

## **Capítulo 1: Introducción al Almacenamiento Energético**

## **Índice**

1	Introducción al almacenamiento energético .....	3
1.1	Propósito .....	3
1.2	Situación actual .....	4
1.3	Requisitos y ventajas de los diferentes sistemas de almacenamiento energético	5
1.3.1	Aplicaciones de almacenamiento de la energía eléctrica.....	5
1.4	Mercado actual y potencial .....	7
1.4.1	Análisis de los distintos usos de almacenamiento energético .....	7
1.5	Opciones tecnológicas: soluciones de almacenamiento de energía.....	14
1.5.1	Soluciones y opciones de almacenamiento de energía.....	14

# 1 Introducción al almacenamiento energético

## 1.1 Propósito

La confluencia de una serie de factores (incluyendo la ampliación de la generación renovable, los costos derivados de gestionar los picos de demanda de la red y la inversión de capital en la infraestructura de la red eléctrica para mejorar su fiabilidad así como en iniciativas de redes inteligentes) está despertando un renovado interés en los sistemas almacenamiento de energía eléctrica. Algunos de estos sistemas de almacenamiento son accesibles en la actualidad y están perfectamente preparados para ser integrados en el sistema eléctrico, mientras que otros todavía están en la cartera de I+D con intención de proporcionar soluciones para la industria próximamente. El objetivo de esta introducción es informar del estado actual y las nuevas tendencias en los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica.

Se presenta una visión general de las distintas aplicaciones del almacenamiento de energía así como de las diferentes opciones tecnológicas. Un objetivo final de este trabajo es estimar la importancia que los sistemas de almacenamiento de energía tienen en las siguientes aplicaciones:

- La integración de la energía fotovoltaica
- Integración de la energía eólica
- Aplicaciones del almacenamiento de energía en el sistema eléctrico
- Gestión de activos en el sistema de transmisión y distribución
- Aplicaciones comerciales e industriales
- Almacenamiento distribuido de la energía cerca de los usuarios finales
- Aplicaciones de almacenamiento de energía en el sector residencial

Para cada área de aplicación, el informe presenta una visión general sobre ésta y la correspondiente opción de almacenamiento energético, incluyendo:

- Una breve descripción de las tecnologías
- Un resumen del estado de desarrollo de la tecnología
- Los principales problemas técnicos y la dirección de desarrollo futuro y tendencias

## 1.2 Situación actual

Existe una enorme variedad de opciones potenciales de almacenamiento de energía para el sector eléctrico, cada una con distintas características de funcionamiento, operación y durabilidad. La Figura 1 proporciona una comparativa de la capacidad total instalada actualmente en todo el mundo.

Si bien se han instalado muchas formas de almacenamiento de energía, los sistemas de bombeo hidráulicos son, con mucho, los más utilizados con más de 127.000 megavatios (MW) instalados en todo el mundo. Las instalaciones de almacenamiento de energía a través de aire comprimido (CAES) son las siguientes con 440 MW, seguido por las baterías de sulfuro de sodio (NaS) con aproximadamente 316 MW, lo que representa 1896 megavatios/hora (MWh) desplegados en 221 emplazamientos. Además, hay proyectos ~ 606 MW (3.636 MWh) para este tipo de baterías previstos en todo el mundo. Los recursos de almacenamiento de energía restantes suman menos de 85 MW y se trata principalmente de instalaciones únicas en el mundo.

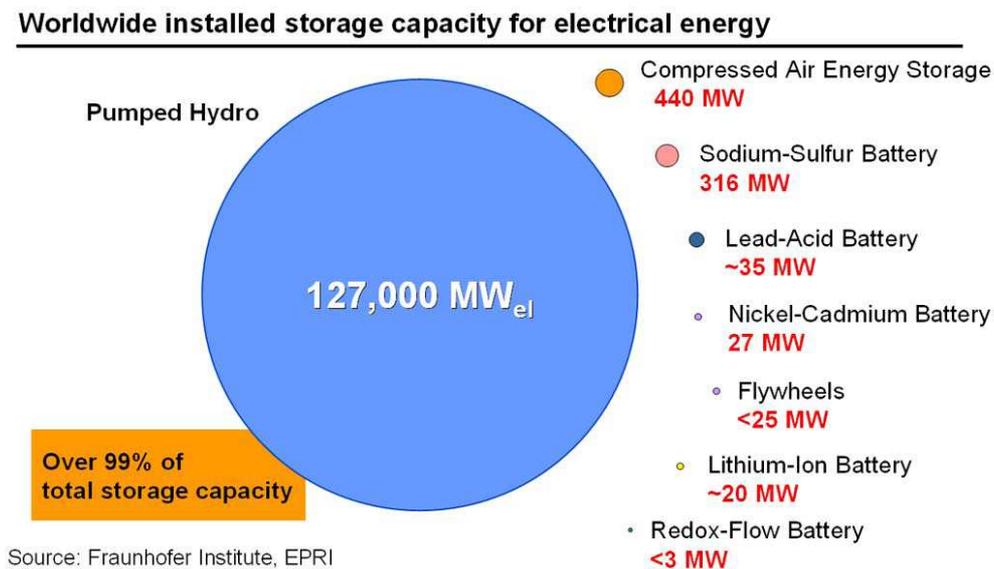


Figura 1.- Capacidad de almacenamiento de energía eléctrica instalada en todo el mundo.

## 1.3 Requisitos y ventajas de los diferentes sistemas de almacenamiento energético

### 1.3.1 Aplicaciones de almacenamiento de la energía eléctrica

Los sistemas de almacenamiento de energía proveen una gran variedad de soluciones de aplicación a lo largo de toda la cadena del sistema eléctrico, desde el apoyo a la generación, así como a la transmisión y distribución hasta llegar al usuario final. En la tabla se resumen las 10 aplicaciones clave que forman la base de éste análisis.

Posición en el sistema	Aplicación		Descripción
Generación y aplicaciones para el sistema eléctrico en general	1	Servicios de energía en general	Sistemas de almacenamiento a gran escala capaces de competir en los mercados de energía, capacidad y servicios secundarios
	2	Integración de las renovables	Sistemas de almacenamiento de apoyo a las renovables que favorecen su integración en el sistema eléctrico gracias a que son capaces de desplazar la oferta/demanda, además de ofertar energía y servicios secundarios.
	3	Almacenamiento estacionario de apoyo a la red de transporte y distribución	Este tipo de sistemas mejoran el factor de utilización y al mismo tiempo disminuyen el capital a invertir en infraestructuras
Aplicaciones en el sistema de transmisión y distribución	4	Almacenamiento móvil de apoyo al sistema de transmisión y distribución	Sistemas móviles de almacenamiento de apoyo al sistema capaces de operar dónde se necesite
	5	Sistemas de almacenamiento distribuido de energía	Gestión centralizada de los sistemas modulares capaces así de proporcionar mayor fiabilidad al cliente y a la red así como servicios auxiliares potenciales
	6	Sistemas de control de las empresas de servicios energéticos (ESCO)	Dirección centralizada de sistemas de almacenamiento de pequeños clientes (sector residencial) para ofrecer beneficios al sistema de distribución
	7	Alimentación fiable y de calidad a nivel comercial e industrial	Sistemas capaces de ofertar un suministro de estas características a comercios e industrias
Aplicaciones a nivel del consumidor final	8	Gestión de la energía en comercios e industrias	Sistemas capaces de reducir los tiempos de uso, los costos de la energía y la demanda de los clientes de los sectores comercial e industrial
	9	Gestión de la energía en los hogares	Sistemas para desplazar la demanda en el tiempo y reducir el tiempo de uso de la energía y la demanda
	10	Sistemas de respaldo en los hogares	Sistemas para reforzar el suministro en hogares y oficinas en casa con un elevado índice de fiabilidad

Tabla 1.-Definición de las diferentes aplicaciones de almacenamiento energético.

La Figura 2 ilustra las características de las distintas tecnologías de almacenamiento de energía en términos de potencia a lo largo del eje X y tiempo de descarga a potencia nominal en el eje Y. Más adelante se discutirán los requisitos de solicitud y las características de cada tecnología.

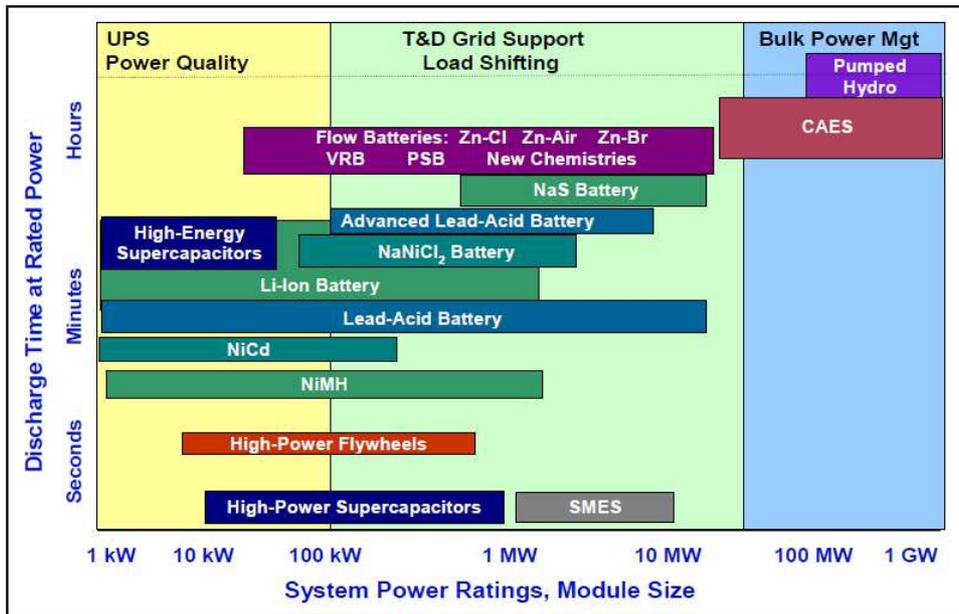


Figura 2.- Clasificación de las diferentes tecnologías de almacenamiento.

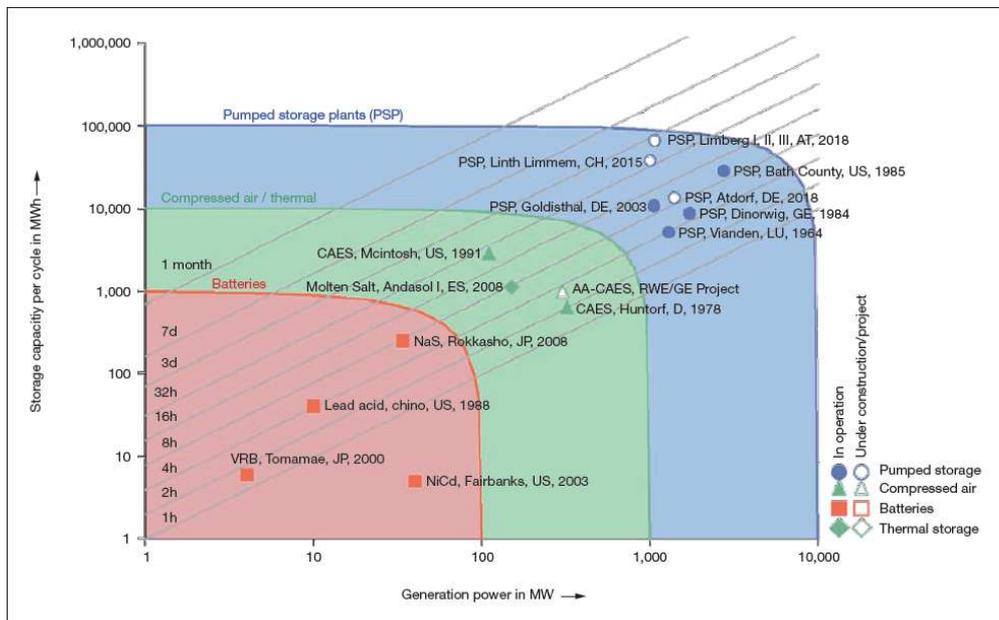


Figura 3.- Selección de plantas y proyectos que representan el estado del arte en términos de potencia y capacidad de almacenamiento (AA-CAES - Advanced Adiabatic CAES, CAES - Compressed Air Energy Storage, NaS - Sodium Sulphur Battery, NiCd - Nickel Cadmium Battery, VRB - Vanadium Redox Flow Battery). La turbina de potencia de las CAES en Huntorf y en McIntosh incluyen combustión de gas. Las grandes PSP son un orden de magnitud mayores que las CAES y el almacenamiento térmico, que a su vez son un orden de magnitud mayores que las principales plantas de baterías.

## **1.4 Mercado actual y potencial**

### **1.4.1 Análisis de los distintos usos de almacenamiento energético**

En los siguientes apartados se describen las características de una selección de aplicaciones de almacenamiento energético: integración en el sistema eléctrico, aplicaciones en la red eléctrica, aplicaciones de almacenamiento distribuido de energía, aplicaciones comerciales e industriales y aplicaciones residenciales.

#### **1.4.1.1 Aplicaciones para el sistema eléctrico en general**

Las aplicaciones al sistema son aquellas en las que el almacenamiento de energía ofrece oportunidades al mercado de la energía en general, así como otros beneficios, al participar en la subasta de energía, ayudar a reducir la congestión en la transmisión, reducir los precios marginales locales, regular el voltaje y la frecuencia tanto a nivel de la red eléctrica o para usuarios finales.

Tales sistemas de almacenamiento energético estarían generalmente en el rango de tamaño de 50 a 400 MW o más durante 6 a 10 horas para el almacenamiento a gran escala, o bien de entre 1 a 50 MW durante 15 minutos a 1 hora de almacenamiento para alisar la curva de generación renovable (intermitente) y equilibrar la oferta y la demanda. Las opciones tecnológicas para estas aplicaciones incluyen el bombeo hidráulico, el almacenamiento de energía a través de la compresión subterránea de aire (CAES), baterías de gran capacidad como las de zinc-bromo y vanadio-redox, los grandes sistemas de baterías de plomo-ácido avanzadas, las baterías de iones de litio y los sistemas de volantes de inercia. Tecnologías emergentes todavía en la fase de I + D, tales como zinc-aire, el zinc-cloro y otras químicas de baterías también tienen un importante potencial, pero primero debe ser probado y demostrado a una escala más reducida. Muchos expertos del sector creen que los sistemas de almacenamiento de energía van a desempeñar un papel clave en el apoyo a la regulación de frecuencia, los servicios auxiliares y la integración de la energía eólica, a aliviar la congestión en la transmisión y la distribución y mejorar el equilibrio entre la oferta y la demanda. Sin embargo todavía no son muchos los estudios y análisis disponibles que estimen cuánto, dónde y qué tipos de sistemas de almacenamiento de energía son más eficaces para la integración de la eólica.

Simulaciones realizadas sobre grandes unidades CAES han demostrado que se puede reducir la congestión en las líneas de transmisión, permitiendo así que la energía eólica pueda entregar aproximadamente 100 GWh más energía anualmente.

Estos estudios también han demostrado los beneficios sociales y para el sistema eléctrico que la pequeña batería puede ofrecer a través de los sistemas distribuidos de almacenamiento energético, que pueden llegar a ser muy importantes cuando los sistemas de almacenamiento están dirigidos a centros de demanda específicos donde se dan precios locales marginales muy elevados.

- Integración de la energía eólica

Es de esperar un importante crecimiento de la generación de energía eólica en los próximos 30 años si las políticas para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> se siguen implementando. Muchos expertos creen que se necesitará alguna forma de

almacenamiento de energía eléctrica para favorecer el equilibrio del sistema eléctrico y mejorar el factor de capacidad de generación de la energía eólica en el sistema, que es ahora inferior al 40% y podría ser inferior al 30% cuando la generación eólica se vea limitada debido a restricciones en la transmisión. El almacenamiento puede ayudar acumulando electricidad por la noche cuando la demanda es baja y actuar como un amortiguador para suavizar las fluctuaciones del viento.



**Figura 4.-** Maple Ridge Wind Farm, Nueva York.

La variabilidad del viento hace que su integración en el sistema eléctrico sea un reto, como se ilustra en la Figura 5, que muestra la variación de la producción de un parque eólico en Texas. Desde una perspectiva más amplia, la Figura 6 muestra el caótico día a día en cuanto la variabilidad de la producción de un gran parque eólico durante más de un mes, junto con la variación de la media. El almacenamiento de energía puede desempeñar un papel estabilizador muy importante apoyando las operaciones de las redes de transporte. Esto último se está llevando a cabo actualmente a través de turbinas de gas y otros sistemas de generación basados combustibles fósiles. Integrar el almacenamiento puede producir una nueva escala de valores entre los que se encuentran el aumento de la capacidad del sistema, la transmisión de energía de reserva, la gestión de la energía y la reducción de los costos de integración de las renovables.

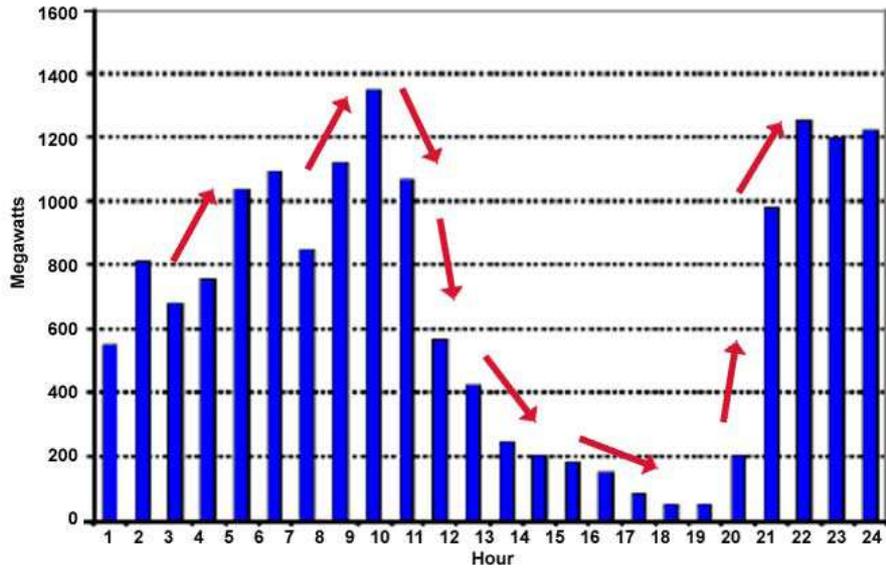


Figura 5.- Ejemplo de inestabilidad en la generación de un parque eólico en el transcurso de un día.

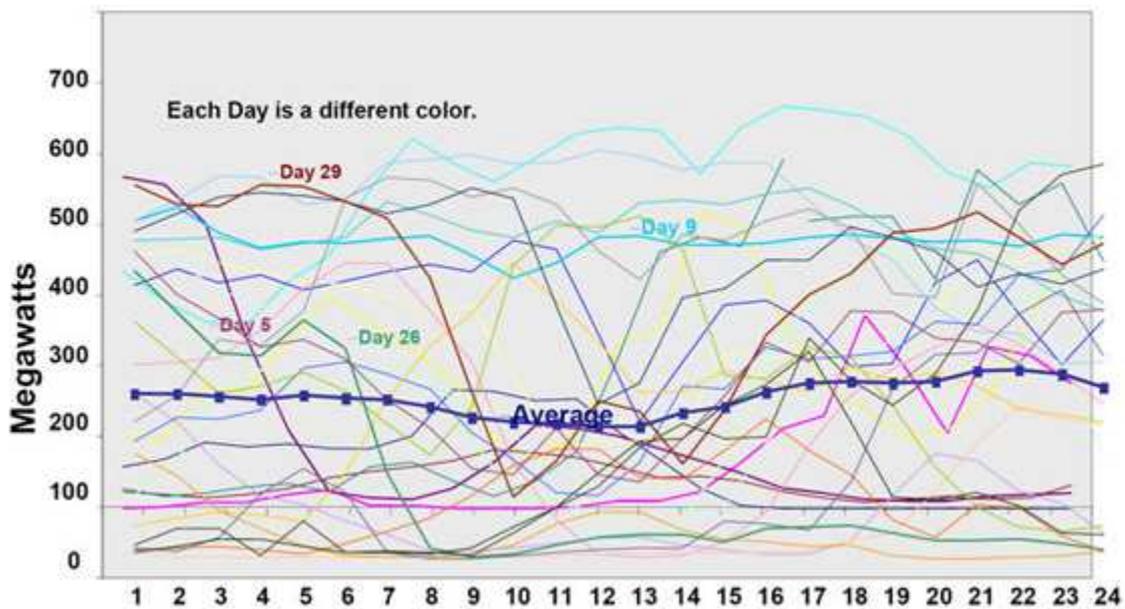


Figura 6.- Inestabilidades día a día en un parque eólico durante un mes junto con la media.

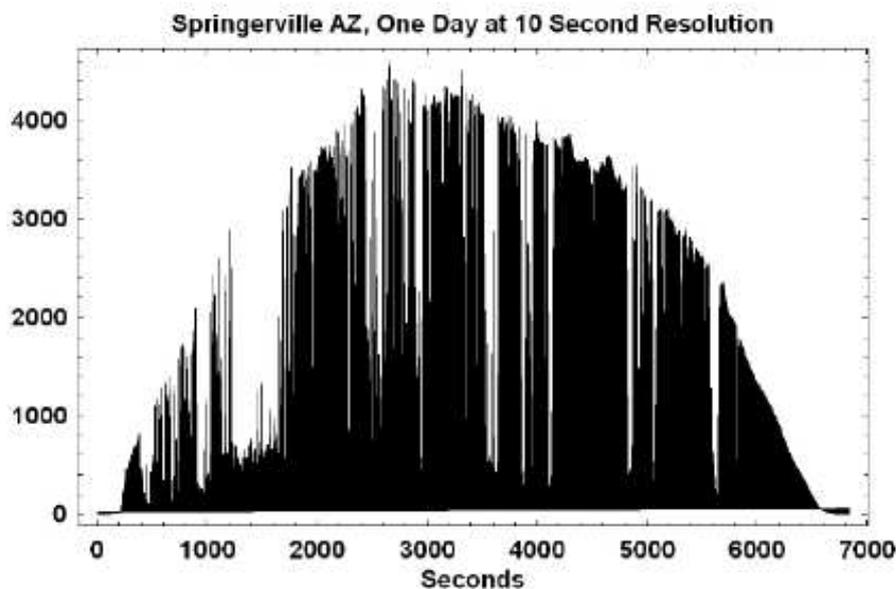
Hacer coincidir los requisitos que implica la integración de la energía eólica con la generación a través de combustibles fósiles se traducirá en emisiones adicionales asociadas a la operación a carga parcial de las centrales térmicas cuando se sitúan en los niveles de operación necesarios para apoyar la integración de las renovables. Los sistemas de almacenamiento de energía pueden mitigar parcialmente estos efectos.

Las aplicaciones orientadas hacia la integración de la eólica requieren grandes capacidades de almacenamiento (de 1 a 400 MW de 4 a 10 horas o más) y pequeños sistemas (de 1 a 20 MW/15- a 60 min) para suavizar y equilibrar la transmisión. De entre las tecnologías que parecen ser compatibles con estos requisitos se incluyen el bombeo hidráulico, el almacenamiento de energía en forma de aire comprimido (CAES), principalmente con el almacenamiento subterráneo, grandes baterías de flujo, como los sistemas redox de zinc-bromo y vanadio, baterías

de plomo-ácido avanzadas y de iones de litio, así como los sistemas de volantes de inercia para una respuesta rápida y suavizada.

- Integración fotovoltaica

Las grandes instalaciones fotovoltaicas (del orden de megavatios) necesitarán almacenamiento de energía debido a la aparición de grandes caídas de tensión y cambios rápidos de la demanda debido a los efectos de las nubes. Estos efectos pueden ser aún más graves que las fluctuaciones propias de la eólica, ya que son mucho más rápidos. Dichas inestabilidades (Figura 7) presentan un reto significativo para la red eléctrica que trata de integrar y administrar estos recursos en sus sistemas.



**Figura 7.-**Valores de salida de una gran planta de energía fotovoltaica en un día, es posible apreciar rápidas variaciones debidas a las nubes

En los últimos años, el aumento de la penetración fotovoltaica en la red de distribución ha presentado problemas operacionales para el sistema eléctrico. Los sistemas de almacenamiento de energía pueden aliviar las oscilaciones de tensión en la red de distribución. Las grandes plantas fotovoltaicas también pueden requerir sistemas de almacenamiento de energía de alta potencia y poca energía que puedan realizar muchos ciclos y sean capaces de dar una respuesta rápida. Estos sistemas en general estarían en el rango de 500 kW a 1 MW o mayores, con un tiempo de almacenamiento de 15 minutos a 1 hora y podrían incluir baterías de plomo ácido avanzadas, de iones de litio y supercondensadores.

#### **1.4.1.2 Aplicaciones en la red eléctrica**

La gestión de los picos de demanda de la red en zonas urbanas y rurales es un asunto crítico para las empresas suministradoras. Continuamente se realizan grandes inversiones en infraestructuras de transporte y distribución y es de esperar que haya que

realizar inversiones adicionales para la integración de las redes inteligentes o la energía eólica.

Dichas infraestructuras tienen que diseñarse para soportar los picos de demanda, los cuales representan sólo unas 400-500 horas anuales. Los sistemas de almacenamiento de energía ofrecen a la red eléctrica nuevas herramientas para mejorar el uso y empleo de capital para conseguir nuevas capacidades, mayor fiabilidad y apoyo a la red tanto en las zonas rurales aisladas y como en las saturadas zonas urbanas.

Las aplicaciones de apoyo a la transmisión y distribución de la red incluyen:

- Permiten un aplazamiento de la inversión de capital de dos a cuatro años en nuevos equipos tales como transformadores, así como nuevas líneas en zonas rurales y urbanas donde el crecimiento de la carga es pequeño mientras que los gastos de capital son muy grandes
- Beneficios similares para periodos de dos a cuatro años al utilizar equipos de almacenamiento de energía que puedan trasladarse a las zonas urbanas donde se más necesiten. Aplicaciones relacionadas incluyen la disminución de interrupciones del servicio y mejores tiempos de restauración
- Apoyo en los nodos congestionados en lugares donde se dan precios locales marginales muy elevados. Los posibles beneficios incluyen el aumento del factor carga en las líneas de transmisión congestionadas, la regulación de la frecuencia, la suavización de los picos y el desplazamiento en el tiempo de la demanda

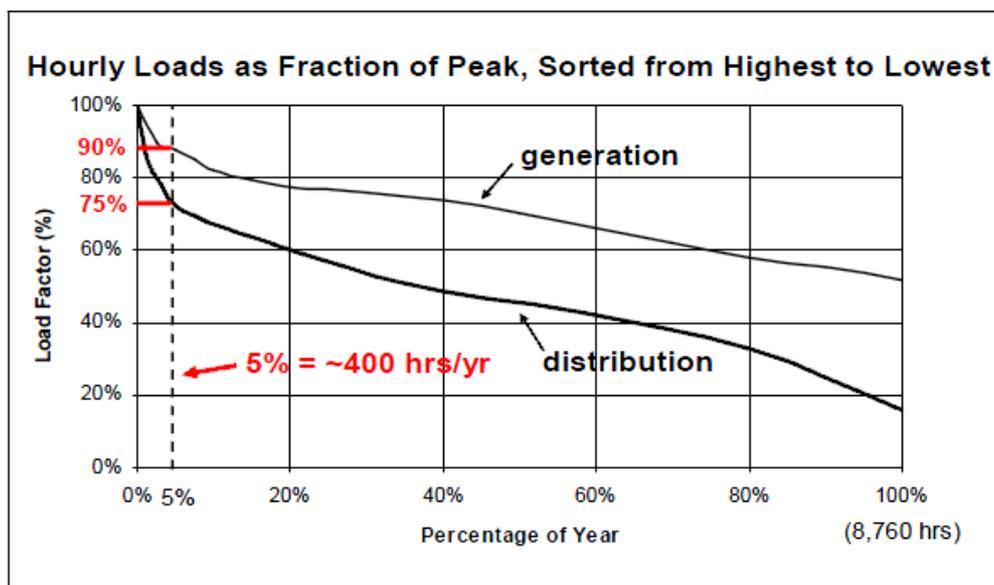


Figura 8.-Las inversiones significativas en infraestructura de la industria de T & D se requiere sólo alrededor de 400 horas por año

Las opciones tecnológicas de almacenamiento de energía incluyen baterías de plomo avanzadas, CAES con almacenamiento sobre la superficie, NaS, vanadio-redox, ZnBr, Fe-Cr, Zn-aire e ión-litio.

### 1.4.1.3 Sistemas de almacenamiento de energía distribuido

Los sistemas de almacenamiento energético distribuido (Distributed energy storage systems, DESS) comprenden pequeños sistemas de almacenamiento situados del lado de la red del medidor, por lo general al lado de un transformador que da servicio de cuatro a ocho viviendas, un parque empresarial, un campus o unidades multifamiliares (Figura 9 y Figura 10). Cada unidad individual del sistema puede ser controlada a distancia para gestionar su carga y descarga en respuesta a las necesidades localizadas del circuito, subestación, o sistema. Estas unidades están prediseñadas para soportar cargas máximas en los meses de verano y brindar apoyo de refuerzo cuando sea necesario.



Figura 9.- Concepto de un barrio usando almacenamiento distribuido.

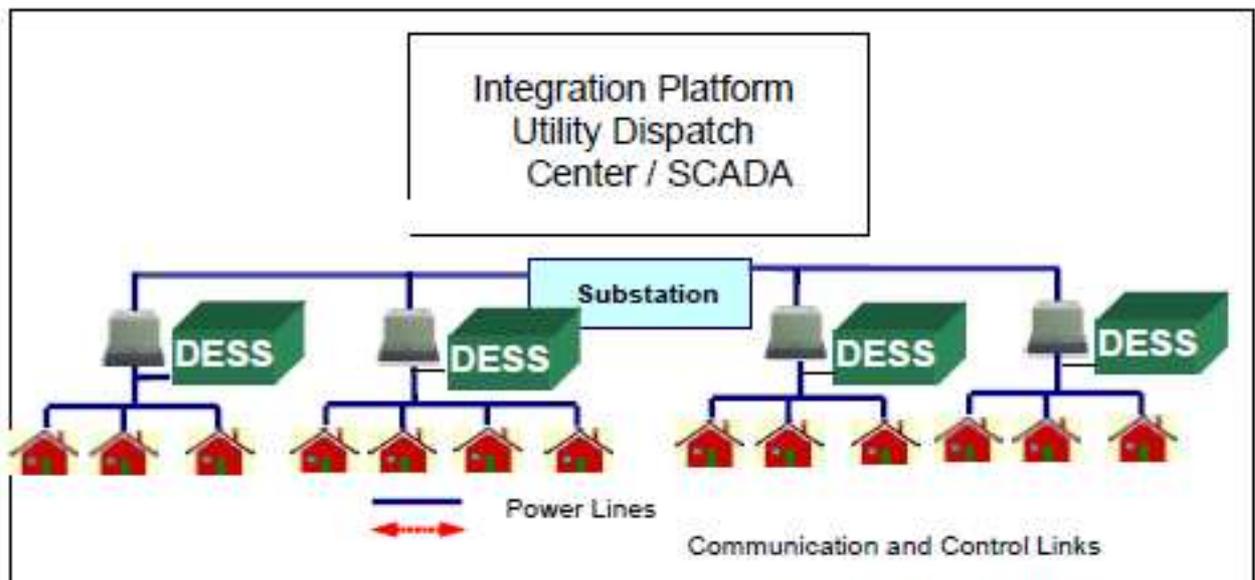


Figura 10.- Integración de almacenamiento distribuido (DEES) en el concepto de red inteligente.

Si bien la definición y especificaciones de los sistemas DESS todavía se están desarrollando, las unidades individuales DESS podría tener capacidades nominales típicas de 25 a 50 kW, con 2 a 4 horas de capacidad de almacenamiento. La visión es que las empresas eléctricas puedan controlar, gestionar y agregar las unidades DESS utilizando una plataforma de integración para proporcionar servicios de apoyo a la red a gran escala. Para emplear DESS, se requieren dispositivos de almacenamiento con un bajo costo, larga vida útil (15 años o más), bajo mantenimiento y cuya huella sea pequeña. Las opciones tecnológicas que aquí se incluyen serían baterías de plomo-ácido avanzadas, de iones de litio y baterías de flujo.

#### **1.4.1.4 Aplicaciones comerciales e industriales**

El mercado técnico para esta aplicación se compone de clientes que valoran especialmente la fiabilidad y calidad del servicio. Estos usuarios finales, comerciales e industriales, por lo general necesitan una alimentación ininterrumpida (uninterrupted power supply, UPS) o utilizar generadores de reserva. Este mercado de energía lo componen los clientes que operan durante periodos de uso (time-of-use, TOU) muy elevados o que demandan altas tasas de electricidad cuyo consumo se caracteriza también por un bajo factor de carga. Posibles mercados futuros podrían incluir sistemas que garanticen la ininterrumpibilidad del servicio para la gestión energética y la sustitución de determinados generadores diesel de respaldo.

#### **1.4.1.5 Aplicaciones residenciales**



**Figura 11.-** Paneles fotovoltaicos residenciales.

Las variables que definen el mercado energético a nivel del sector residencial se basan en satisfacer la demanda en el hogar y en las oficinas en casa, así como en garantizar la alimentación de reserva, gestionar de energía en el hogar y en el futuro, la carga rápida tanto de vehículos híbridos enchufables como de los puramente eléctricos. El

almacenamiento de energía también puede integrarse en sistemas fotovoltaicos residenciales (Figura 11), donde se ofrecen importantes beneficios frente a la variabilidad de las condiciones meteorológicas al desplazar la producción fotovoltaica pico hasta su consumo aproximadamente 4 horas más tarde, coincidiendo con la demanda pico de la red en la tarde. En una aplicación típica residencial, pequeños sistemas de almacenamiento de energía se localizan en el lado cliente del medidor, pero podría ser gestionado por la compañía eléctrica o un proveedor de servicios energéticos.

Las unidades de almacenamiento de energía para aplicaciones residenciales requieren sistemas con capacidades de 1 a 10 kW de 2 a 4 horas, dependiendo del uso específico. Algunas opciones tecnológicas son las baterías avanzadas de plomo-ácido convencionales y avanzadas, las de ión-Litio y sistemas redox de pequeño potencial.

## **1.5 Opciones tecnológicas: soluciones de almacenamiento de energía**

### **1.5.1 Soluciones y opciones de almacenamiento de energía.**

En esta sección se examina el estado actual de las opciones de almacenamiento de energía y se ofrecen estimaciones actualizadas de sus rendimientos así como sus disponibilidades para aplicaciones clave. En este apartado se analizan los siguientes puntos:

- Descripción de cada opción de la tecnología, incluyendo un resumen de su estado comercial y de desarrollo
- Discusión de las direcciones de desarrollo y tendencias futuras

La Tabla 2 resume el estado de desarrollo de las principales opciones de almacenamiento energético.

<b>Estado del arte</b>	<b>Ejemplos de opciones tecnológicas</b>
Madura	Estaciones de bombeo, baterías de plomo ácido
Comercial	CAES de primera generación, baterías de plomo-ácido, de NiCd y NaS.
Demostración	CAES de segunda generación, baterías ZnBr, VRB, NiMH, plomo-ácido avanzadas e ión-litio
Piloto	Ión-litio, Fe/Cr, NaNiCl <sub>2</sub>
Laboratorio	Zn/air, Zn-Cl, ión-litio avanzadas, nuevas químicas de baterías
Idea	CAES sin combustible (adiabáticas), nano-supercondensadores, baterías de químicas aún más novedosas.

**Tabla 2.-** Tecnologías de almacenamiento de energía clasificados por Estado de desarrollo

#### **1.5.1.1 Estaciones de bombeo**

El almacenamiento energético por bombeo hidráulico es una tecnología ampliamente utilizada y madura. Esta tecnología consiste en que fuera de las horas punta se emplea para bombear agua desde un depósito hasta otro a mayor altura. Cuando se necesita electricidad, el agua se libera desde éste último a través de una turbina hidráulica hacia el depósito inferior para generar electricidad (Figura 12). Esta tecnología tiene la mayor capacidad de almacenamiento de entre todas las tecnologías evaluadas, ya que su tamaño está limitado sólo por el volumen del depósito superior.



**Figura 12.-** Esquema típico de una central de bombeo.

Los proyectos pueden ser prácticamente de hasta más de 4000 MW y funcionar aproximadamente con una eficiencia del 76%-85% dependiendo del diseño. Las centrales hidroeléctricas de bombeo tienen una vida muy larga del orden de los 50 años y sus rápidos tiempos de respuesta les permiten participar tanto en la regulación del voltaje como en la de la frecuencia, en los mercados eléctricos tanto como reserva rodante como cualquier otra opción, así como en la subasta de energía y como sistema de apoyo a la red.

Si bien la ubicación, los permisos y los procesos asociados de impacto ambiental pueden llevar muchos años, existe un creciente interés en reexaminar las oportunidades del bombeo hidráulico en todo el mundo, particularmente en vista de la gran cantidad de generación de energía eólica y la generación de nueva potencia nuclear que es de prever que se despliegue en las próximas décadas.



**Figura 13.-**Embalse artificial superior en Raccoon Mountain, central hidroeléctrica de bombeo operativa desde 1979. La instalación puede generar 1.620 MW durante un máximo de 22 horas.

### **1.5.1.2 Almacenamiento de energía con aire comprimido (CAES)**

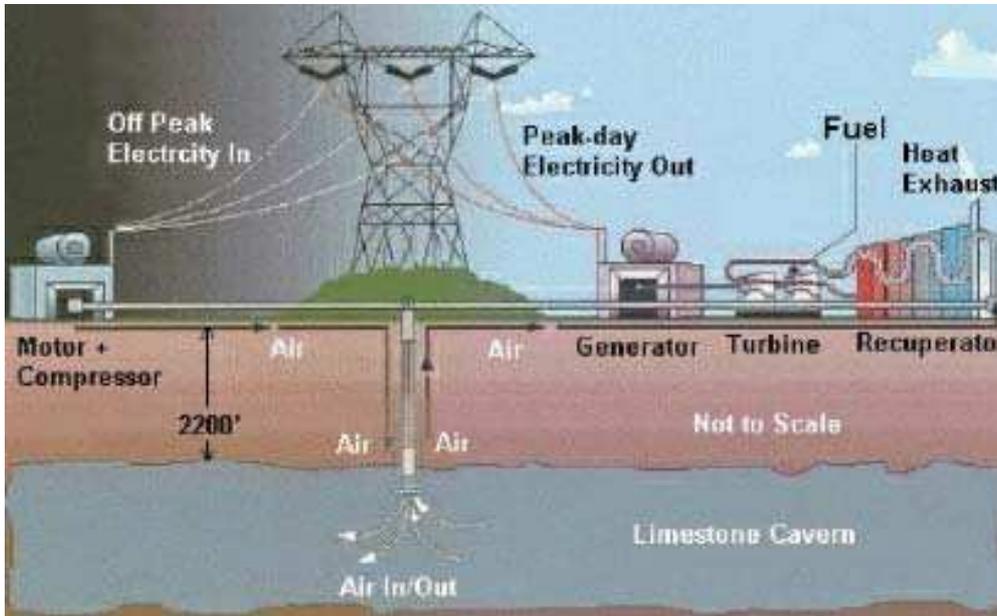
Las centrales CAES utilizan electricidad fuera de horas punta para comprimir aire y almacenarlo en un depósito, ya sea una caverna subterránea o en tuberías o recipientes sobre el terreno. Cuando se necesita electricidad, el aire comprimido se calienta, se expande y se dirige a través de una turbina convencional para producir electricidad.

Hay dos sistemas de primera generación operativos: uno en Alemania y otro en Alabama. En los últimos dos años, los sistemas de segunda generación CAES han avanzado y se están siendo diseñado para que sean capaces de disminuir los costos de instalación, ofrecer mayor eficiencia y menor tiempo de construcción que los sistemas de primera generación. En una planta CAES de segunda generación avanzada, se emplea una turbina de combustión de gas natural para generar calor durante el proceso de expansión y dos tercios de la electricidad generada se produce durante el ciclo "verde" de compresión del aire. Los nuevos diseños de compresores y turbinas avanzados están dirigiendo hacia un modelo basado en la ausencia de turbinas de combustión en los sistemas CAES.

Un nuevo concepto emergente se encuentra todavía en fase de investigación y desarrollo, se trata de los denominados "CAES adiabáticos". Los sistemas A-CAES consumen poco o nada de combustible fósil o energía externa, de manera que el calor demandado durante la expansión se obtiene de la captura de energía térmica que se producía durante el proceso de compresión.

Los sistemas de almacenamiento subterráneos CAES son más eficientes en términos de costes con capacidades de almacenamiento de hasta 400 MW y tiempos de descarga de 8 a 26 horas. Localizar una ubicación adecuada para estas plantas consiste en encontrar y verificar la integridad del almacenamiento del aire en una formación geológica adecuada, en un lugar donde el sistema CAES pueda dar servicio a la red. Las plantas CAES con almacenamiento sobre el terreno son típicamente más pequeñas que aquellas con almacenamiento subterráneo, con capacidades del orden de 3 a 15 MW y tiempos de descarga de 2 a 4 horas. Es más fácil encontrar una ubicación adecuada para las CAES en superficie, pero son más caras de construir que las subterráneas, debido

principalmente al costo adicional asociado al almacenamiento sobre el terreno. Los sistemas CAES de primera generación avanzados también continúan siendo evaluados y propuestos.



**Figura 14.-** Esquema de una planta CAES con almacenamiento de aire comprimido bajo el terreno.

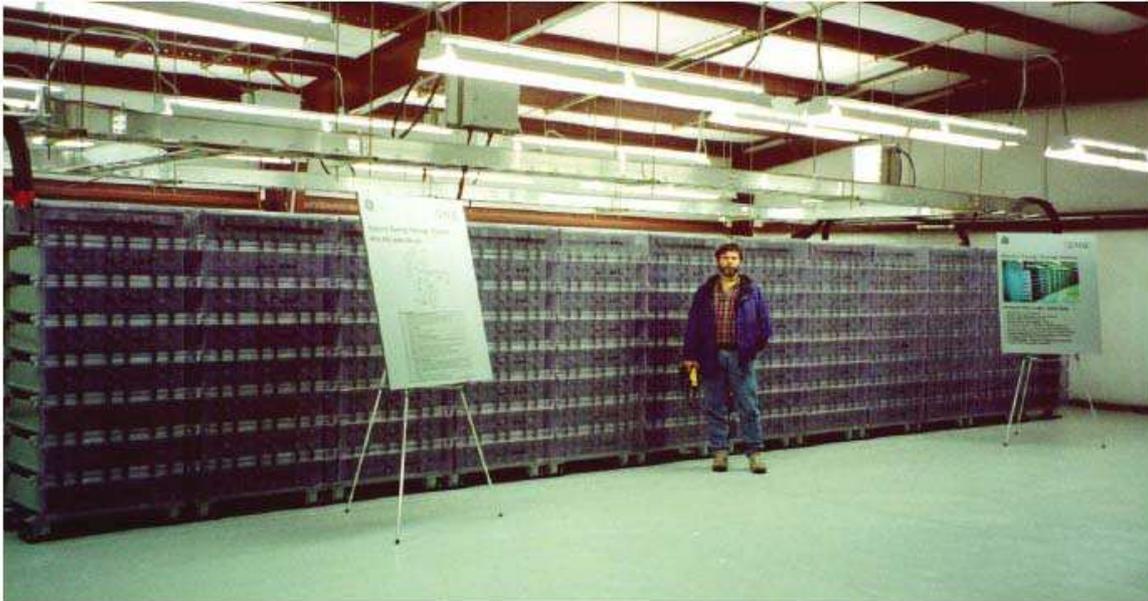


**Figura 15.-** Vista aérea de una planta CAES de almacenamiento bajo la superficie situada en McIntosh, Alabama, una de las dos plantas de este tipo que operan en el mundo. La otra se encuentra en Huntorf, Alemania.

### **1.5.1.3 Las baterías de plomo-ácido**

La tecnología de plomo-ácido es la tecnología de baterías recargables más madura comercialmente en el mundo. Las baterías VRLA (valve-regulated lead-acid) se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, incluyendo la automoción, aplicaciones marinas, telecomunicaciones y los sistemas de UPS (uninterrupted power supply). Han habido

pocas aplicaciones en transmisión y distribución de la red eléctrica para este tipo de baterías debido a su peso relativamente elevado, a su gran volumen, a las limitaciones de su ciclo de vida y a la posible aparición de problemas de fiabilidad (derivada de los requisitos de mantenimiento).



**Figura 16.-** Sistema de baterías de plomo-ácido en Metlakalta, Alaska (1-MW/1.5-MWh).

La energía que entregan las baterías de plomo-ácido no es lineal y su tiempo de vida varía significativamente dependiendo de la aplicación, de la velocidad de descarga y del número de ciclos de descarga profunda, que pueden reducir considerablemente su vida útil. Un sistema de baterías de plomo-ácido de 1-MW/1.5-MWh ha estado operando durante 12 años en una remota isla de Alaska (Figura 16). En ese proyecto, la degradación del sistema de baterías resultó casi inapreciable en análisis posteriores a su reemplazo en 2008. Se han desarrollado otros sistemas de baterías de plomo-ácido para tamaños de 10 a 20 MW. El precio de la batería puede estar influenciado por el costo del plomo como materia prima. Por último señalar que existe muy poca información disponible sobre los costos de operación y mantenimiento en aplicaciones de apoyo a red en lo relativo a los sistemas de almacenamiento basados en este tipo de química.

#### **1.5.1.4 Baterías de plomo-ácido avanzadas**

Las tareas para mejorar la tecnología de las baterías de plomo-ácido y sus materiales continúa. La innovación en los materiales está mejorando el ciclo de vida y la durabilidad y se están desarrollando varias tecnologías basadas en baterías de plomo-ácido avanzadas que se encuentran ya en fase de desarrollo pre-comercial y distribución. Estos sistemas se están desarrollando para la reducción de los picos de demanda, la regulación de la frecuencia, la integración de la eólica y la fotovoltaica y para su aplicación en la automoción.

Algunas baterías de plomo-ácido avanzadas son como supercondensadores, es decir, poseen ciertas cualidades que les otorgan la capacidad de dar una respuesta rápida similar a los volantes de inercia y a los supercondensadores.



**Figura 17.-** Fase 1 de Ecoult 1-MW/1-MWh, sistema de ultrabaterías en el proyecto de integración de energía eólica en Hampton, Australia.



**Figura 18.-** Sistema de baterías de plomo ácido avanzadas "Dry Cell" de 1.5-MW/1-MWh de Xtreme Power empleado en un parque eólico.

### **1.5.1.5 Baterías de sodio-azufre (NaS)**

Las baterías de sulfuro de sodio son una tecnología de almacenamiento de energía comercial cuyas aplicaciones abarcan el apoyo a la red eléctrica en la distribución de energía, la integración de la energía eólica y aplicaciones en servicios de gran valor en islas. La eficiencia de los sistemas de sodio-azufre es de aproximadamente el 80% y su duración estimada es de unos 15 años después de 4500 ciclos al 90% de la profundidad de descarga.

La tecnología de las baterías de sodio-azufre fue desarrollada conjuntamente por NGK Insulators Ltd. y Tokyo Electric Power Co. (TEPCO) en los últimos 25 años. "NAS" es una

marca registrada para el sistema de baterías de sodio-azufre de NGK, mientras que "NaS" es un término genérico para la química de sodio-azufre sobre la base de aquellos elementos de los símbolos atómicos ("Na" y "S").



**Figura 19.-** Instalaciones de baterías NaS NYPA 1.2-MW/7.2-MWh.



**Figura 20.-**AEP subestación de distribución con una unidad NaS.

Las instalaciones NAS de NGK proporcionan el equivalente funcional de aproximadamente 160 MW de la potencia hidroeléctrica de bombeo instalada actualmente en Tokio. Las baterías NAS sólo están disponibles en unidades múltiples de 1-MW/6-MWh con instalaciones típicamente en el intervalo de 2 a 10 MW. La instalación más grande es la de 34 MW de Rokkasho del proyecto de integración de la eólica en el norte de Japón, que ha estado en funcionamiento desde el 1 de agosto de 2008. En este momento, aproximadamente 316 MW de instalaciones de NAS se han desplegado a nivel mundial, incluyendo 50 MW en Abu Dhabi. Se han establecido

acuerdos para suministrar 300 MW adicionales para clientes en Abu Dhabi y 150 MW a Electricité de France en los próximos años. Los clientes en los Estados Unidos incluyen American Electric Power (11 MW desplegado), PG & E (4 MW, en curso), New York Power Authority (1 MW, desplegado) y Xcel Energy (1 MW, desplegado). En total, más de 316 MW instalados a nivel mundial en 221 lugares, lo que representa 1.896 MWh. Se prevé que la capacidad instalada crezca a 606 MW (3.636 MWh) para el año 2012.

#### **1.5.1.6 Baterías de cloruro de sodio-níquel (NaNiCl<sub>2</sub> o ZEBRA)**

Existen grandes proyectos en marcha para avanzar en la química del cloruro de sodio níquel (NaNiCl<sub>2</sub>) para aplicaciones preparadas para la red, aunque todavía no existe apenas información sobre los costos y el rendimiento de los sistemas adaptado a la red.

#### **1.5.1.7 Baterías redox de vanadio (VRB)**

Las VRB son un tipo de batería de flujo y el más maduro de todos los sistemas de baterías de flujo disponibles. En las baterías de flujo, la energía se almacena en forma de iones cargados en dos depósitos de electrolitos separados, en uno de los cuales se almacena electrolito para la reacción del electrodo positivo mientras que en el otro se almacena electrolito para la reacción del electrodo negativo. Los sistemas VRB son únicos en el sentido en que utilizan un electrolito común, lo que ofrece oportunidades para aumentar el ciclo de vida de manera potencial. Cuando se necesita electricidad, el electrolito fluye a una celda redox con electrodos y se genera la corriente. La reacción electroquímica puede invertirse mediante la aplicación de un sobrepotencial, como con las baterías convencionales, permitiendo que el sistema se cargue y descargue de forma repetida. Al igual que en otras baterías de flujo, son posibles muchas variaciones de capacidad de potencia y de almacenamiento de energía dependiendo del tamaño de los tanques de los electrolitos.

Existen varios sistemas VRB funcionando actualmente, entre ellos:

- Una unidad de 15-kW/120-kWh en una aplicación de red inteligente por RISO en Dinamarca
- Una unidad de 250-kW/2-MWh en el Castillo del Valle, Utah PacifiCorp, que operó 6 años antes de ser interrumpida cuando la aplicación tuvo que ser sustituida.
- Una unidad de 200-kW/800-kWh en King Island, Tasmania por HydroTasmania
- Una unidad en 4-MW/6-MWh Tomamae, Hokkaido, Japón por JPower
- Unidades menores de 5 kW empleadas en los ensayos de campo.

Los sistemas VRB pueden ser diseñados para proporcionar energía durante periodos de 2 a más de 8 horas, dependiendo de la aplicación. La vida útil de las baterías de flujo no está fuertemente afectada por el número de ciclos. Los proveedores de sistemas VRB estiman la vida útil de las celdas de las baterías en 15 o más años, mientras que el resto de la instalación y el electrolito pueden tener tiempos de vida de más de 25 años. Los proveedores también aseguran que han logrado la alcanzar la cifra de 10.000 o más ciclos al 100% de la profundidad de descarga. La escala física de los sistemas VRB tiende a ser más grande que para otras tecnologías debido a los grandes volúmenes de electrolito necesarios cuando se diseñan para proyectos a nivel de red (megavatio-hora).



**Figura 21.-** Prudent Energy 5\_kW/30-kWh VRB-ESS instalado en Kitangi, Kenia. Trabaja junto a un generador diesel para constituir un sistema de potencia híbrido en un lugar aislado de la red.

### 1.5.1.8 Baterías de zinc-bromo (ZnBr)

El zinc-bromo es un tipo de química de batería de flujo redox que utiliza el zinc y bromo en solución para almacenar energía en forma de iones cargados en tanques de electrolitos. Como en los sistemas redox de vanadio, la batería de ZnBr se carga y descarga en un proceso reversible mientras los electrolitos se bombean a través de una vasija de reacción.



**Figura 22.-** Este 5-kW/20-kWh sistema comunitario de almacenamiento de energía (CES), de RedFlow Power y Ergon Energy en Australia estarán conectado a una Smart Grid para proporcionar almacenamiento a escala de megavatios en la red eléctrica.

Las baterías de ZnBr se encuentran en una fase de implementación y demostración y es una tecnología menos madura que los sistemas VRB. Si bien la experiencia práctica es todavía limitada, los proveedores aseguran un tiempo de vida estimado de 20 años, un elevado número de ciclos y eficiencias de aproximadamente el 65% a 70%.

Los tamaños de los módulos varían según el fabricante pero estarían en el rango de 5 kW a 500 kW, con una duración variable de almacenamiento de energía de 2 a 6 horas, dependiendo de la aplicación y la necesidad. Proyectos pequeños que constituyen sistemas de 5-kW/2-horas se están desarrollando en la Australia rural como una alternativa a la instalación de nuevas líneas eléctricas. En los Estados Unidos, las empresas eléctricas planean llevar a cabo los primeros ensayos de 0.5-MW/2.8-MWh sistemas móviles para el apoyo a la red y la mejora de la fiabilidad.



**Figura 23.-** TransFlow 2000 0.5-MW/2.8 MWh de Premium Power. Sistema de almacenamiento de energía móvil de ZnBr.

#### **1.5.1.9 Fe / Cr y Zn / aire**

Los sistemas redox Fe / Cr y Zn / aire se encuentran todavía en fase de laboratorio de I+D, pero están avanzando rápidamente. La estructura de bajo costo de estos sistemas también los hace dignos de la evaluación de soluciones de almacenamiento de la red. Dadas las importantes incertidumbres en el rendimiento y en el ciclo de vida, las contingencias del proceso y del proyecto son altas.

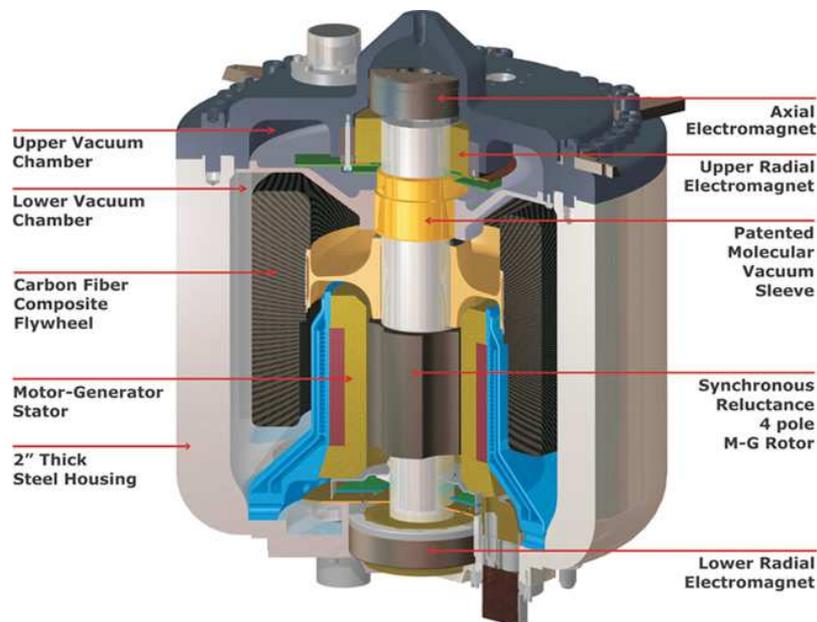
#### **1.5.1.10 Volantes de inercia**

Los volantes de inercia son sistemas de energía de más corta duración por lo que generalmente no son atractivos para aplicaciones de apoyo a la red a gran escala, ya que se requieren muchos kWh o MWh de almacenamiento de energía. Funcionan mediante el almacenamiento de energía cinética en un rotor giratorio hecho de materiales de alta resistencia que se carga y descarga a través de un generador.

Los volantes de inercia se cargan extrayendo electricidad de la red para aumentar la velocidad de rotación y se descargan generando electricidad con la desaceleración de la

rueda. Tienen un tiempo de respuesta muy rápido, de 4 milisegundos o menos, puede ser de un tamaño entre 100 kW y 1650 kW y pueden utilizarse durante cortos períodos, de hasta 1 hora. También tienen eficiencias muy altas de alrededor del 93%, con una vida útil estimada en 20 años.

Aunque los volantes de inercia tienen densidades de potencia de 5 a 10 veces las de las baterías, lo que significa que requieren mucho menos espacio para almacenar una cantidad comparable de potencia, hay limitaciones prácticas en la cantidad de energía (kWh) que se puede almacenar. Una planta de almacenamiento de energía de volantes de inercia puede ampliarse mediante la adición de más módulos. Los volantes de inercia se emplean típicamente para garantizar la calidad de la energía y evitar interrupciones, como se ve en los productos comerciales ofrecidos por Pentadyne (Figura 24). También continúan las investigaciones para desarrollar sistemas más avanzados de volantes que sean capaces de almacenar grandes cantidades de energía, pero estos acontecimientos están al menos a 4 o 5 años vista.



**Figura 24.**-Volante de inercia Pentadyne GTX.

Dado que los sistemas de volantes de inercia proporcionan una respuesta rápida y eficiente, están siendo empleados para regular la frecuencia de la red. Análisis realizados sobre volantes que están ofreciendo estos servicios demuestran que son capaces de ofrecer beneficios para el sistema tales como la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y evitar ciclos de operación de los grandes sistemas de energía fósil. Beacon Power está desarrollando plantas a escala de megavatios de volantes de inercia con capacidades acumuladas de 20 MW para satisfacer las necesidades de regulación de frecuencia de mercado (Figura 25).



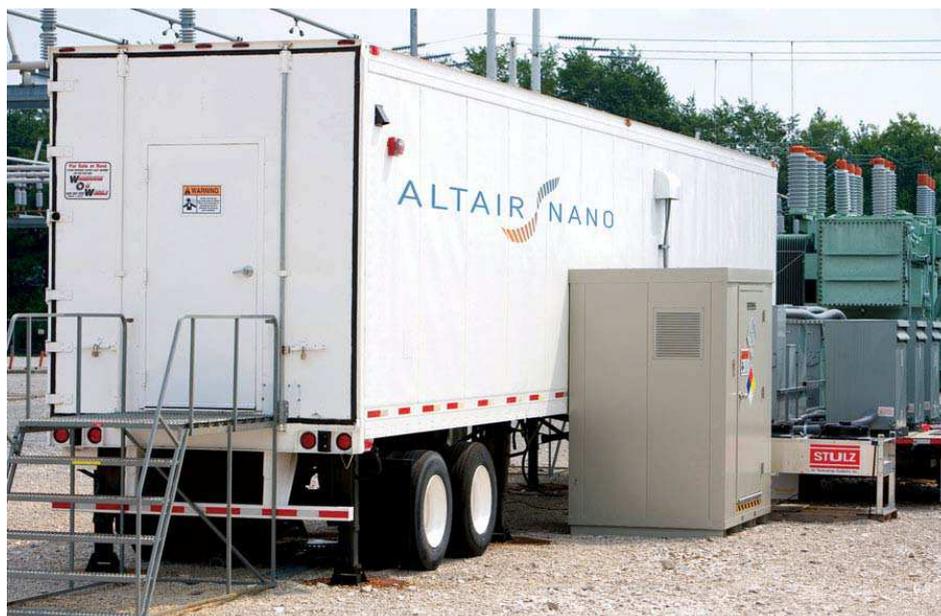
**Figura 25.-** Volantes de inercia de Beacon Power 1-MW/15-min. Aplicación auxiliary de regulación de frecuencia.

#### **1.5.1.11 Baterías de ión-litio**

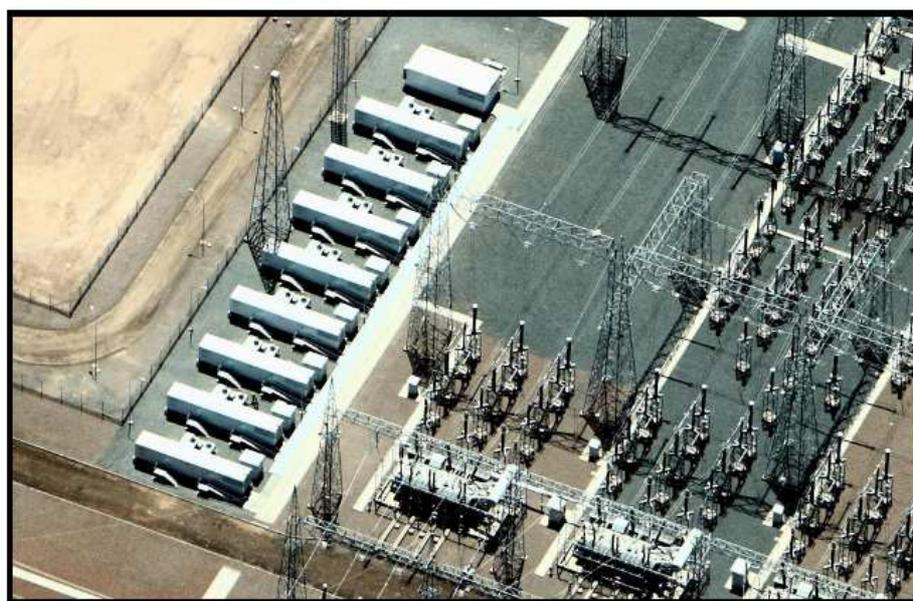
Las baterías recargables de ión-litio que pueden encontrarse comúnmente en los productos electrónicos de consumo, constituyen la mayor parte del volumen de producción en todo el mundo, de 10 a 12 GWh al año. Siendo ya una tecnología ampliamente comercializada y madura para aplicaciones de consumo electrónico, las baterías de ion-litio se está posicionando para convertirse en la tecnología líder de vehículo híbrido eléctrico enchufable (plug-in hybrid electric vehicle PHEV) y todos los vehículos eléctricos (EV), que utilizarán células y los módulos con capacidades de 15 a 20 kWh para PHEV y hasta 50 kWh para todos los vehículos eléctricos.

En comparación con la larga historia de las baterías de plomo, la tecnología iones de litio es relativamente nueva. Existen muchos tipos de químicas de ión-litio, cada una con una potencia específica y con unas características energéticas. Las celdas prismáticas son actualmente objeto de intensa investigación y desarrollo, en particular su la escalabilidad y la evaluación de su durabilidad para su uso en vehículos eléctricos híbridos a corto plazo. La escala prevista de fabricación de baterías de ión-litio (un total aproximado de 35 GWh en 2015) se espera que resulte en una fuente de capacidad de menor costo los paquetes de baterías que podría integrarse en el sistema para aplicaciones de soporte de la red-que requieran menos de 4 horas de duración de almacenamiento de energía.

La alta densidad de energía y el peso relativamente bajo de los sistemas de baterías de ión-litio hacen de ellos una opción atractiva para lugares con limitaciones de espacio. Teniendo en cuenta su atractivo ciclo de vida y compacidad, además su la alta eficiencia que supera el 85% -90%, se está estudiando seriamente la posibilidad de emplearlo en varios servicios de apoyo a la red, tales como sistemas portátiles de apoyo a la red, sistemas de gestión de la energía, regulación de frecuencia e integración de la energía eólica y fotovoltaica. Muchos expertos creen que el mercado de baterías de iones de litio en aplicaciones estacionarias podrían incluso superar el del transporte.



**Figura 26.-** Sistema de almacenamiento energético de ión-litio transportable de 1-MW/250-kWh de Altairnano.



**Figura 27.-**Sistema de comercial de operación de la energía de 12-MW, capaz de regular la frecuencia de la red y servir de reserva rodante en el Desierto de Atacama, Chile.

### **1.5.1.12 Almacenamiento de energía térmica**

El almacenamiento de energía térmica comprende una serie de tecnologías que almacenan la energía térmica en los reservorios de energía para su uso posterior. Pueden ser empleados para equilibrar la demanda de energía entre el día y la noche. El reservorio térmico se puede mantener a una temperatura superior o por debajo de la ambiente. Las aplicaciones hoy en día incluyen la producción de hielo, agua fría, o de una solución eutéctica en la noche, o de agua caliente que luego se utiliza para enfriar o calentar durante el día.

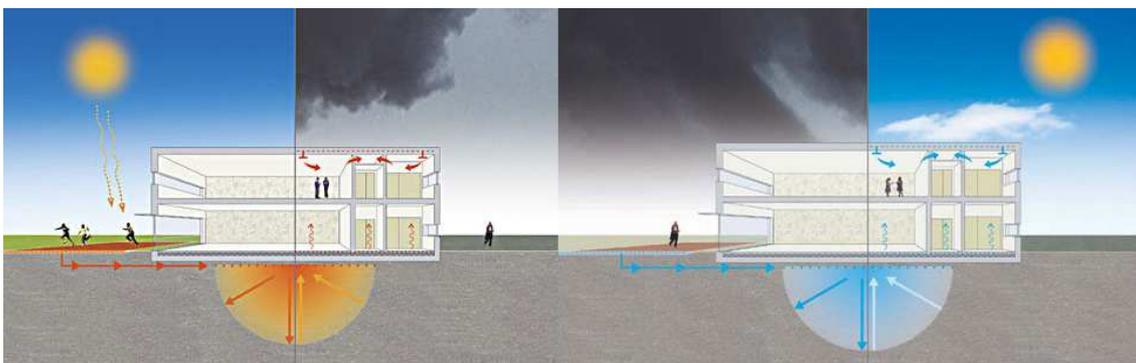
La energía térmica es a menudo acumulada desde colectores solares activos o más a menudo de plantas combinadas de generación de energía y calor, y transferida a depósitos aislados para su posterior uso en diversas aplicaciones tales como la calefacción, agua caliente sanitaria o de proceso.

- Almacenamiento de energía solar

La mayoría de sistemas de energía solar almacenan desde unas pocas horas hasta la energía recogida durante todo un día. También hay un número pequeño pero creciente de sistemas de almacenamiento térmico estacional, utilizados para almacenar energía en verano para la calefacción durante el invierno.



**Figura 28.-** La instalación de colectores solares en el patio de recreo en la Escuela Howe Dell captura el calor del verano para almacenarla en el suelo y liberarla para calefacción en invierno. Se duplica así el COP de la bomba de calor al precalentarla con un reservorio de calor.(ICAX)



**Figura 29.-**La transferencia de calor entre estaciones permite al colector de patio transferir calor desde el reservorio térmico en invierno así como enfriar en verano.

Las sales fundidas están ahora empleándose como medio para retener un almacén térmico a elevada temperatura, en conjunción con energía solar concentrada para su posterior uso en generación de electricidad, para permitir que la energía solar

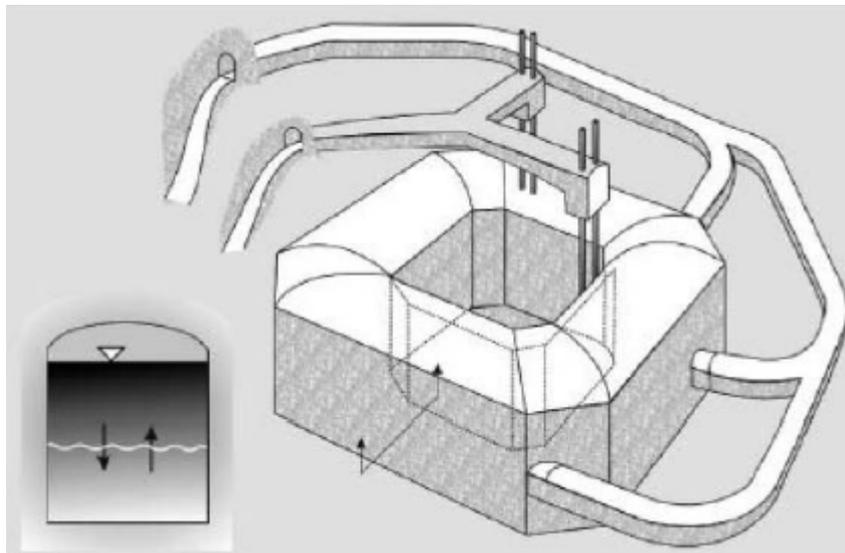
proporcione electricidad de forma continua, como energía de carga base. Estas sales fundidas (nitrato de potasio, nitrato de calcio, nitrato de sodio, nitrato de litio, etc.) tienen la propiedad de absorber y almacenar la energía térmica que se libera al agua, para transferir energía cuando sea necesario. Para mejorar las propiedades de las sales deben mantenerse en un estado de mezcla eutéctica.

- Economía

Las altas cargas pico derivan en importantes gastos de capital por parte de la industria de generación eléctrica. La industria satisface dichos picos de carga con plantas de baja eficiencia en horas pico, por lo general turbinas de gas que tienen costos de capital más bajos así como bajos costos de consumo de combustible. Un kWh de electricidad consumido de noche se puede producir a un costo marginal mucho más bajo. Las empresas han comenzado a trasladar estos costos más bajos a los consumidores, en forma de conceptos como el tiempo de uso (TOU) o tasas de precios a tiempo real (RTP). El almacenamiento de la energía solar térmica tiene el potencial de proporcionar energía destinada a satisfacer la demanda pico de energía de forma más barata que cualquier otra fuente de energía

- Almacenamiento de agua en tanques o en cavernas de roca

Grandes sistemas de almacenamiento son ampliamente utilizados en los países escandinavos para almacenar calor durante varios días, para separar el calor y la producción de energía y para ayudar a satisfacer los picos de demanda. Los sistemas de almacenamiento entre estaciones han sido investigados y los basados en cavernas de roca parecen ser económicos.



**Figura 30.-** Croquis de la caverna de roca toroidal de 100 000 m<sup>3</sup> para el aprovechamiento del calentamiento solar en Lyckebo.

- Tecnología basada en el hielo

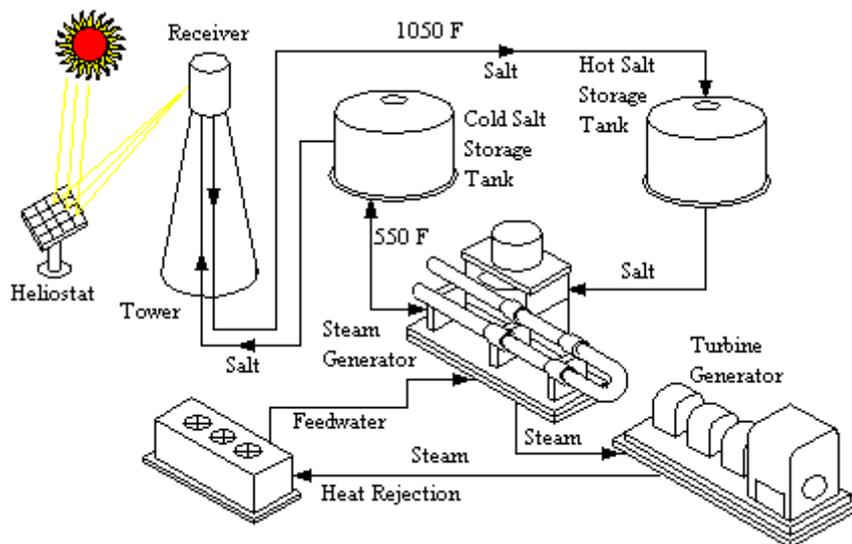
El aire acondicionado se puede proporcionar de manera más eficiente empleando electricidad más barata por la noche para congelar agua, y luego usando el frío del

hielo en la tarde para reducir la electricidad necesaria para satisfacer las demandas de aire acondicionado.

Por tanto hay desarrollados y aún en desarrollo, aplicaciones donde el hielo se produce fuera de los periodos pico y se utiliza para enfriar más tarde.

- La tecnología de sales fundidas

Las sales fundidas se pueden emplear como método de almacenamiento de energía térmica para conservar la energía recogida por una torre solar u otros sistemas de colectores de modo que pueda ser utilizada para generar electricidad cuando hace mal tiempo o durante la noche.



**Figura 31.-** Esquema de una planta generación de energía solar térmica que cuenta con un campo de heliostatos, una torre solar y un sistema de almacenamiento de sales fundidas.

Las mezclas de sales fundidas varían. La mezcla más empleada contiene nitrato sódico, nitrato potásico y nitrato de calcio. No es inflamable y ni tóxica y ya ha sido utilizada en las industrias químicas y metalúrgicas en forma de fluido caloportador, por lo que la experiencia con estos sistemas existe en aplicaciones que no son solares.

La sal se funde a 221 ° C. Se mantiene líquido a 288 ° C en un tanque aislado de almacenamiento en frío. La sal líquida se bombea a través de paneles a un colector solar donde el calor del sol concentrado alcanza los 566 ° C. A continuación, se envía a un tanque de almacenamiento de calor tan bien aislado que la energía térmica puede almacenarse hasta una semana.

Cuando se necesita electricidad, la sal caliente se bombea a un generador de vapor convencional para producir vapor sobrecalentado para una turbina-generador, como se utiliza en cualquier central convencional de carbón, fuel o nuclear. Una turbina de 100 megavatios necesita un tanque de aproximadamente 9,1 m de altura y 24 m de diámetro para operar durante cuatro horas con este diseño.

Varias plantas de colectores cilindro-parabólicos en España y de torre utilizan este concepto de almacenamiento de energía térmica.



**Figura 32.-** Instalación solar térmica de alta temperatura con tecnología de torre en España.

- Investigación

Se está investigando el almacenamiento de energía en enlaces moleculares. Además se han logrado densidades de energía equivalentes a las de las baterías de iones de litio.

### **1.5.1.13 El almacenamiento de hidrógeno**

El desarrollo seguro, fiable, compacto y rentable de las tecnologías de almacenamiento del hidrógeno son algunos de los desafíos técnicos que implica el uso generalizado del hidrógeno como forma de energía. Para ser competitivo con los vehículos convencionales, los coches impulsados con hidrógeno deben ser capaces de viajar más de 480 km entre llenados. Este es un objetivo es todo un reto porque el hidrógeno tiene características físicas que hacen que su almacenamiento en grandes cantidades ocupe un volumen significativo.

- ¿Dónde y cómo se almacenará el hidrógeno?

El almacenamiento de hidrógeno se requerirá tanto a bordo de vehículos y como en los lugares de producción de hidrógeno, estaciones de reabastecimiento de combustible de hidrógeno y los sitios fijos de energía. Posibles enfoques para el almacenamiento de hidrógeno son:

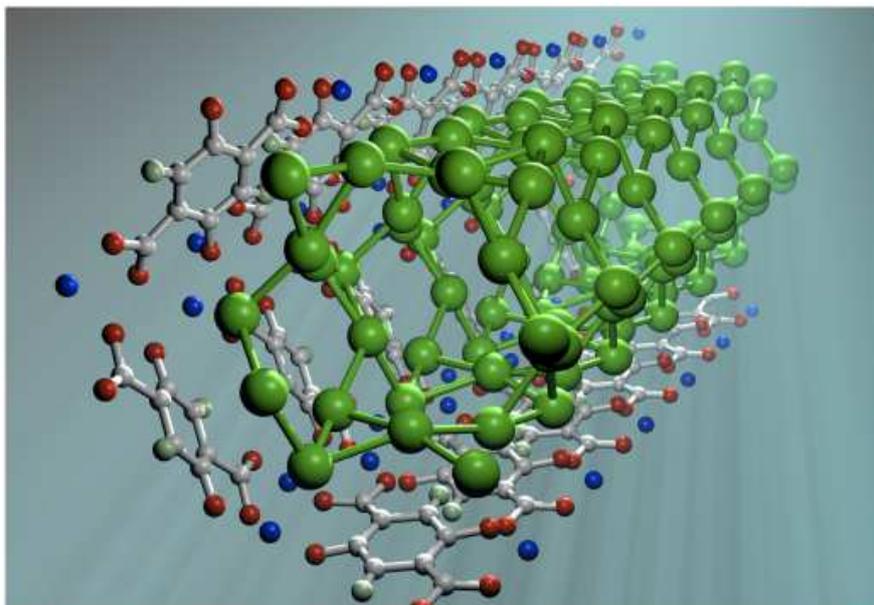
- Almacenamiento físico de gas de hidrógeno comprimido en tanques de alta presión (hasta 700 bar).
- Almacenamiento físico de hidrógeno criogénico (se enfría a  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a presiones de 6-350 bar) en tanques aislados.

- Almacenamiento en materiales avanzados - dentro de la estructura o en la superficie de ciertos materiales, así como en forma de compuestos químicos sometidos a una reacción química liberan hidrógeno.
- ¿Cuáles son los retos?

El hidrógeno tiene un elevado contenido energético en peso (aproximadamente tres veces superior al de la gasolina), pero tiene un contenido energético en volumen muy bajo (para el hidrógeno líquido es del orden de aproximadamente cuatro veces inferior al de la gasolina). Esto hace que sea difícil almacenar hidrógeno, en particular para las limitadas condiciones de tamaño y peso de un vehículo.

Un vehículo ligero equipado con una pila de combustible llevará aproximadamente un peso de entre 4-10 kg de hidrógeno a bordo (dependiendo del tamaño y tipo del vehículo) para permitirle una autonomía de más de 480 km, considerada generalmente como el mínimo imprescindible para garantizar su aceptación por el público en general. Los conductores también deben poder recargar combustible a una velocidad comparable a la tasa de recarga de combustible de los actuales vehículos de gasolina.

Los tanques de almacenamiento de alta presión disponibles con la tecnología actual que se emplearían para colocar una cantidad suficiente de hidrógeno a bordo del vehículo requerirían un volumen muy grande para proporcionar el rango de conducción establecido, más grande que el depósito de un automóvil convencional. Aparte de la pérdida de espacio de carga, también sería el peso añadido del tanque, lo que podría empeorar la economía del combustible. Es necesario reducir el costo de los materiales y componentes para los sistemas de almacenamiento de hidrógeno, así como métodos de fabricación a gran escala de para esos materiales y componentes también a bajo coste.



**Figura 33.-** El hidrógeno se puede almacenar en las superficies de los sólidos por adsorción. En la adsorción, el hidrógeno se asocia con la superficie de un material, ya sea como moléculas de hidrógeno (H<sub>2</sub>) o átomos de hidrógeno (H). La adsorción de hidrógeno se representa a través del parámetro MOF-74.( U.S. Department of Energy. Energy Efficiency & Renewable Energy. Fuel Cell Technology Program. Enero 2011)

- Líneas de investigación

Se está trabajando para mejorar la peso, el volumen y el coste de los sistemas actuales de almacenamiento de hidrógeno, así como para identificar y desarrollar nuevas tecnologías que pueden alcanzar un rendimiento y un costo similares al de los sistemas de almacenamiento de gasolina.

- El gas comprimido y los tanques de hidrógeno líquido

Los tanques convencionales de hidrógeno gas comprimido son mucho más grandes y pesados de lo que se desea para su uso en vehículos ligeros. Los investigadores están estudiando materiales compuestos, ligeros y seguros que pueden reducir el peso y el volumen de los sistemas de almacenamiento de gas comprimido.

El hidrógeno licuado es más denso que el hidrógeno gaseoso y por lo tanto contiene más energía para un volumen determinado. Tanques de hidrógeno líquido de tamaño similar pueden almacenar más hidrógeno que los tanques de gas comprimido, pero se necesita energía para licuar el hidrógeno. Sin embargo, además del peso el volumen y el costo del propio tanque, hay que sumarle el aislamiento necesario para evitar la pérdida de hidrógeno a los tanques de hidrógeno líquido. Los investigadores también están estudiando un concepto de grupo híbrido capaz de almacenar el gas de alta presión de hidrógeno bajo condiciones criogénicas (se enfría hasta alrededor de  $-120$  a  $-196$  ° C), estos tanques de hidrógeno crio-comprimido consiguen un peso relativamente ligero y mayor compacidad de almacenamiento.

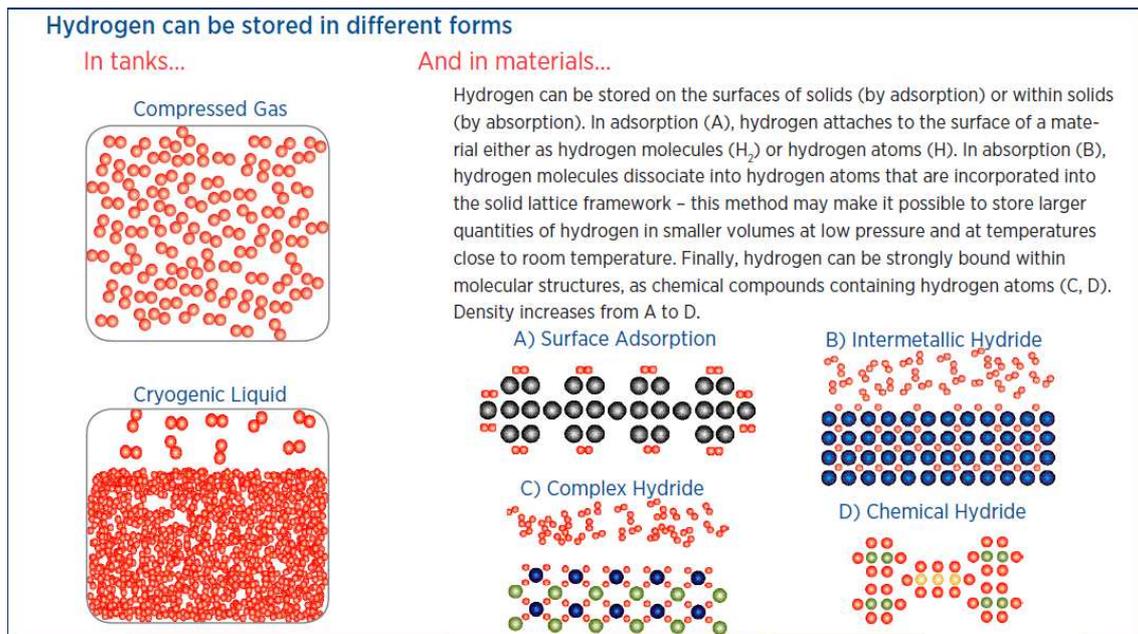
Los tanques de gasolina convencionales de automóviles y camiones se considera que son los que aprovechan al máximo el espacio disponible del vehículo. Los investigadores están evaluando conceptos para implementar tanques de hidrógeno de alta presión como alternativos a los tanques cilíndricos, que no desperdician espacio en el vehículo.

- Almacenamiento basado en materiales

Los átomos de hidrógeno o las moléculas unidas firmemente con otros elementos en un compuesto (o material potencial de almacenamiento) pueden hacer posible almacenar grandes cantidades de hidrógeno en volúmenes más pequeños en las condiciones que están dentro de los límites prácticos de funcionamiento de una membrana de electrolito-polímero (PEM) de las pías de combustible.

Los científicos están investigando varios tipos diferentes de materiales, incluyendo hidruros metálicos, materiales adsorbentes, e hidruros químicos, además de identificar nuevos materiales con potencial para favorecer las propiedades del almacenamiento de hidrógeno.

El almacenamiento de hidrógeno en materiales ofrece una gran promesa, pero se necesitan más investigaciones para comprender mejor el mecanismo de almacenamiento de hidrógeno en los materiales bajo condiciones de operación y prácticas para superar los problemas críticos relacionados con la capacidad, la absorción y la liberación de hidrógeno (es decir, la cinética), la gestión de calor durante la recarga de combustible, el costo y los impactos en el ciclo de vida.



**Figura 34.**-El hidrógeno se puede almacenar en las superficies de sólidos (por adsorción) o dentro de sólidos (por absorción). En la adsorción (A), el hidrógeno se adhiere a la superficie de un material, ya sea como moléculas de hidrógeno ( $H_2$ ) o átomos de hidrógeno (H). En la absorción (B), las moléculas de hidrógeno se disocian en átomos de hidrógeno que se incorporan al entramado de la estructura del sólido - este método permite que sea posible almacenar grandes cantidades de hidrógeno en volúmenes más pequeños a baja presión y a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente. Por último, el hidrógeno puede unirse fuertemente al interior de las estructuras moleculares, como compuestos químicos que contienen átomos de hidrógeno (C, D). La densidad aumenta de A a D.