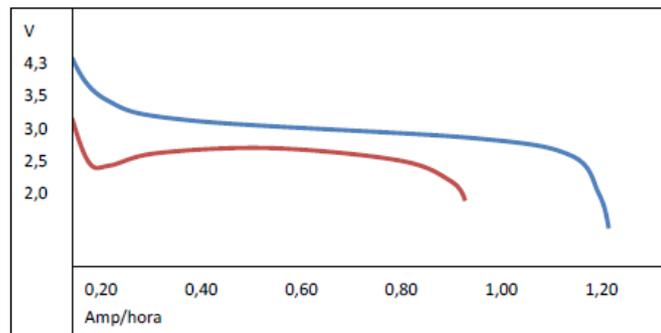
- Tensión de circuito abierto algo menor que las de ion-litio, 3.2-3.3 V.
- Densidad energética 110-130 Wh/kg.
- No necesitan mantenimiento.
- Poseen una seguridad excelente, no se incendian ni explotan con sobrecargas. Además las vibraciones no le afectan.
- Ciclabilidad entre 2000-3000 ciclos.
- Rendimiento del 92%.
- Muy baja tasa de autodescarga.
- A partir de 60°C disminuyen su rendimiento.
- Son más respetuosas con el medio ambiente que sus competidoras.
- El voltaje que proporcionan es constante hasta la descarga total.
- Admiten cargas (superior a 7C) y descargas rápidas (recarga del 90% en solo 15 minutos).

Entre las aplicaciones más comunes de estas baterías encontramos la robótica, vehículos eléctricos y almacenamiento de energía.

Para aplicaciones que no está conectado a la red, como aplicaciones solares y/o eólicas es muy importante el rendimiento. Este tipo de baterías son idóneas para estas tareas, debido a su eficiencia (mayor que las de plomo-ácido), además, el estado de carga no afecta a la capacidad de la misma ni a la pérdida de eficiencia. Además, aunque tengan un precio superior, son mucho más fiables y no requieren mantenimiento.

Polímero de Litio

Esta variante de baterías de Ión-Litio posee una mayor densidad de energía que su predecesora, y capacidad de descarga superior. El líquido que forma el electrolito en las baterías de Ión-Litio en este caso es reemplazado por un gel, por lo que la batería no necesita como antes un cierre hermético (aumenta la seguridad, reduce el peso y volumen).



Descarga de dos baterías LiPo de diferente potencia y similar capacidad.

Imagen 27. Curva de descarga de una batería Li-Po.

Se aprecia a ver en la imagen la curva de descarga de dos baterías de Li-Po con una capacidad similar y con potencias diferentes descargadas, la curva roja con una potencia máxima de 6C y la azul de 10C. Es apreciable que ante una descarga con la misma corriente, la batería que posee una potencia mayor es capaz de entregar potencia durante más tiempo que la otra. Además, su caída de tensión en la descarga es menor.

Principales características:

- Densidad energética entre 100-130 Wh/kg.
- Tensión de salida: 3.1-3.2V.
- Rango de temperaturas de funcionamiento: 0-60°C.
- Más seguras que las baterías de Ión-Litio (no inflamable).
- No necesitan mantenimiento y no poseen efecto memoria.

- El Li-Po posee mala conductividad, por lo que no puede entregar altas potencias instantáneas.
- La conductividad aumenta a partir de 60°C.
- Menor capacidad que las de lón-Li.
- Necesitan un circuito de seguridad para establecer los límites de voltaje mínimo y máximo.
- Pueden llegar a explotar si son perforadas.
- Tecnología no madura.
- Mayor precio que las baterías lón-Li.

La nueva generación de baterías de Li-Po está diseñada para que puedan entregar un 90% de su capacidad nominal con su máximo rendimiento. Sin embargo, la sobredescarga por debajo del valor mínimo establecido provoca una reducción importante de su capacidad cada vez que esto ocurre (disminuye un 3-4% aproximadamente cada vez).

Este tipo de baterías está ganando importancia en aplicaciones móviles, para equipos pequeños debido a su tamaño y peso. Para aplicaciones que requieran funcionamientos durante largos periodos y altas potencias, conviene recordar como hemos visto en la imagen de descarga de estas baterías, que cuanto mayor sea la potencia de las baterías mejor rendimiento en la descarga tendremos.

Parece que el mercado tiende a que las baterías ión-litio y sus variantes aumenten, debido a su utilización a pequeña escala en aparatos electrónicos, pero también destacan como veremos en el siguiente punto, en el almacenamiento en viviendas con el fin de para alcanzar una SmartGrid. Y no sólo eso, sino también a nivel industrial, como aplicación a regulación de carga de las redes eléctricas y un mayor control de la demanda. Todo apunta a que en general, todas las baterías tendrán una mayor investigación, desarrollo y aplicación en un futuro.

Grafeno

El grafeno es un material que es obtenido a partir del grafito, el cual tiene unas extraordinarias propiedades, tales como flexibilidad (hasta un 20%), fuerte (200 más que el acero estructural), bidimensional y excelente conductor (hasta 1000 veces más que el cobre) [17].

Las baterías de polímero grafeno prometen ser el nuevo tipo de baterías que revolucionará el mundo de la energía y la movilidad eléctrica debido a su gran diferencia de prestaciones frente a baterías como la de lón-litio.

Principales características:

- Alta densidad energética, alcanzando los 1000Wh/kg.
- Peso reducido.
- Admite cargas y descargas rápidas sin dañar la batería, logrando alcanzar los 100C.

La única empresa que va a producir las (ya que de momento se encuentran en proceso de I+D) será la empresa española Graphenano, la cual propone su utilización en hogares con un uso similar a las baterías de Tesla, en automóviles y bicicletas. Si estas baterías llegan al mercado, en pocos años se verá un incremento exponencial de la flota de vehículos eléctricos en todo el mundo, ya que hasta ahora su mayor limitación aparte de su precio por su escasa fabricación, era la autonomía.

Se cree que con el lanzamiento de este nuevo tipo de baterías se producirá una tercera revolución industrial. No se conocen precios, fechas de salida o apenas características de este modelo.

4.4.3.4 Comparativa de baterías secundarias.

Para el desarrollo del presente punto presentaremos una gráfica y una tabla con lo que son, a nuestro parecer, las características principales a la hora de adquirir nuevas baterías, a nivel de usuario o industrial.

En la siguiente gráfica se comparan algunas de estas baterías según su densidad energética y su energía/volumen. Se aprecia que las que lideran esta gráfica son las de lón-litio, zinc-aire y litio-polímero. Sin embargo, a pesar de ambas características son fundamentales para las baterías, no son el único factor que determina su ámbito de aplicación.

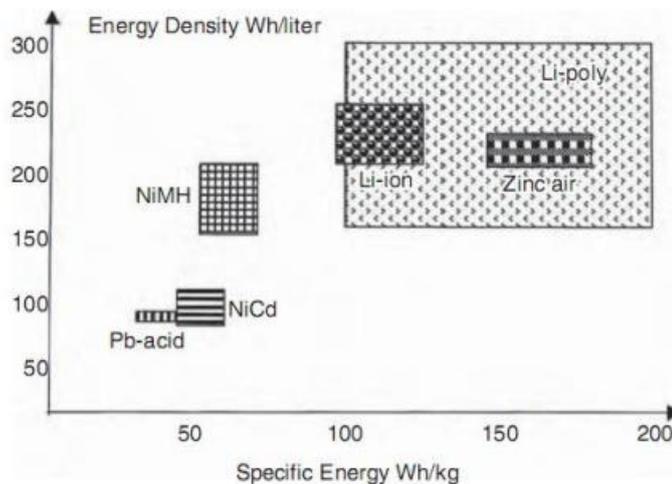


Imagen 28. Comparativa baterías densidad de energía/energía específica.

En la siguiente tabla se realizará una comparativa de las principales características sobre potencia y energía, como son el rango de potencia de cada uno de los tipos, potencia específica, energía específica y densidad energética. Estos factores son determinantes para las aplicaciones que vayan a llevar a cabo, aunque no los únicos, pero seguramente los más significativos. No entraremos en términos numéricos, ya que se intenta dar una visión rápida y general a todo el conjunto de baterías.

Tabla 9. Resumen de baterías (potencia y energía).

Tipo de batería	Rango de potencia	Potencia específica (W/kg)	Energía específica (Wh/kg)	Densidad de energía (Wh/L)
Pb-ácido	Alta (decenas de MW)	Media	Muy baja	Baja
Ni-Cd	Alta (decenas de MW)	Media	Baja	Media-baja
NiMH	Baja	Media	Media	Media-alta
Zebra	Baja (decenas de KW)	Baja	Alta	Alta
Sodio-sulfuro	Alta (decenas de MW)	Baja	Media	Media
Metal-aire	Media (MW)	Media	Alta	Alta
Titanato de bario	N/A	N/A	N/A	N/A
Ión-Litio	Baja (decenas de KW)	Alta	Alta	Alta
Litio-Fosfato de Hierro	Baja	Alta	Media-alta	Alta
Li-Po	Baja	Alta	Alta	Alta
Grafeno	N/A	N/A	Muy alta	Alta

Para establecer una referencia clara, ya que la tabla no posee medidas cuantitativas, estableceremos como potencia específica media 250W/kg (aprox.), como energía específica media 80 Wh/kg (aprox.) y como densidad energética media 150 Wh/L (aprox.).

La potencia específica es un factor que se utiliza comúnmente en aplicaciones para fuentes energéticas móviles e implica la medida del rendimiento de dicha fuente. En automóviles por ejemplo, nos proporciona información sobre la capacidad de aceleración del vehículo. Sin embargo, hay que recordar que la potencia de una batería está sujeta al régimen de descarga aplicado.

La energía específica es un factor que cuantifica la cantidad de energía que es almacenada por unidad de masa, mientras que la densidad de energía está relacionada con la cantidad de energía almacenada en un determinado espacio y cuanto mayor sea esta, más energía se podrá almacenar por volumen. Ambos factores son sumamente importantes a la hora de valorar una u otra aplicación, muy presente en aplicaciones móviles, pero también en estacionarias.

La tabla siguiente contendrá una comparativa-resumen de las principales características de las baterías, a mayores de las de potencia o energía, analizadas en la tabla anterior, y que también serán factores determinantes a la hora de elegir un modelo de batería, tanto a nivel industrial como de consumidor:

Tabla 10. Resumen de baterías (principales características).

Tipo de batería	Eficiencia	Ciclabilidad	Autodescarga	Precio/disponibilidad
Pb-ácido	Media	Muy baja	Media	Bajo/ Muy alta
Ni-Cd	Media-baja	Media	Muy alta	N/A / no se comercializa en la UE
NiMH	Media-baja	Muy baja	Alta	Alto / Media
Zebra	Alta	Media	N/A	N/A / Muy baja
Sodio-sulfuro	Media	Media	No apreciable	N/A / Muy baja
Metal-aire	Muy baja	Media	No apreciable	N/A / Muy baja
Titanato de bario	Baja	Ilimitada	N/A	N/A / Muy baja
Ión-Litio	Alta	Media-alta	Baja	Medio / Muy alta
Litio-Fosfato de Hierro	Alta	Media	Muy baja	Alto / Alta
Li-Po	Alta	Media	Baja	Alto / Alta
Grafeno	N/A	N/A	N/A	Desconocido/no disponible

Como se vio en el apartado 5.0 de este documento, no solo las características energéticas serán determinantes a la hora de la elección de un tipo de batería secundaria, sino que también lo serán su eficiencia, ciclabilidad, autodescarga y su precio y disponibilidad.

Se considerará valor medio para la eficiencia aproximadamente 80% y ciclabilidad media aproximadamente 2500 ciclos. El factor de autodescarga se ha referido a un porcentaje de descarga con el tiempo del total de la batería, correspondiendo media a un porcentaje de 10% al mes. Respecto al precio de las baterías se ha considerado como precio medio el precio de una batería de ión-litio.

El motivo de elección de estos parámetros es que se consideran los principales (junto con los energéticos y de potencia) los que determinarán su posible aplicación. Es posible ejemplificar esto mediante la aplicación de una batería de plomo-ácido como batería de tracción del vehículo eléctrico: a pesar de su alta disponibilidad y su bajo precio (y obviando su densidad energética), puede apreciarse que no sería el tipo de batería más adecuado para este fin, debido a su autodescarga y su eficiencia, pero sobre todo a su ciclabilidad. En las aplicaciones en las que se necesitan constantes cargas y descargas de las baterías es fundamental que la ciclabilidad de la batería sea elevada. De otro modo, el coste de sustitución de las mismas elevará en gran medida el coste total del sistema de almacenamiento.

4.4.3.5 Baterías de flujo redox.

Las baterías de flujo redox serán incluidas este apartado de baterías, aunque no son baterías como las se conocen habitualmente, sino una hibridación entre una batería y una pila de combustible. El electrolito, como en estas últimas, se almacena en tanques externos y se bombeará a los stacks de la batería.

Esquema general de una batería redox:

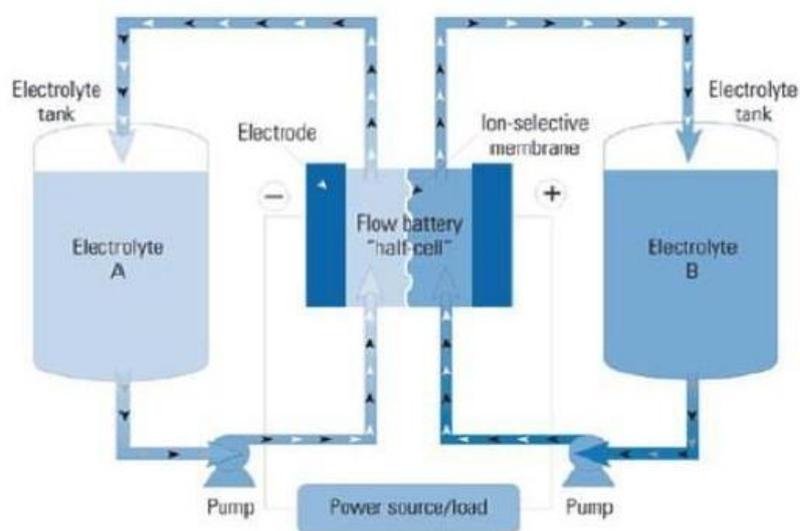


Imagen 29. Esquema batería de flujo redox.

En estos sistemas electroquímicos se producen reacciones de reducción y oxidación sobre los electrodos gracias al electrolito. Suelen tener una alta tasa de vida útil, pero también la densidad de corriente que pueden aportar es bastante baja, debido a los materiales activos. Además, otra característica de ellas es que la capacidad puede

variar según la cantidad de electrolito que se disponga, siendo independiente el diseño de la capacidad energética de la capacidad de potencia. Además, estas poseen un bajo nivel de autodescarga.

Las baterías de flujo redox poseen una eficiencia de hasta el 85% y poseen una gran velocidad de respuesta, pudiendo entregar altas potencias (más de dos veces su potencia nominal) durante algunos minutos (alta capacidad de respuesta en carga y descarga). Por esto tienen tanta importancia en aplicaciones de calidad de energía y estabilización de la red.

Como principales desventajas nos encontramos con la relativa baja densidad de energía por volumen (en comparación con las baterías), por lo que se necesitará un mayor número de celdas para aportar la misma potencia, y también la complejidad que conlleva su sistema, siendo su necesario sistema de control complejo y caro. Es su necesidad de aportar un tanque externo con electrolito, lo que conlleva peso y volumen, lo que puede limitar su aplicación en automóviles.

Nos encontramos con dos tipos de baterías de flujo redox (comerciales):

- Batería de Vanadio (VRB).
- Zinc-Bromo (Zn-Br).

Baterías de flujo VRB:

Principales características de las baterías de flujo de Vanadio:

- Su tensión en circuito abierto es aproximadamente de 1.41V.
- Densidad energética 15-25 Wh/L.
- Energía específica 10-20 Wh/kg.
- Eficiencia 75-85%.
- Vida útil muy alta, en torno a los 15-20 años.

Las del tipo Vanadio pueden optimizarse para entregar potencia activa o potencia reactiva, debido a su alta velocidad de respuesta, y gracias a su posible enorme capacidad son una excelente opción para almacenamiento masivo de energía, alcanzando una buena sinergia con fuentes renovables muy variables, como solar y eólica, o en aplicaciones de generación híbrida, pudiendo sustituir a las baterías de plomo-ácido en este aspecto.

Baterías de flujo Zn-Br:

Principales características de las baterías de flujo de Zinc-Bromo:

- Su tensión en circuito abierto es de 1.8V aproximadamente.
- Densidad energética 15.7-39 Wh/L.
- Energía específica 34.4-54 Wh/kg.
- Eficiencia 70-80%.

Aunque existen muchos más tipos de baterías de flujo, son menos conocidas, como por ejemplo bromo-hidrógeno, hierro-titanio, hierro-cromo, zinc-cerio, etc. Es por ello que nos hemos centrado en las principales.

4.4.3.6 Configuraciones de las baterías.

Existen diferentes configuraciones de conexión de las baterías, y las explicaremos brevemente en este apartado.

Serie:

La conexión de dos baterías con la misma tensión de salida en serie duplica la salida de tensión de una de las baterías individuales, manteniendo siempre la misma capacidad. Esta conexión es muy utilizada en sistemas de almacenamiento eólico y fotovoltaico.

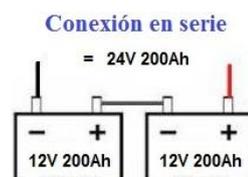


Imagen 30. Esquema conexión serie de baterías.

Paralelo:

La conexión en paralelo permite duplicar la capacidad de las baterías iguales conectadas, y tendrán la misma tensión de salida que cada una de ellas individualmente. Esta conexión se utiliza para almacenar una mayor cantidad de carga.

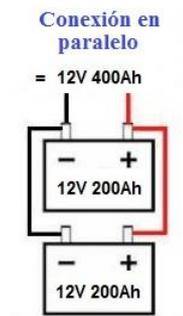


Imagen 31. Esquema conexión paralelo de baterías.

Serie-paralelo:

Lógicamente, combinando los dos tipos de conexiones anteriores, lograremos doblar la tensión y la capacidad disponible. Es importante en esta configuración prestar atención a los cables que unen las baterías: que sean de la sección adecuada y lo más corto posible, ya que así su resistencia será menor (menos pérdidas).

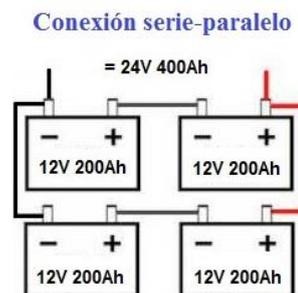


Imagen 32. Esquema conexión serie-paralelo de baterías.

4.4.3.7 Powerwall (Tesla) y competidores.

Powerwall (Tesla)

Powerwall se presenta como la pionera en almacenamiento de energía a nivel doméstico con la cual se puede optimizar el uso de la energía solar instalada en la vivienda. Se ha de destacar que Tesla no ha inventado ningún tipo de almacenamiento nuevo, pero sí ha mejorado el tipo de baterías que utiliza para su comercialización, abriendo camino al autoabastecimiento energético para un público mucho más amplio. Propone instalar paneles solares en los tejados de las viviendas y fijar una o varias Powerwall, dependiendo de la energía que necesitemos, ancladas en paredes de alguna habitación del hogar. Es necesario almacenar la energía de los paneles solares durante el

día para poder utilizarla en las horas que no haya sol o cuando necesitemos más potencia durante el día. Además este dispositivo podemos colocarlo sobre una pared, sin necesidad habilitar una habitación para el almacenamiento de baterías.

Con este dispositivo es posible además independizarse del suministro de la red eléctrica para autoabastecernos y también obtener electricidad para toda la casa cuando se produce un corte de suministro. Una solución válida por ejemplo en casos de viviendas aisladas en las que es demasiado caro pagar para instalar el suministro eléctrico o en poblaciones aisladas sin electricidad, incluso en pequeños negocios.

Gracias a este tipo de baterías se inicia un nuevo modo de consumo de energía que nos permite tener sistemas de energía distribuidos en vez de los actuales centralizados.

Características

Menos voluminoso que otro tipo de baterías, más caras de instalar y caras de mantener.

Powerwall posee baterías de Ión-litio. Están completamente automatizadas y no requieren mantenimiento.

Tabla 11. Características de la Powerwall.

Energía	6.4 kWh
Eficiencia	92.5 %
Potencia	3.3 kW
Capacidad de descarga	100 %
Voltaje	350-450V
Corriente	9.5 A
Temperatura de operación	-20 a 50 °C
Compatibilidad	Una fase y tres fases compatible
Peso	97kg
Situación	Admite instalación exterior e interior
Dimensiones	1302mm x 862mm x 183mm
Instalación	Requiere un inversor DC/AC a mayores
Precio	3000€

Comparando precios con otros sistemas de almacenamiento, Powerwall de Tesla cuesta menos de la mitad que las baterías que podemos comprar de algún fabricante para almacenar energía solar.

Tenemos además Powerpack, una versión ampliada de Powerwall para aquellos casos en los que se necesite acumular una mayor cantidad de energía y aportar más energía cuando descargamos. Su energía llega a 1GWh.

RaStore (Solar Rocket)

RaStore es un es el competidor de la Powerwall de Tesla español, que utiliza igualmente baterías de ión litio para el almacenamiento fotovoltaico. Tiene una capacidad de 3 a 20 kW en un único pack.

El modo de funcionamiento es el mismo que el producto de Tesla: gracias a los paneles solares recogemos la energía en las baterías de ión litio, que posteriormente se transformará en alterna gracias a un inversor AC/DC. La diferencia con el competidor es que este producto ya lleva incluido el inversor, por lo que no hará falta comprarlo a mayores, además del controlador en el mismo aparato. Este producto es compatible incluso con la Powerwall de Tesla.

Según datos de la propia empresa, se pueden disminuir las emisiones de carbono de una vivienda media entre un 60 y 90%, contribuyendo así a frenar el avance del efecto invernadero. No se ofrecen más datos de esta batería con convertidor.

Los precios de los modelos de RaStore son los siguientes:

- Modelo 3 kW: 9.995 €
- Modelo 4 kW: 11.450 €
- Modelo 5 kW: 13.995 €

4.4.3.8 Proyecto Almacena (REE).

Ese proyecto desarrollado en 2013 por Red Eléctrica Española consiste en la instalación de un gran bloque de baterías de Ión-litio en la ciudad de Sevilla con la finalidad de aumentar la eficiencia del sistema eléctrico.

Las especificaciones de las baterías se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 12. Características proyecto ALMACENA.

Características	Valor
Baterías	Ión-Litio
Potencia	1 MW
Capacidad	3 MWh
Tensiones de la estación	400/220 kV
Celdas/módulos/racks	9856/704/32
Presupuesto	3.5 M€

En la siguiente imagen se aprecia en qué periodo del día se cargarán las baterías, en la zona valle, donde el consumo de energía es muy bajo y la energía será entregada de vuelta a la red en los momentos de mayor demanda.

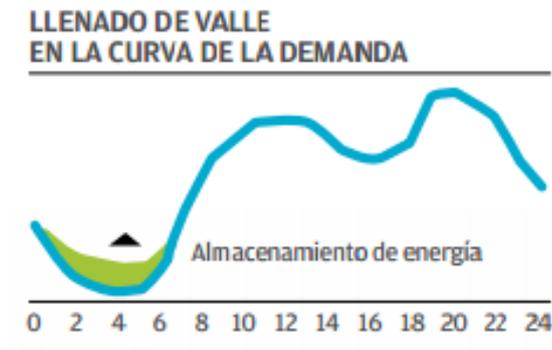


Imagen 33. Llenado de valle en la curva de la demanda.

Este proyecto no solo es viable para la eficiencia del sistema eléctrico, su estabilidad y calidad del suministro, sino también para la integración de las energías renovables y a mejorar la modulación de la curva de carga y la regulación de frecuencia-potencia. Este proyecto servirá además para exportar resultados a futuras aplicaciones relacionadas con este tipo de almacenamiento.

El proyecto consiguió, según datos de REE, almacenar en su primer año de funcionamiento 540 MWh, lo que equivale a cubrir el gasto energético de 100.000 viviendas durante 5 horas. Además el 43% de la energía que fue almacenada tenía una procedencia renovable.

4.5 Almacenamiento eléctrico y electromagnético

4.5.1 Ultracondensadores (EDLC)

4.5.1.1 Introducción.

Los condensadores electroquímicos o EDLC (Electrochemical Double Layer Capacitors) también son conocidos como supercondensadores. Los ultracondensadores son componentes electrónicos pasivos que permiten el almacenamiento de energía en pequeños periodos de tiempo. Su descubrimiento es bastante reciente (1969) y gracias a

sus características se han encontrado aplicaciones que suponen una pequeña revolución el mundo de la industria actual.

Antes de analizar este tipo de almacenamiento es necesario definir la pseudocapacitancia, el principio de funcionamiento en el que se basan los ultracondensadores: «La pseudocapacitancia es el almacenamiento de energía asociado a la acumulación de carga eléctrica entre las láminas del condensador gracias al medio aislante. Es un fenómeno que depende de la tensión, por lo que posee una capacitancia variable».



Imagen 34. Gama de ultracondensadores.

4.5.1.2 Funcionamiento y componentes.

El principio es el mismo que el de los condensadores tradicionales, el almacenamiento eléctrico gracias a campos eléctricos, se almacenan iones y no hay una transferencia de masa. Este modo de funcionamiento produce que su rendimiento sea mayor al de una batería, que como se vio en el apartado anterior, se basa en producción de energía a partir de reacciones químicas. Pero mientras que los condensadores tienen una capacidad del orden de mF, mientras que los ultracondensadores alcanzan magnitudes de 5000F.

El cambio principal frente a los condensadores consiste en acercar las cargas de distinta polaridad dentro del dispositivo a nivel molecular y además aumentar la superficie efectiva de los conductores.

Los componentes de los ultracondensadores son los siguientes:

- **Electrodos:** la capacidad de almacenamiento del ultracondensador es proporcional a la superficie de los electrodos y esta se consigue aumentar en gran medida la superficie de los mismos gracias a nano-poros que se forman al emplear (normalmente) carbono activado, aunque también se pueden estar formados por óxidos metálicos o polímeros conductores, dependiendo del uso que se le vayan a dar. Los óxidos metálicos y polímeros permiten fabricar

ultracondensadores de alta energía y alta potencia específica, pero su precio es mucho más elevado, ya que esta tecnología está menos desarrollada.

- Electrolito: es muy importante para los EDLC la combinación entre material del electrolito y material de los electrodos, así como la porosidad de estos para que los iones tengan una fluencia correcta por su interior. La elección del electrolito va a condicionar el voltaje de la celda y la densidad de energía de la misma. Por último añadir que existen dos tipos de electrolitos en la actualidad: orgánicos (más utilizados) o acuosos.
- Separador aislante: su función es impedir el contacto eléctrico entre los electrodos, pero sin embargo, permite la fluencia de electrones. Se utiliza aislante polimérico si el electrolito es orgánico o cerámico si son acuosos. Sus características más importantes son que su espesor sea muy pequeño, tener alta resistencia eléctrica y alta conductividad iónica.

4.5.1.3 Propiedades.

Ecuación de la cantidad de energía almacenada:

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

Siendo:

E = Energía almacenada [J]

C = Capacidad [F]

V = Tensión de continua máx. que soporta [V]

La capacidad del EDLC, al igual que de un condensador, es proporcional a la superficie de los electrodos y a la permisividad dieléctrica del medio e inversamente proporcional a la distancia entre los electrodos.

Las propiedades del ultracondensador están basadas en el circuito equivalente como vemos en la imagen:

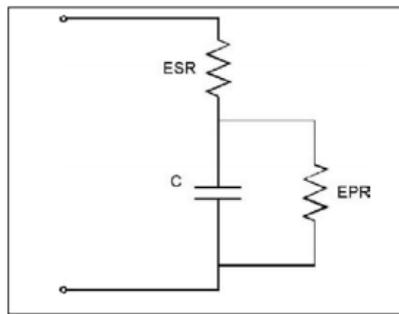


Imagen 35. Circuito equivalente de un ultracondensador.

Como vemos se puede apreciar, existe una resistencia equivalente en serie (ESR), la cual representa las pérdidas del dispositivo cuando conduce, y una resistencia equivalente en paralelo (EPR), que representa las perdidas por corrientes de fuga. Ambas son muy pequeñas, del orden de 1-10mΩ y 1-10mA respectivamente. Siendo esto así, se alcanzan rendimientos por encima del 95%.

A continuación, en la siguiente imagen es representado un ciclo típico de carga y descarga de un ultracondensador. Esta curva es muy similar a la de carga y descarga de un condensador tradicional.

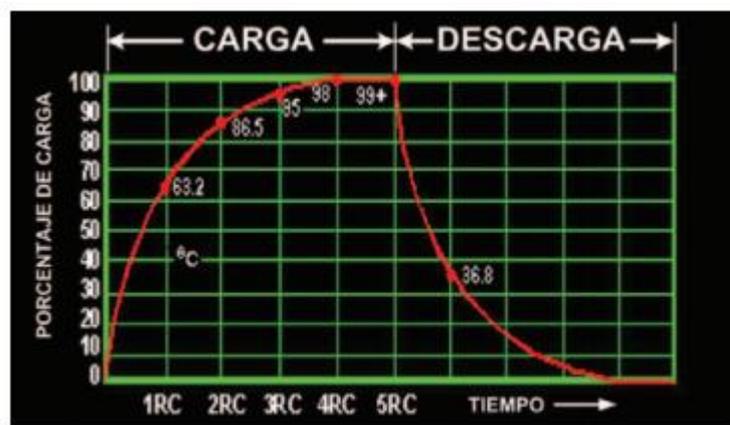


Imagen 36. Curva de carga/descarga de un ultracondensador.

Para poder hacernos una idea rápidamente de la comparación entre los principales tipos de baterías y los ultracondensadores, se verá en la imagen 31 dicha comparación entre densidad de potencia y densidad de energía, donde las líneas diagonales equivalen al tiempo de descarga.

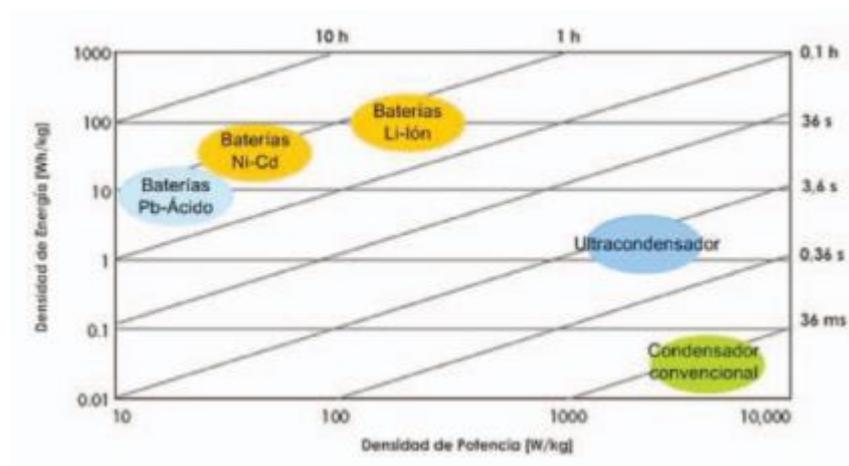


Imagen 37. Comparativa de ultracondensadores con baterías.

Lo que confiere a los ultracondensadores esa alta potencia específica es su capacidad de absorber y devolver iones entre los electrodos y el medio electrolito.

Es característico de los ultracondensadores que admitan un bajo voltaje de salida, por lo que usualmente se disponen en serie para sumar las tensiones individuales y alcanzar la tensión deseada, tal y como se hace con las baterías. Otras características de este SAE que lo que son que no posee partes móviles, ni elementos que produzcan reacciones químicas, por lo que los hace muy interesantes para algunas aplicaciones concretas, como puede ser la utilización en marcapasos.

4.5.1.4 Tipología.

Podemos clasificar los ultracondensadores de acuerdo a los electrodos que poseen, diferenciándose tres tipos de ellos:

- Ultracondensadores simétricos con electrodo de carbono: como ya sabemos, los EDLC almacenan energía de modo que los iones disueltos en el electrolito son absorbidos por los electrodos. Por ello es por lo que la energía almacenada en un ultracondensador depende proporcionalmente a la superficie de estos. Los ultracondensadores simétricos poseen ambas placas de electrodos iguales y además utilizan los electrolitos que corresponden, como se indicó en el apartado de componentes de este SAE.
- Ultracondensadores asimétricos: son muy similares a las baterías, ya que poseen un electrodo que no es posible polarizarlo y un electrodo utilizado normalmente en un ultracondensador.

- Ultracondensadores híbridos: se trata de una clase de supercondensador simétrico denominado condensador de litio. Como su nombre indica, este tipo de ultracondensador es una hibridación entre una batería de Ión-Litio y un ultracondensador, con lo que se consigue aumentar la tensión y la potencia gracias a cada tipo de almacenamiento respectivamente.

4.5.1.5 Ultracondensadores y baterías.

Dado que las baterías de Ión-Litio se podrían considerar su homónimo en los SAE electroquímicos, compararemos en la tabla siguiente las principales características de ambas:

Tabla 13. Comparativa entre ultracondensadores y baterías de Ión-litio.

Características	Ultracondensadores	Baterías Ión-Litio
Densidad de energía	1-10 Wh/kg	100 Wh/kg
Densidad de potencia	1-10 kW/kg	<260W/kg
Capacidad de almacenamiento	25 veces menor que una batería de Ión-Li	Hasta kWh
Rendimiento carga descarga	95% / Permite cargas y descargas muy rápidas.	60-90%
Voltaje de salida	No siempre constante	Constante
Rango Tª de trabajo	-40 – 70 °C	-10 – 30 °C
Ciclabilidad	500.000 ciclos	<2000 ciclos
Seguridad y medio ambiente	Muy alta / contaminan menos que las bat. de Ión-Li	Pueden llegar a explotar / Muy contaminantes
Precio	Hasta 3 veces mayor para la misma capacidad de energía.	Menor precio y mayor disponibilidad.

Observando las características de ambos, no se trata de determinar que un modo de almacenamiento es mejor que el otro, sino que son utilizados para aplicaciones diferentes, donde encaje mejor cada uno. Usualmente los ultracondensadores serán una mejor opción de almacenamiento en aquellas aplicaciones que requieran aportar al sistema una alta potencia durante un breve periodo de tiempo, mientras que elegiremos las baterías cuando sea necesario acumular grandes cantidades de energía.

Sin embargo, como se ha escrito en este mismo punto, es posible combinar baterías y ultracondensadores para obtener las ventajas de cada uno de ellos. Siendo esto así, en 2008 se desarrolló un nuevo método de almacenamiento denominado Superbatería por parte de la Comunidad Científica Australiana y la Organización de

Búsqueda Industrial (CSIRO). La Superbatería está formada por una batería de plomo ácido y un ultracondensador, y fue testada en un vehículo Honda híbrido con el cual se recorrieron 160.000 km sin necesidad de reemplazo de la batería.

Configuraciones híbridas

En la siguiente imagen se verá una configuración pasiva paralela (izquierda) y activa paralela (derecha) con baterías y ultracondensadores:

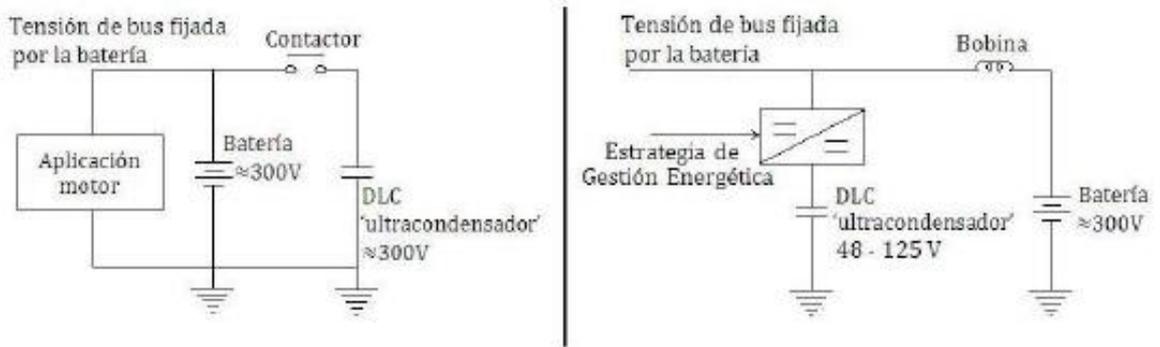


Imagen 38. Configuraciones híbridas entre ultracondensadores y baterías.

Se puede afirmar que a la hora de implantar esta hibridación la invariante tensión de salida de la batería limita la tensión almacenada del ultracondensador y las dos arquitecturas de la imagen, ayudan a solucionar este inconveniente.

En la siguiente tabla se presentan las características más significativas de ambas configuraciones:

Tabla 14. Características de configuraciones híbridas ultracondensadores-baterías.

Configuración pasiva paralela	Configuración activa paralela
Corriente por la batería suavizada	La corriente eficaz por la batería se reduce
Corriente por el ultracondensador tiene altos picos de corriente	Se reduce el calentamiento de la batería
Tensión en la batería posee altos impulsos, que puede derivar en problemas de ruido	La tensión conexión continua es fijada por la batería
Se reduce el rizado de tensión de salida de la batería gracias al ultracondensador	Menor distorsión en la tensión de conexión continua

4.5.1.6 Aplicaciones.

El desarrollo de los ultracondensadores los ha hecho especialmente adecuados para muchas aplicaciones, y las más importantes veremos a continuación:

Energías renovables

Fotovoltaica

En sistemas fotovoltaicos se utilizan ultracondensadores dispuestos en paralelo para estabilizar la tensión de salida de las células, permitiendo además disminuir picos de tensión. No sólo estas son las ventajas en aplicaciones a sistemas fotovoltaicos: siempre se han utilizado baterías para el almacenamiento energético solar, las cuales deben ser reemplazadas cada 3-7 años debido a su escasa ciclabilidad van perdiendo capacidad. Los ultracondensadores no solo tienen una mayor vida útil, sino que además su eficiencia de carga es mayor que en las baterías (pérdida de energía en la carga 30% en baterías de plomo-ácido frente a un 10% de los EDLC). También su rango de temperaturas de trabajo se presenta como un factor clave para la elección de los mismos.

El motivo por el cual en la mayoría de ocasiones se descartan como opción válida es su densidad de energía, muy baja comparado con las baterías, lo que para el mismo espacio de almacenamiento tendríamos una cantidad mucho menor de energía almacenada, además de su mayor coste.

Sin embargo, su combinación puede ser muy beneficiosa, alargando la vida de las baterías sin necesidad de sobredimensionamiento, y proporcionando alta densidad de energía y potencia. Este sistema es muy adecuado para almacenamiento en microrredes. Es necesaria la utilización de convertidores de potencia bidireccionales para poder controlar la potencia entre ambos.

Eólica

Los EDLC pueden ser utilizados como alimentación para el control del ángulo de alabeo de las palas de los sistemas aerogeneradores. Cada pala posee un servomotor que se alimenta gracias a unas baterías, y gracias a él se mueven las aspas en el ángulo requerido. Normalmente se han utilizado baterías para esta alimentación, pero los pulsos de potencia que requiere este movimiento han obligado a los ingenieros a sobredimensionar dichas baterías. Hay que tener en cuenta también para este caso la vida útil de las baterías, sumado al posible mantenimiento y dificultad de acceso a las baterías. Es por todo ello que los aerogeneradores de nueva generación incluyen ultracondensadores en vez de baterías para el control del ángulo de alabeo.

Transporte pesado y automoción.

Es viable el uso de EDLCs en vehículos pesados, y así ha sido demostrado en proyectos como el de trenes ligeros en Alemania, vehículos pesados eléctricos que además incorporan supercondensadores. Estos permiten, por ejemplo, en un pequeño tramo de vía evitar las catenarias para el tranvía o en el arranque de los trenes o ferrocarriles, donde se requiere una gran potencia en escaso tiempo, aportar la energía suficiente para lograrlo. También son una solución a sobretensiones producidas después de una pérdida de contacto con la catenaria que pondría en riesgo los circuitos de la maquinaria eléctrica.

La automoción es uno de los sectores que más ha impulsado la utilización de ultracondensadores, debido no sólo a la variabilidad del precio del petróleo, sino también gracias a una mayor sensibilización por parte de la población.

Son utilizados en vehículos eléctricos, híbridos y también en los denominados micro-híbridos (incluyen el sistema Start&Stop). Ayudan a reducir el consumo en todo tipo de vehículos y las emisiones de CO₂ en vehículos convencionales. En todas las ocasiones los EDLCs son un sistema complementario a su sistema de propulsión habitual, no constituyen un sistema de almacenamiento principal. Sin embargo, ante una necesidad de respuesta rápida a una aceleración, estos aportan la energía almacenada en un periodo breve, además de la posibilidad de almacenar energía procedente del frenado regenerativo. Constituyen también una manera de mantener la tensión de salida constante y proteger los semiconductores de potencia. Ofrecen apoyo a las baterías a temperaturas de trabajo donde son ineficientes, alargan su vida útil al prescindir de su uso para grandes picos de corriente y evitan el sobredimensionamiento del motor y las baterías, con la consiguiente reducción de espacio y peso.

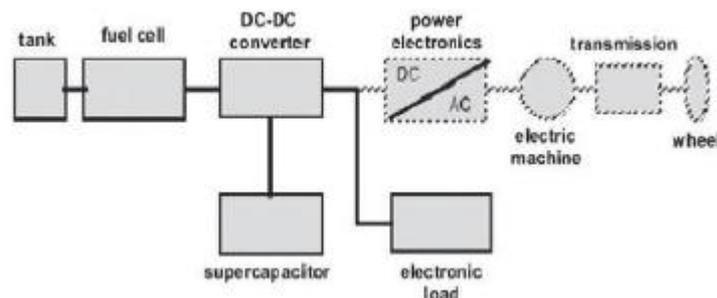


Imagen 39. Esquema de VE que utiliza ultracondensadores y celdas de combustible.

En el sistema Start&Stop que están incluyendo actualmente una gran cantidad de vehículos de motor de combustión, está basado en el almacenamiento de energía en

los ultracondensadores que será liberada en el arranque del motor, permitiendo además que cuando el vehículo esté detenido su consumo sea nulo (imitando en este aspecto a los vehículos eléctricos (VE)).

Sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS o SAI).

La finalidad de los ultracondensadores en momentos de un corte de suministro no es suplir dicho suministro durante todo el periodo, sino que gracias a la potencia que pueden aportar en poco tiempo permita el funcionamiento del sistema durante pocos minutos, y justo después entre en juego el banco de baterías o el generador diésel, los cuales necesitan este periodo de tiempo para ponerse en marcha o proporcionar la energía necesaria.

Almacenamiento energético (memorias de PC, relojes, cámaras de alta precisión, sistemas micro electrónicos, etc).

En estas aplicaciones se incorporan sistemas digitales cuya memoria necesita estar siempre alimentada. Un corte de este suministro puede provocar la pérdida de toda la información almacenada.

Debido a que los componentes a los que alimentan no necesitan grandes cantidades de energía, y para periodos de alimentación cortos, los ultracondensadores están tomando ventaja. En lugar de utilizar baterías, las cuales necesitarán un mantenimiento y será necesario reemplazarlas debido a su ciclabilidad, se han comenzado a utilizar EDLCs, que además resultan ser más económicos en este tipo de aplicaciones (siempre en baja potencia).

También se incluyen en este apartado la utilización de ultracondensadores en fuentes de alimentación portátiles. En multitud de aparatos electrónicos pueden utilizarse, debido a que por ejemplo, tienen picos de consumo en su encendido. En esta aplicación se verán siempre complementados por baterías.

Sistemas de transferencia de potencia.

Los supercondensadores tienen una relevancia considerable en el campo de la transferencia de energía. Los STATCOM (Compensador Estático Síncrono), dispositivos que aportan o absorben potencia, son utilizados con el fin de controlar de picos de tensión en la red de suministro. En el momento que son acoplados a sistemas que transfieren potencia aparece una alta inductancia, y con ello, un aumento de la

corriente y picos de tensión. La solución a este problema consiste en utilizar capacitancias para estabilizar la tensión y obtener una corriente constante.

Hasta ahora se han utilizado condensadores convencionales o baterías como dispositivos de carga de este sistema. Sin embargo, los ultracondensadores se presentan como una mejor opción en este campo, ya que se requiere una reducida densidad de energía y altas velocidades de carga y descarga. Si a estas ventajas sumamos el mayor rendimiento frente a las baterías y su larga vida útil nos damos cuenta de que, en la actualidad, es el sistema más recomendable. Las baterías no son una solución recomendable a este problema, debido a su lenta respuesta, a su ciclado y a las exigencias de carga y descarga de la misma. Esta situación reducirá enormemente la vida útil de la misma.

Grúas y ascensores.

Ambos sistemas presentan un funcionamiento con un consumo bastante equilibrado, debido a la utilización de contrapesos. Sin embargo, en la aceleración de subida y en la frenada durante la bajada existen grandes picos de consumo. Esto hace necesaria la presencia de la red de suministro y el uso de resistencias para el frenado que suponen un consumo de potencia alto.

Los ultracondensadores se están aplicando en este campo para almacenar energía que llega gracias a un sistema regenerativo controlando el motor, y debido a sus características de potencia y ciclabilidad hacen idóneos a los supercondensadores para esta aplicación.

4.5.1.7 Costes.

El coste de almacenamiento de los ultracondensadores se aproxima a 10-20 €/kWh, sin embargo, este precio será variable dependiendo del modelo de condensador que se escoja, el fabricante, capacidad, densidad de potencia, etc.

Los principales fabricantes de supercondensadores son Maxwell Technologies, fabricante americano con ultracondensadores con capacidades entre 10-3000F y tensiones entre 2.5-125V, y Panasonic, fabricante norcoreano con rangos de 1-5000F en capacidad y 2.3-340V en tensión. Los precios claramente son muy variables dependiendo de la capacidad de los mismos, el voltaje que aportan, etc.

Además hay que destacar que el coste de inversión que suponen los ultracondensadores es alto, relacionado claro su precio con la capacidad de almacenamiento del mismo

4.5.1.8 Resumen de características.

Se presentan a continuación las características más reseñables de los ultracondensadores:

- Permite funcionar con altas corrientes.
- Alto rendimiento (hasta 98%).
- Alta ciclabilidad y larga vida.
- Bajas necesidades de mantenimiento.
- Trabaja con un amplio rango de temperaturas (-40 – 70°C). La capacidad tiene muy poca variación con la temperatura.
- Inmunidad a vibraciones y golpes.
- Gran densidad de energía (1-10 Wh/kg).
- Permite cargas y descargas rápidas.
- Más seguros que las baterías y mucho menos contaminantes.
- Se pueden combinar fácilmente con las baterías, cuya sinergia ofrece las ventajas.
- Capacidad de almacenamiento limitada (baja densidad de energía).

4.5.1.9 Líneas futuras.

Debido a las características citadas anteriormente, sería posible sustituir baterías de cualquier tipo por ultracondensadores en todas las aplicaciones que requieran una alta potencia instantánea con una frecuencia de cargas y descargas elevada, y que no requieran grandes cantidades de energía.

En un futuro pueden empezar a aparecer una hibridación entre pilas de hidrógeno y ultracondensadores para aplicación en energías, debido al carácter renovable de las mismas, aplicado a vehículos eléctricos, híbridos o sistemas de microgeneración, aunque esto estará sujeto al desarrollo de la pila de hidrógeno, poco desarrollada actualmente y con escasas aplicaciones reales (viabilidad reducida). Las pilas de hidrógeno poseen la problemática por sí solas de una baja velocidad de respuesta, por lo que ante pulsos de energía instantáneos posiblemente no reaccionará dentro de los límites necesarios. Esta es justo una de las principales características de los ultracondensadores, con cuya hibridación se soluciona este problema; se puede obtener un suministro de energía estable.

En referente al sector del automóvil, donde el creciente impulso de los ultracondensadores ha tenido una gran relevancia, se espera que en un futuro próximo sean utilizados masivamente, permitiendo así el abaratamiento de costes de producción e instalación. Al igual que en el sector del automóvil, se espera la mayor inclusión de

ultracondensadores en vehículos de transporte pesado, ascensores y grúas y sistemas de estabilización de potencia.

4.5.1.10 Proyecto en La Palma.

La Palma es una isla aislada eléctricamente que es altamente probable que sufra pérdidas por generación en su sistema, lo que conlleva un desequilibrio entre producción y demanda. Se ha instalado un conjunto de ultracondensadores que evita los desequilibrios en la red, introduciendo potencia instantáneamente para evitar variaciones en la frecuencia, y gracias a ello aumentará la calidad del suministro eléctrico, evitando cortes de suministro a los usuarios, huecos de tensión, desestabilización del sistema, etc. Es debido a la precariedad del suministro y las posibilidades de desestabilización de la red, lo que hace es tan adecuado para las islas este tipo de SAE.

En la siguiente tabla se nombrarán las principales características del proyecto:

Tabla 15. Características del proyecto con ultracondensadores.

Característica	Valor
Potencia ultracondensadores	4 MW
Energía almacenada ultracondensadores	20 MWs
Tensión de red	20 kV
Tiempo de descarga ultracondensadores	Segundos
Presupuesto	11.5 M€

4.5.2 Superconductores (SMES)

Los imanes superconductores (Superconducting Magnetic Energy Storage) constituyen una novedosa forma de almacenamiento, que aunque es poco económica en la actualidad, es una de las formas de almacenamiento energético masivo que promete tener una vital importancia, así como lo son hoy en día las centrales hidráulicas.

4.5.2.1 Funcionamiento y componentes.

Funcionamiento

Para entender el funcionamiento de los superconductores, es necesario hacer referencia al efecto Meissner, el cual consiste en una transición en que un material que permite el paso de un campo magnético por su interior, pase al estado de superconducción y rechace de forma activa dichos campos en su interior. Para más información de este fenómeno consultar la referencia [21].

Este dispositivo de almacenamiento guardará en su interior energía procedente de un campo magnético que es generado mediante la aplicación de una corriente continua aplicada a la bobina. Su funcionamiento es idéntico al de una inductancia convencional, sin embargo, es el carácter superconductor lo que produce que se elimine la resistencia conductiva. Que se elimine esta resistencia implica que no se produce calor en la bobina, y no tendremos pérdidas por disipación térmica.

Los superconductores están formados por una bobina superconductora que se conecta a una fuente de tensión. Esta bobina estará criogenizada mediante Helio líquido o Nitrógeno líquido a una temperatura inferior a la crítica con el fin de que la bobina pueda mostrar su propiedad de superconducción. Una vez que se consigue que la bobina se cargue completamente, la corriente se mantiene constante y la energía (magnética) permanece, en teoría, almacenada sin límite de tiempo.

A continuación, se verá la ecuación que define la energía almacenada en el campo electromagnético:

$$E = \frac{1}{2} L I^2$$

Donde:

E = energía almacenada [J]

L = Inductancia [H]

I = Corriente [A]

Componentes

En la siguiente imagen se aprecian los principales componentes de un superconductor:

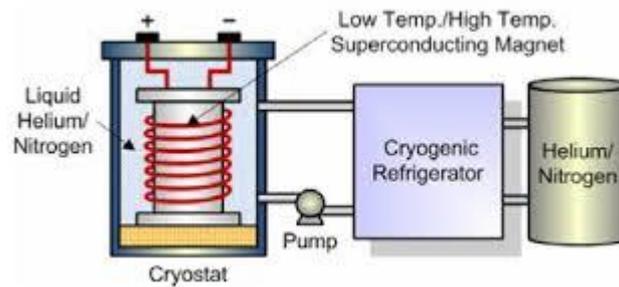


Imagen 40. Esquema de componentes de un superconductor.

- Bobina superconductor. Los materiales que la componen necesitan una serie de características para poder lograr superconductores comerciales, a saber:
 - > Una temperatura crítica lo mayor posible, para evitar un mayor consumo por parte del sistema de refrigeración y minimizar el coste de enfriamiento.
 - > Un campo magnético lo mayor posible, ya que, como se quiere almacenar la máxima energía posible en forma de campos magnéticos, mayor será cuanto más alto sea el campo crítico del material.
 - > Una densidad de corriente lo más alta posible, ya que cuanto mayor sea el valor crítico de esta, nos permitirá reducir la cantidad de material superconductor utilizado y menos costará el enfriamiento, por el menor tamaño.
 - > El coste del material debe ser el menor posible, así como su fabricación.
 - > Estabilidad suficiente en el material. Muchos materiales superconductores sufren deformaciones en su modo de funcionamiento y se vuelven inestables debido a las condiciones que soportan.

Es necesario para obtener el mayor valor posible de energía almacenada en a la bobina introduciendo una corriente, tener una geometría de bobina adecuada. Dicha geometría determinará la masa total del SAE, su capacidad de almacenar energía y emisiones magnéticas. Hay tres modelos utilizados en el diseño de SMES:

- > Solenoide convencional, con forma circular.
- > Solenoides coaxiales conectados entre sí en modo serie.
- > Solenoides con forma de toroide (circular u ovalado), formado por bobinas conectadas en modo serie.

- Sistema de refrigeración criogénico: el sistema se compone del refrigerador, aquí se prepara el líquido refrigerante, y por el contenedor criogénico, donde se encuentra el superconductor. Este sistema logrará enfriar y mantener el Helio o Nitrógeno líquido a las temperaturas que sean necesarias para que el material presente el fenómeno de superconducción, mediante baño en el refrigerante o mediante circulación forzada del mismo. Los refrigeradores actuales consumen aproximadamente 1.5 kW por MWh de energía que se disponga almacenada [18].
- Sistema de potencia (rectificador e inversor). Este sistema de conversión permitirá pasar de corriente continua a alterna y viceversa para almacenar energía o liberarla. Es el causante de prácticamente todas las pérdidas del sistema, con rendimientos de aproximadamente 96% [19].

Tipos de superconductores

Tipo I: son materiales que al llegar al estado de superconducción, rechazan el campo magnético de su interior. Este tipo de superconductor posee un campo crítico muy bajo, lo que reduce su posibilidad de aplicaciones reales.

Tipo II: estos materiales permiten el paso de flujo a través de su interior al entrar al estado de superconducción.

Mientras que los materiales superconductores del tipo I intentan siempre apantallar el campo magnético de su interior, los del tipo II intentan que dicho campo varíe lo menos posible por su interior.

El material más utilizado como superconductor en la actualidad es la aleación Niobio-Titanio para aplicaciones de alta potencia, con fines o no comerciales. Como no es el objetivo de este trabajo estudiar en profundidad dichos materiales, se ofrece más información para consultar acerca de ellos en la referencia [21].

4.5.2.2 Propiedades.

En la siguiente tabla se verán las principales propiedades del SMES:

Tabla 16. Principales características de los SMES.

Propiedad	Valor
Rango de energía almacenada	10.000- 13.000 MWh
Rango energía disponible	9000 – 10.000 MWh
Rango de potencia	1000 – 2500 MW
Duración de carga y descarga	Desde milisegundos hasta horas
Corriente máx.	50.000 – 300.000 A
Ciclabilidad	>100.000
Rendimiento superconductor	≈100%
Potencia refrigerador	20 – 30 MW
Rendimiento total	≈90% (debido a las pérdidas en rectificador/inversor)
Profundidad bajo superficie de instalación	300 – 400 m

Gracias a este SAE, es posible devolver energía al sistema ante una pérdida de generación gracias a su alta velocidad de respuesta y estabilizar transitorios de la red. Además posee un tamaño relativamente pequeño si lo comparamos con las centrales hidroeléctricas, y no posee las limitaciones de emplazamiento de estas, ya que podemos comparar ambos sistemas de almacenamiento debido a su capacidad de almacenaje a gran escala.

4.5.2.3 Tipología.

Existen distintos tipos de superconductores, a saber:

- SMES de baja temperatura crítica: se emplean con Helio líquido a 4 K y utilizan bobinados. Esta temperatura está tan próxima a la temperatura de cero absoluto que resulta inviable para dispositivos comerciales con la tecnología disponible actualmente.
- SMES de alta temperatura crítica: utilizan Nitrógeno Líquido a 77 K y también poseen bobinados. Aunque presenta problemas similares al caso anterior con el Helio, el Nitrógeno líquido es menos costoso económicamente.
- SMES de alta temperatura crítica sin bobinado: posee una ciclabilidad ilimitada y elimina los problemas que puedan surgir dependientes del bobinado.

4.5.2.4 Aplicaciones.

Sus principales usos actualmente son:

- La utilización de dicha energía almacenada para aportarla a la red y mejorar así la calidad del suministro, ayudando a suplir microcortes y huecos de tensión. Almacenan de grandes cantidades de energía durante un corto periodo de tiempo.

La red representada en la siguiente figura tiene como objetivo el acondicionamiento de señales que, mediante la conexión entre la línea de alterna y el bus de continua, permite la entrada de energía y su salida a la red.

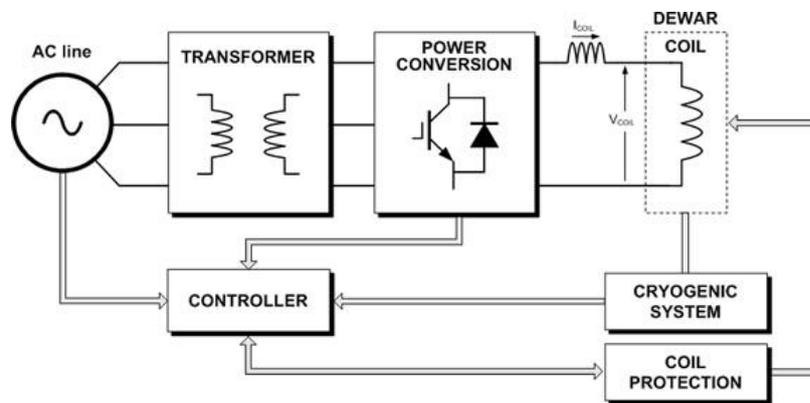


Imagen 41. Esquema de aplicación de un superconductor para la conexión con la red eléctrica.

- Almacenamiento y recuperación de energía procedente de excedentes de centrales eléctricas.
- Recuperación y acumulación de energía cinética procedente de frenada de vehículos de transporte pesados y automóviles.

4.5.2.5 Costes y fabricantes.

Se han realizado inversiones en EEUU con el fin de ampliar los conocimientos y desarrollar proyectos de SMES a pequeña escala, lo que hasta ahora era prohibitivo debido a su alto coste. A gran escala únicamente se presentan proyectos de diversas empresas, pero no llegan a la comercialización.

Aparte de estas investigaciones, se aportó a la Universidad de Houston recientemente una beca de 4.2 M\$ para desarrollar un superconductor de 1 a 2MWh a nivel comercial que sea competitivo frente a las baterías de plomo ácido [20]. Igualando este precio, este sistema sería competitivo frente a las baterías, aunque seguiría teniendo un mayor coste que el almacenamiento por bombeo eléctrico o por aire comprimido. A pesar de que el coste de los superconductores en estos últimos años, se estima se debería disminuir el precio un 300% para que este SAE pueda hacer frente a los otros sistemas de almacenamiento.

Los costes que a los que nos podemos aproximar actualmente con la tecnología disponible es para un tamaño de 10-1000 MW, 200-800€/kW y 200-800€/kWh [8]. Actualmente la inversión inicial que necesita este tipo de almacenamiento de energía es muy elevada, debido sobre todo al alto coste que posee el material superconductor, pero también al sistema criogénico. Se deduce por los presupuestos dados por algunos de los proyectos realizados que es de centenas de miles de euros.

Como fabricantes de superconductores se encuentran ABB que está colaborando junto con la empresa SuperPower, el laboratorio nacional de Brookhaven y la universidad de Houston para el desarrollo de un superconductor de 1-2 MWh que sea competitivo a nivel comercial; también se nombrará a la empresa Superconductor Technology, la cual se encuentra investigando metodologías para la mejora de la criogenización, mejores bobinados, etc.

4.5.2.6 Resumen de características.

Principales características de los SMES:

- Tecnología en fase de desarrollo.
- Tecnología de alto costo.
- Almacenamiento electromagnético.
- Necesitan estar conectados a una fuente de tensión, si no, se descargan.
- Resistividad eléctrica idealmente nula, con muy alta permisividad magnética.
- Temperaturas entre -253 y -263°C en recipientes con Helio líquido y aislados mediante vacío.
- Rendimiento muy cercano al 100%.
- Puede almacenar, en teoría, la energía para siempre si se corta la corriente.
- No producen efectos térmicos en su alrededor ni grandes campos magnéticos.
- Sin necesidad de mantenimiento.

4.5.2.7 Líneas futuras.

Actualmente se está investigando trabajar con temperaturas de 0K para tratar de alcanzar las características ideales de resistividad y permisividad magnética.

Por otro lado, también se investigan las formas de abaratamiento del sistema total, sobre todo en el desarrollo del proceso criogénico y el material superconductor, para así poder tener una aplicación comercial y aumentar su rentabilidad económica. Esta será la única manera de lograr la integración de los SMES como un sistema de almacenamiento competitivo económicamente, y lo que permita un mayor desarrollo de la tecnología utilizada.

Otra vía de desarrollo que está surgiendo son los aerogeneradores superconductores. Se ha observado que los SMES podrían fusionarse con los aerogeneradores, dando lugar a uno más eficiente. El problema de los generadores actuales es su peso, el cual ronda las 180 toneladas dependiendo del modelo. Utilizar imanes superconductores en los aerogeneradores reduce su peso y sus dimensiones, además de reducir la dependencia que existe debido a los materiales utilizados para los imanes convencionales cuyos materiales de fabricación son muy poco comunes. Debido a que por debajo de una temperatura denominada crítica los materiales superconductores no muestran resistencia eléctrica y además son capaces de soportar altas densidades de corriente, características muy apropiadas para su utilización en motores o generadores. Así, consigue reducir el tamaño del aerogenerador al 50% y su peso al 75% [21], además su ruido es mucho menor y su generación sería comparable a la de entre 3 y 6 molinos tradicionales.

Por tanto, este nuevo modelo de aerogenerador tiene numerosas ventajas: mayor potencia, optimización de la fuente renovable, menor impacto visual y acústico y una clara independencia de los materiales poco comunes de los que están fabricados los imanes convencionales, cuyo monopolio posee China.

Capítulo 5. Conclusiones.

Continuamente se avanza hacia una etapa que requiere cada vez un mayor consumo energético. Hasta ahora se ha realizado un abuso de consumo de las fuentes de energía basadas en los combustibles fósiles, pero se prevé su agotamiento en algunas décadas, o decenas de décadas según el combustible fósil. Es debido a estas razones y a la necesidad de un cambio en el modelo energético lo que impulsa el crecimiento de consumo de las energías renovables, consideradas como ilimitadas y limpias. Sin embargo, no puede concebirse el aumento de las mismas sin poseer la capacidad de almacenar la energía que se produce.

El continuo desarrollo de las fuentes de energía alternativas y los distintos sistemas de almacenamiento energético nos conducen hacia un nuevo modelo de red eléctrica, una SmartGrid, donde prima la comunicación entre usuarios consumidores con la red de distribución y existe la bidireccionalidad de la energía.

Realmente, todas las diferentes opciones de almacenamiento energético son válidas para la generación de energía, pero será necesario tener en cuenta su viabilidad, tanto tecnológica como económica. Es importante recalcar, aunque pueda parecer obvio, que para lograr el mayor aprovechamiento energético y cubrir todas las aplicaciones será necesaria la implantación de todos o casi todos los modos de almacenamiento disponibles y no centrarse únicamente en uno de ellos.

A día de hoy, para aplicaciones de transporte y distribución se presenta como la opción más competitiva el motor de hidrógeno, además del almacenamiento de aire comprimido y las baterías de Pb-ácido, debido a su costo, aunque las baterías de ión-litio se han impuesto como las más utilizadas en el vehículo eléctrico.

Para almacenamiento de energía a gran escala, como mejores opciones se presentan el bombeo hidráulico y el CAES, gracias a las cuales podemos almacenar cantidades masivas de energía a un menor coste. Sin embargo, ambas presentan el inconveniente de encontrar la situación adecuada para su instalación.

En aplicaciones de calidad de la energía suministrada lo más competitivo actualmente son las baterías de ión-litio debido a su menor coste anual y su capacidad de descarga en un breve tiempo es lo que hace tan atractivo a este sistema de almacenamiento. También se presentan como muy buena opción las hibridaciones de sistemas con ultracondensadores, debido a su ciclabilidad y capacidad de descarga.

A continuación se establecerán brevemente las conclusiones de cada sistema de almacenamiento:

1. Biomasa:

La biomasa se presenta como el mayor sistema de almacenamiento energético del mundo, ya que abarca toda la biodiversidad. Sin embargo, mal gestionada resulta catastrófica para el medio ambiente, no sólo no favoreciendo su expansión, sino generando grandes cantidades de emisiones contaminantes. Actualmente es un SAE poco relevante, es caro de producir y necesita un mayor desarrollo y concienciación por parte de la población, ya que son fáciles de almacenar (puede hacerlo cada persona).

2. Combustibles fósiles:

Son la principal fuente energética a nivel mundial debido a su elevada densidad energética, facilidad de transporte, especialización de los equipos que la utilizan, etc. Las emisiones que producen su utilización y su inminente desaparición es lo que más preocupa sobre esta forma de almacenamiento de energía.

3. Aire comprimido:

Es sin duda una de las mejores formas de almacenamiento masivo energético debido a su reducido precio de almacenaje. Es posible aprovechar cavidades naturales para ello o crear cámaras subterráneas o superficiales cerradas para dicho fin, aunque la primera opción se considera la mejor debido a su capacidad. A pequeña escala este método de almacenamiento aún no es competitivo económicamente frente al resto. Una de sus mayores ventajas es la sinergia que alcanza con las fuentes renovables solar y eólicas, muy abundante la segunda en nuestro país. A pesar de esto, es una tecnología no madura actualmente, posee grandes pérdidas y se necesita gran cantidad de energía para que la compresión se lleve a cabo.

4. Volante de inercia:

Este sistema de almacenamiento ha tenido una amplia expansión esta última década, encontrándose multitud de diversas aplicaciones para el mismo (tanto a pequeña como gran escala), como sistemas de alimentación ininterrumpida, regulación de frecuencia, vehículos y transporte pesado, hibridaciones, etc. Poseen la capacidad de carga y descarga muy rápidas con elevada eficiencia y alta ciclabilidad. Pero por otro lado, es una tecnología no madura, con altas pérdidas y una solución poco económica. Se prevé que su utilización aumente mucho en los próximos años debido a sus grandes ventajas, sobre todo debido a su gran relación entre potencia y peso.

5. Bombeo hidráulico:

Este sistema de almacenamiento es idóneo para almacenamiento masivo de energía, con un el coste de almacenamiento más bajo que cualquier otro SAE, posee una tecnología madura, buen rendimiento, bajo mantenimiento y larga vida, además de adaptarse muy bien a la producción eólica. Sin embargo está limitado al emplazamiento correcto que dependerá del entorno, provoca un gran impacto ambiental y se necesita un elevado capital inicial. Este sistema de almacenamiento es clave en España, actualmente y en un futuro, que permitirá aprovechar energía generada masivamente que se desperdiciaría de otro modo.

6. Almacenamiento térmico:

Este método de almacenamiento de energía puede aplicarse a gran escala o pequeña escala en edificios. Se complementa muy bien con la energía solar y son también muy utilizadas en procesos de cogeneración, climatización y calefacción. Se disponen de materiales para aplicación específica, posee altos rendimientos y alta ciclabilidad, es una tecnología investigada y con una capacidad de almacenamiento a largo plazo. Sin embargo, las pérdidas son variables dependiendo de la temperatura de trabajo, aumentando cuando éstas aumentan. Se prevé una mayor aplicación en edificios a corto-medio plazo.

7. Almacenamiento de hidrógeno:

Gracias a la energía eléctrica o de otro tipo se llevará a cabo la producción de hidrógeno para su posterior almacenamiento. El hidrógeno promete ser el vector energético que revolucione el mundo de las energías renovables, el transporte y otras aplicaciones posibles. El hidrógeno es posible obtenerlo de forma ilimitada a partir del agua, su combustión no genera gases contaminantes, posee una gran densidad energética y puede complementarse con todas las fuentes de energía primarias. Sin embargo, aún presentan enormes inconvenientes, como el coste de su producción, la necesidad de alta pureza del hidrógeno, baja eficiencia de conversión de H_2 y su transporte. Parece que tendremos que esperar bastantes años a que se profundice en su investigación, ya que es muy limitada actualmente, y pueda a llegar a ser competitivo económicamente.

8. Pilas de combustible:

Las pilas de combustible son semejantes a las baterías en el sentido en que se realiza una reacción química para dar lugar a energía eléctrica, sin embargo, en este

caso tendremos un tanque de combustible externo, con lo cual se consigue aumentar enormemente la capacidad. Existen diferentes tipos de pilas de combustibles dependiendo del electrolito utilizado, lo que le proporciona sus propias características de rendimiento, temperatura de operación, densidad de corriente, etc. Sus aplicaciones son bastante variables, que van desde aplicaciones de generación estacionaria y móvil, hasta aplicaciones espaciales y cogeneración.

Se estimaba que para el año actual las pilas de combustible hubieran tenido un impacto en el parque automovilístico en todo el mundo, aunque realmente sólo existen algunos prototipos de vehículos que apenas se han llegado a comercializar. Sin embargo, su aparición ha sido más marcada en aplicaciones estacionarias. Sus características prometen que sean una de los sistemas de almacenamiento con un mayor impacto en un futuro en todo tipo de aplicaciones, como su elevado rendimiento, modularidad y versatilidad, pero aún están en fase de desarrollo y son comercializadas difícilmente comercializadas.

9. Baterías:

Las baterías son el sistema de almacenamiento de energía más utilizado. Gracias a sus características, desarrollo, prestaciones y coste son normalmente el método más atractivo a la hora de almacenar energía (sobre todo a pequeña escala). Lo más interesante a nuestro parecer es la posibilidad de recarga de la batería: aunque las baterías primarias tienen una alta densidad de energía, muy bajo precio y baja autodescarga, ofrecen un uso muy limitado, para pequeñas aplicaciones; sin embargo, la posibilidad de recarga de las baterías es el factor más atractivo de las mismas, teniendo también alta densidad de potencia, descarga a altas corrientes y buen funcionamiento a baja temperatura.

Existen dos tipos de baterías que se posicionan indiscutiblemente como las más utilizadas, comercializadas y desarrolladas: las baterías de Pb-ácido y las de ión-litio, cuyas posibles aplicaciones abarcan todo el abanico de posibilidades de almacenamiento. Las baterías de Pb-ácido son muy utilizadas en almacenamiento solar y en vehículos, debido a su bajo coste y gran disponibilidad, altamente reciclables, y son capaces de aportar altas corrientes de descarga. Por otro lado, las baterías de ión-litio lideran el mercado de aplicaciones móviles, tanto de equipos electrónicos como de movilidad eléctrica gracias al vehículo eléctrico, pero también en aplicaciones estacionarias se va imponiendo poco a poco, como se ha visto con la PowerWall o RaStore, debido a su alta energía específica, alto rendimiento y baja autodescarga (aunque poseen un precio elevado en comparación a la anterior).

Aparte de esto, si las baterías de grafeno se comenzaran a comercializar, supondrían una revolución en el mundo de las baterías, del mercado automovilístico y

diversas aplicaciones más. Pero actualmente no se dispone de más información de las mismas.

10. Ultracondensadores:

Hace años se pensaba que los ultracondensadores que los ultracondensadores sustituirían a otros sistemas de almacenamiento en algunas aplicaciones. Esto no ha ocurrido así necesariamente, sino que los ultracondensadores poseen una alta sinergia con casi cualquier tipo de sistema de almacenamiento, permitiendo el mejor funcionamiento en la aplicación requerida con la utilización de ambos al mismo tiempo (los más comunes son con baterías y pilas de combustible), aunque no necesitan otro SAE para su correcto funcionamiento.

Poseen, al igual que las baterías, una amplia aplicación como transporte, sistemas de alimentación ininterrumpida, almacenamiento energético o transferencia de potencia. Tienen un altísimo rendimiento y ciclabilidad, además de permitir descargas y cargas rápidas, sin embargo, poseen poca densidad de energía y hoy en día su precio es aún elevado. Su utilización ha ido incrementándose a lo largo de esta última década, y se prevé que siga haciéndolo gracias al vehículo eléctrico y sistemas híbridos y de estabilización de cargas en la red.

11. Superconductores:

Esta novedosa forma de almacenamiento de energía promete ser de una vital importancia en un futuro en almacenamiento masivo de energía, procedente de centrales nucleares, térmicas, energías renovables...

Presenta características muy atractivas como muy alto rendimiento, almacenamiento de la energía a muy largo plazo y no generan efectos térmicos ni campos magnéticos. Sin embargo, actualmente los inconvenientes superan las ventajas de este sistema, los principales son: las bajísimas temperaturas necesarias para la criogenización del sistema y el coste inicial y de almacenamiento. Esta tecnología se encuentra aún en fase de desarrollo, y habrá que esperar bastantes años para que pueda llegar a verse un modelo comercial del mismo.

En la siguiente tabla se verá una comparativa de todos los sistemas de almacenamiento con sus características, centrándose principalmente en su energía y potencia:

Tabla 17. Resumen características SAE (1)

Almacenamiento	Tipo de energía	Rango de potencia	Energía específica (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Principal aplicación
Biomasa	Entalpía de la reacción	Bajo-alto	Baja-Media	Media	Transporte, generación, edificios.
Combustibles fósiles	Entalpía de la reacción	Alto	Alta	Media	Transporte, electricidad, edificios.
CAES	Potencial, entalpía	Alto	N/A	N/A	Electricidad.
Volante de inercia	Cinética	Bajo-medio	Baja	Alta	Transporte.
Bombeo de agua	Potencial	Alto	N/A	N/A	Electricidad.
Térmico	Entalpía	Medio-alto	N/A	N/A	Edificios.
Hidrógeno	Química	Alto	Media	Media	Generación, transporte.
Pilas de combustible	Electroquímica	Bajo-medio	Media	Media	Transporte, generación y cogeneración.
Baterías	Electroquímica	Bajo-medio	Media	Media	Transporte, electrónica.
Ultracondensadores	Electroestática	Bajo-medio	Baja	Alta	Transporte, electricidad
SMES	Electromagnética	Medio-alto	Alta	Alta	Electricidad

Se han establecido los rangos de potencia que pueden ofrecer los diferentes sistemas de almacenamiento según el siguiente criterio: bajo corresponde a kW, medio corresponde a MW y alto corresponde a cientos de MW. Para energía específica y potencia específica se han impuesto unos valores de 10^2 Wh/kg y 10^2 W/kg respectivamente como valores medios. Los valores que superen dicho valor serán considerados como altos y los que sean menores como bajos. Para todos los casos en los que pueda parecer variable el rango (p.e. Medio-bajo), esto indicará el rango que cubre dicha característica.

En la siguiente tabla se verán otras de las principales características de todos los SAE para poder establecer una comparativa entre los mismos:

Tabla 18. Resumen características SAE (2)

Almacenamiento	Rendimiento	Tiempo carga / descarga	Ciclabilidad	Estado de desarrollo	Dificultad emplazamiento
Biomasa	Dependiente de aplicación	Días/minutos	Infinita	Comercial	Baja
Combustibles fósiles	Dependiente de aplicación	Millones de años / minutos	Agotándose	Comercial	Difícil acceso
CAES	70-80%	Horas	Media-alta	Comercial	Media-alta
Volante de inercia	90%	Minutos o seg	Media	Comercial - precomercial	Baja
Bombeo de agua	80%	Horas	Media-alta	Comercial	Alta
Térmico	90%	Horas	N/A	Comercial	Baja
Hidrógeno	30-50%	Horas	N/A	Fase de desarrollo	Baja-media
Pilas de combustible	40-85%	Horas	Baja	Fase de desarrollo/ precomercial	Baja
Baterías	60-90%	Horas	Baja	Comercial/ precomercial	Baja
Ultracondensadores	90%	Minutos o seg	Alta	Comercial/ precomercial	Baja
SMES	95%	Horas o minutos	Media-alta	Fase de desarrollo	Media

Respecto a esta tabla se han de aclarar algunos aspectos: primero, la eficiencia de los diferentes sistemas de almacenamiento se establece como la eficiencia máxima que pueden lograr cada uno de ellos (en el caso en el que exista un rango de eficiencias será consecuencia de distintos tipos de almacenamiento dentro de esa división). Además, Se establecerá como una ciclabilidad media aproximadamente 10.000 ciclos. Por encima se considera una ciclabilidad alta y por debajo, baja. Respecto a la dificultad de emplazamiento se ha considerado el emplazamiento por unidad de cada SAE.

Se considera que con estas dos tablas comparativas de todos los sistemas de almacenamiento de energía es posible adquirir una visión suficientemente amplia de los mismos y entender sus aplicaciones y limitaciones.

No será incluido el coste en estas comparaciones de todos los sistemas de almacenamiento energético debido a que existen muchos diferentes tipos de costes, como coste de inversión inicial, coste de almacenamiento energético, coste de mantenimiento, costes de investigación, coste de la energía, etc, a pesar de haberse incluido brevemente en cada apartado. Se propone que el estudio de costes totales de

los sistemas de almacenamiento energético, el cual es amplio y complejo, podrá estudiarse en más profundidad en otro trabajo de fin de grado posterior.

Capítulo 6. Bibliografía.

Nota: la bibliografía consultada en internet tendrá al final del enlace entre paréntesis cuándo fue consultada.

Bibliografía introducción y problemática de la energía:

<http://www.energiza.org/biomasa/25-noticias/992-espaa%3%B1a-no-podr%C3%A1-cumplir-el-objetivo-del-20-de-renovables-en-2020> (mayo 2016)

REE (abril 2016)

IDEA (abril 2016)

Bibliografía energías renovables:

http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/i.-la-energia-y-los-recursos-energeticos (abril 2016)

<http://www.cie.unam.mx/~rbb/ERyS2013-1/EnergiaPrimaria-Secundaria.pdf> (abril 2016)

Bibliografía de SmartGrids:

http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/smart-city/smart-grid (mayo 2016)

<http://energy.gov/> (mayo 2016)

<http://smartgrid.gov/> (mayo 2016)

<http://smartgrid.ieee.org/> (mayo 2016)

<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-redes-inteligentes-de-energia-y-comunicacion-fenercom-2011.pdf> (abril 2016)

http://www.minetur.gob.es/industria/observatorios/SectorElectronica/Actividades/2010/Federaci%C3%B3n%20de%20Entidades%20de%20Innovaci%C3%B3n%20y%20Tecnolog%C3%ADa/SMART_GRIDS_Y_EVOLUCION_DE_LA_RED_ELECTRICA.pdf (abril 2016)

<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Vehiculo-Electrico-II-fenercom-2015.pdf> (mayo 2016)

Bibliografía de sistemas de almacenamiento de energía (introducción):

http://web.ing.puc.cl/~power/mercados/almacena/Almacenamiento_Energia_archivos/Almacenamiento_Energia.pdf (mayo 2016)

<http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/01/3.pdf> (mayo 2016)

http://power.sitios.ing.uc.cl/alumno12/almacena/Costos_y_Beneficios.html (junio 2016)

Bibliografía de biomasa y combustibles fósiles:

Libro Energías renovables – Jaime González Velasco (2009)

Libro Biomasa: estado actual y perspectiva inmediata – ICAI (2009)

<http://www.blogenergiasostenible.com/energia-biomasa-mundo-espana/> (abril 2016)

http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/Balance_de_la_biomasa.asp (abril 2016)

<http://www.energiza.org/biomasa/20-biomasa/953-situaci%C3%B3n-actual-de-la-biomasa-en-el-mundo> (abril 2016)

Artículo: Energía obtenida a partir de biomasa – Emilio Cerdá

<http://www.ecologistasenaccion.es/article9899.html> (abril 2016)

<http://www.ecologiaverde.com/los-recursos-naturales-que-antes-se-agotaran/> (abril 2016)

<https://bioecomasa.wordpress.com/2013/06/10/sistemas-de-almacenamiento-de-biomasa/> (abril 2016)

Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios – IDEA

La energía de los vegetales (2011)

Bibliografía de almacenamiento mecánico:

Almacenamiento de aire comprimido.

http://web.ing.puc.cl/power/alumno12/almacena/Almacenamiento_Pneumatic.html (mayo 2016)

<http://twenergy.com/a/ejemplos-de-la-tecnologia-por-aire-comprimido-como-sistema-de-almacenamiento-energetico-caes-2021> (mayo 2016)

<http://www.silvent.com/es/competencias/aire-comprimido-como-forma-de-energia/>
(mayo 2016)

Almacenamiento de energía mediante aire comprimido: plantas CAES - Alejandro Muñoz Diez de la Cortina (2015)

Volante de inercia.

<http://www.lanacion.com.ar/1153502-alternativas-en-el-almacenamiento-de-energia>
(mayo 2016)

http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/almacenamiento_1/almacenamiento_1.html (mayo 2016)

<http://www1.ceit.es/asignaturas/tecener2/Almacenamiento.pdf> (mayo 2016)

<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Almacenamiento-de-Energia-fenercom-2011.pdf> (abril 2016)

Análisis y diseño de volantes de inercia de materiales compuestos – Lluís Ripoll Masferrer (2005) (mayo 2016)

<http://www.ree.es/es/red21/idi/proyectos-idi/proyecto-volante-inercia> (marzo 2016)

http://www.ree.es/sites/default/files/presentacion_volante_de_inercia.pdf (marzo 2016)

Desarrollo de un almacenador cinético de energía – David Ugena González (2008)

Bombeo hidráulico

Análisis del potencial del almacenamiento en el sistema eléctrico español actual y futuro – store-project.eu (mayo 2016)

Bibliografía de pilas de combustible.

<http://www.cener.com/documentacion/microrred-ficha-407.pdf> (junio 2016)

Diseño y Fabricación de una Pila de Combustible de Hidrógeno de baja potencia – Javier Almarza Cano (2010)

Sistemas de acumulación de energía eléctrica para centrales de generación hidráulicas fluyentes – José Antonio Gallego Martín (2014)

Electrónica Industrial – Universidad de Valladolid (2016)

http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/ceramicas-y-vidrios/bloque-iv/pilas_de_combustible-1.pdf (junio 2016)

Bibliografía de baterías.

Impacto de la incorporación del vehículo eléctrico en la integración de las energías renovables en el sistema eléctrico – Nuria Galindo Martín (2010)

Qué hacemos para poner a cargar el coche en casa – Pedro de la Mata Gómez (2010)

Estudio de un sistema de almacenamiento de energía eólica por medio de baterías – Samuel Vélez Moreno (2012)

Viabilidad técnica para la explotación y separación isotópica de Li y prospectiva en el mercado de baterías ión-Li y de Li como material base de diseño en reactores de fusión nuclear – José Luis Herranz García (2013)

<http://www.mpptsolar.com/es/baterias-serie-paralelo.html> (junio 2016)

http://www.olajedatos.com/documentos/baterias_plomo.pdf (junio 2016)

[http://ametic.es/sites/default/files//media/Anexo1_Estudio_bat_estado_arte%20\(1\).pdf](http://ametic.es/sites/default/files//media/Anexo1_Estudio_bat_estado_arte%20(1).pdf) (junio 2016)

<http://www.ree.es/es/red21/idi/proyectos-idi/proyecto-almacena> (abril 2016)

Bibliografía de ultracondensadores.

<http://www.solociencia.com/ingenieria/06031004.htm> (2016)

<http://www.madrimasd.org/informacionIdi/analisis/analisis/analisis.asp?id=44183> (junio 2016)

<http://www.monografias.com/trabajos90/ultracapacitores/ultracapacitores.shtml> (junio 2016)

http://www.cinergia.coop/sites/default/files/2009_03_aei_2009_ultracaps_j_rafecas_0.pdf (junio 2016)

Caracterización y modelado de ultracondensadores – Manuel Navarrete Khibit (2012)

<http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/349/1259/6572/6589/77754.pdf> (junio 2016)

Bibliografía de superconductores.

<http://www3.icmm.csic.es/superconductividad/aplicaciones/energia/> (junio 2016)

http://www.technologyreview.es/printer_friendly_article.aspx?id=36932 (junio 2016)

http://www.utp.ac.pa/documentos/2014/pdf/10_Energi_a_magne_tica_1.pdf (junio 2016)

http://www.technologyreview.es/printer_friendly_article.aspx?id=36932 (junio 2016)

Bibliografía general.

<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Almacenamiento-de-Energia-fenercom-2011.pdf> (abril 2016)

http://www.aeeolica.org/uploads/documents/jir2010/III_Manuel-Cendagorta_ITER.pdf?phpMyAdmin=nkH26XnGN7Ws3Rn1f-QjR33eVc7 (mayo 2016)

Sistemas de almacenamiento de energía – Oscar Martín Sánchez y Diego Sánchez Vázquez (2004)

Sistemas de acumulación de energía eléctrica para centrales de generación hidráulicas fluyentes – José Antonio Gallego Martín (2014)

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70543/fichero/Memoria+Proyecto+Sistemas+de+acumulacion+de+energia+electronica+para+centrales+hidraulicas+fluyentes.pdf> (mayo 2016)

6.1 Referencias.

[1] “Almacenamiento de energía”, Modificación Wikipedia.com (mayo 2016)

[2] finanzas.com (junio 2016)

[3] Definición de biomasa por Emilio Cerdá - UCM

[4] P. Denholm, Kulcinski (2004)

[5] Bullough C. et al (2004)

[6] Evaluación de la tecnología CAES como sistema de almacenamiento de energía eólica – Laura Rodríguez Ávila (2014)

[7] <http://www.modernanavarra.com/wp-content/uploads/Renovables.pdf> (junio 2016)

[8] Universidad tecnológica de Panamá (2014)

[9] Emadi et al. (2005)

[10] Hebner et al. (2002)

- [11] fenercom.com (Mayo 2016)
- [12] store-project.eu (junio 2016)
- [13] Tester et al. (2005)
- [14] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70543/fichero/Memoria+Proyecto+Sistemas+de+acumulacion+de+energia+electronica+para+centrales+hidraulicas+fluyentes.pdf> (junio 2016).
- [15] World Energy Technology Outlook 2050 – Comisión Europea
- [16] energiaestrategica.com (junio2016)
- [17] <http://www.graphenano.com/es/> (mayo 2016)
- [18] S. Vasquez et al. (2010)
- [19] A. Ter-Gazarian (1994)
- [20] MIT Technology Review (2011)
- [21] icmm.csic.es (junio 2016)
- [22] <https://www.boe.es/boe/dias/2015/10/10/pdfs/BOE-A-2015-10927.pdf>
- [23] Hidrógeno y Pilas de combustible – Universidad Pontificia de Comillas (2010)
- [24] Petróleo, Gas natural y Carbón – Universidad Pontificia de Comillas
- [25] Biomasa: estado actual y perspectiva inmediata - Universidad Pontificia de Comillas (ICAI) (2009)

6.2 Índice de imágenes.

Imagen 1. Curva de demanda energética en España.

Fuente: REE (Abril 2016)

Imagen 2. Producción energética en España.

Fuente: REE (Abril 2016)

Imagen 3. Consumo energético final en España.

Fuente: IDEA (Datos de 2014-2015)

Imagen 4. Penetración de las energías renovables en Europa.

Fuente: politicaexterior.com (Mayo 2016)

Imagen 5. Esquema SmartGrids.

Fuente: vettecorp.com (junio 2016)

Imagen 6. Cambios en la curva de consumo gracias a las SmartGrids.

Fuente: REE (mayo 2016)

Imagen 7. Integración del VE en la curva de consumo.

Fuente: Universidad de Valladolid (2016)

Imagen 8. Crecimiento del VE a nivel mundial.

Fuente: ICCT (junio 2016)

Imagen 9. Comparativa de potencia específica/energía específica.

Fuente: Adaptación de Tester et al. (2005)

Imagen 10. Almacenamiento según su aplicación.

Fuente: <http://actitudecologica.com/almacenamiento-de-energia-mucho-mas-baterias/> (abril 2016)

Imagen 11. Almacenamiento según peso y tamaño.

Fuente: <http://docplayer.es/13650366-Sistemas-de-almacenamiento-energetico-mecanico-en-el-mundo-de-la-automocion.html> (abril 2016)

Imagen 12. Almacenamiento según coste capital.

Fuente:
http://power.sitios.ing.uc.cl/alumno12/almacena/Costos_y_Beneficios.html
(abril 2016)

Imagen 13. Almacenamiento según coste capital y ciclabilidad.

Fuente: http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/almacenamiento_1/almacenamiento_1.html (abril 2016)

Imagen 14. Almacenamiento según su desarrollo tecnológico.

Fuente: <http://www.slideshare.net/webgoddesscathy/emerging-energy-generation-and-storage-technology-by-mark-tinkler> (julio 2016)

Imagen 42. Almacenamiento según eficiencia y ciclabilidad.

Fuente: http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/almacenamiento_1/almacenamiento_1.html (junio 2016)

Imagen 16. Evolución de las diferentes fuentes de energía.

Fuente: fluidos.eia.edu.co (junio 2016)

Imagen 17. Esquema almacenamiento de aire comprimido.

Fuente: aeeolica.org (Mayo 2016)

Imagen 18. Esquema componentes volante de inercia.

Fuente: Peña-Alzola et al. (2008)

Imagen 19. Proyecto volante de inercia de REE.

Fuente: REE (mayo 2016)

Imagen 20. Esquema de una central hidroeléctrica de bombeo.

Fuente: unesa.es (mayo 2016)

Imagen 21. Esquema de una célula de combustible.

Fuente: APPICE (junio 2016)

Imagen 22. Curva de descarga de una pila alcalina.

Fuente: spanish.alibaba.com (junio 2016)

Imagen 23. Curva de descarga de una batería de Pb-ácido.

Fuente: kolff.com.ar (junio 2016)

Imagen 24. Curva de descarga de una batería NiMH.

Fuente: e-radiocontrol.com.ar (junio 2016)

Imagen 25. Curva de descarga de una batería Ion-Litio.

Fuente: <http://colmenarezjl.blogspot.com.es/2015/04/pilas-y-baterias-ii-bateria-li-ion.html> (junio 2016)

Imagen 26. Curva de descarga de una batería LiFePO₄.

Fuente: Fuente: <http://spanish.valve-regulatedleadacidbattery.com/sale-530934210ah-lfp-battery-cell-pouch-type-1282135.html> (junio 2016)

Imagen 27. Curva de descarga de una batería Li-Po.

Fuente: Electrónica Industrial, Universidad de Valladolid (junio 2016)

Imagen 28. Comparativa baterías densidad de energía/energía específica.

Fuente: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/PresentacionBaterias.pdf>

Imagen 29. Esquema batería de flujo redox.

Fuente: <http://www.ecointeligencia.com/2014/02/almacenamiento-energia-4/>

Imagen 30. Esquema conexión serie de baterías.

Fuente: google images (junio 2016)

Imagen 31. Esquema conexión paralelo de baterías.

Fuente: google images (junio 2016)

Imagen 32. Esquema conexión serie-paralelo de baterías.

Fuente: google images (junio 2016)

Imagen 33. Llenado de valle en la curva de la demanda.

Fuente: REE (mayo 2016)

Imagen 34. Gama de ultracondensadores.

Fuente: cinergia.coop (mayo 2016)

Imagen 35. Circuito equivalente de un ultracondensador.

Fuente: cinergia.coop (junio 2016)

Imagen 36. Curva de carga/descarga de un ultracondensador.

Fuente: cinergia.coop (junio 2016)

Imagen 37. Comparativa de ultracondensadores con baterías.

Fuente: cinergia.coop (junio 2016)

Imagen 38. Configuraciones híbridas entre ultracondensadores y baterías.

Fuente: Caracterización y modelado de ultracondensadores – Manuel Navarrete Khibit (2012)

Imagen 39. Esquema de VE que utiliza ultracondensadores y celdas de combustible.

Fuente: Pawan Sharma, T.S. Bhatti, A review on electrochemical double-layer capacitors, Elsevier Journal of Power Sources (2010)

Imagen 40. Esquema de componentes de un superconductor.

Fuente: jmirez.wordpress.com (mayo 2016)

Imagen 41. Esquema de aplicación de un superconductor para la conexión con la red eléctrica.

Fuente: sc.ehu.es (mayo 2016)

6.3 Índice de tablas.

Tabla 1. Beneficios de las SmartGrids.

Fuente: fenercom.com (mayo 2016)

Tabla 2. Aplicaciones de almacenamiento energético.

Fuente: perusolar.org (2013)

Tabla 3. Costes del CAES de una planta específica.

Fuente: silvent.com (Mayo 2016)

Tabla 4. Componentes de un volante de inercia.

Fuente: Modificación de Peña-Alzola et al. (2008)

Tabla 5. Tipos de volante de inercia.

Fuente: Peña-Alzola et al (2008)

Tabla 6. Proyecto volante de inercia de REE.

Fuente: REE (mayo 2016)

Tabla 7. Componentes de una central hidroeléctrica de bombeo.

Fuente: modificación de unesa.es (mayo 2016)

Tabla 8. Resumen de pilas de combustible.

Tabla 9. Resumen de baterías (potencia y energía).

Tabla 10. Resumen de baterías (principales características).

Tabla 11. Características de la Powerwall.

Fuente: <https://www.teslamotors.com/powerwall> (mayo 2016)

Tabla 12. Características proyecto ALMACENA.

Fuente: REE (mayo 2016)

Tabla 13. Comparativa entre ultracondensadores y baterías de lón-litio.

Tabla 14. Características de configuraciones híbridas ultracondensadores-baterías.

Tabla 15. Características del proyecto con ultracondensadores.

Fuente: REE (mayo 2016)

Tabla 16. Principales características de los SMES.

Tabla 17. Resumen características SAE (1)

Tabla 18. Resumen características SAE (2)

6.4 Índice de esquemas.

Esquema 1. Crecimiento de los sistemas de almacenamiento de energía.