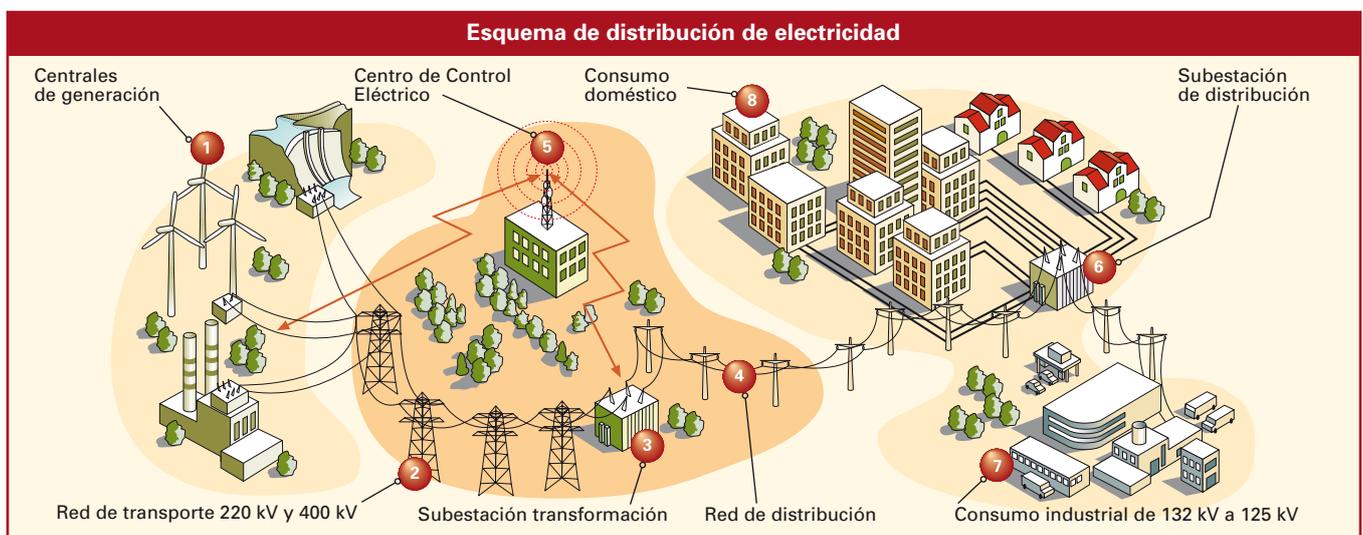




El almacenamiento de electricidad

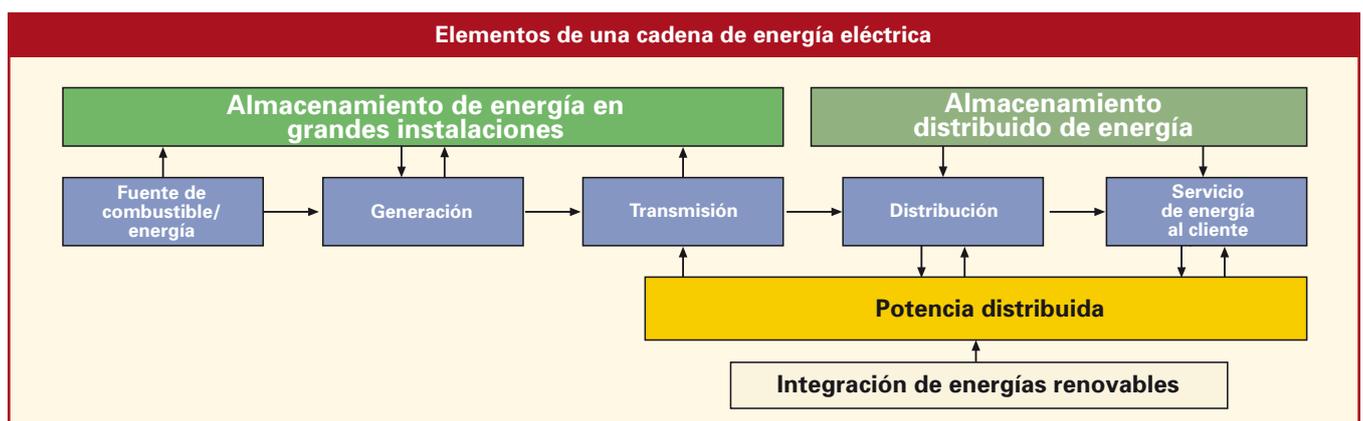
1 El almacenamiento de electricidad

Es el **sistema o dispositivo que permite acumular energía para su uso en un momento posterior ya sea a corto o largo plazo, de forma intensiva o de forma mantenida en el tiempo**. Los diferentes tipos de almacenamiento se diferencian entre sí por las diferentes clases de energía almacenada, por las diferentes clases de energía recuperada, y por el diferente nivel de eficiencia del proceso y transformación de la energía.



2 ¿Para qué sirve el almacenamiento?

La electricidad hemos de consumirla inmediatamente después de ser generada. Hasta hoy, no hemos sido capaces de almacenarla de forma práctica, fácil y barata. La introducción de elementos de almacenamiento de energía **posibilita la acumulación de energía durante el tiempo en que la producción excede el consumo y la cantidad almacenada es usada cuando el consumo excede la producción**, permitiendo mantener la planta de producción a un nivel constante, o con variaciones muy pausadas. Esto facilita incrementar la eficiencia, reducir costes, facilitar la gestión de la planta, aumentar su vida media, regular la red y aumentar la calidad de su señal. Además el almacenamiento comporta la posibilidad de ofrecer **servicios esenciales** a lo largo de toda la cadena de valor de la energía y asegurar la calidad de la red.

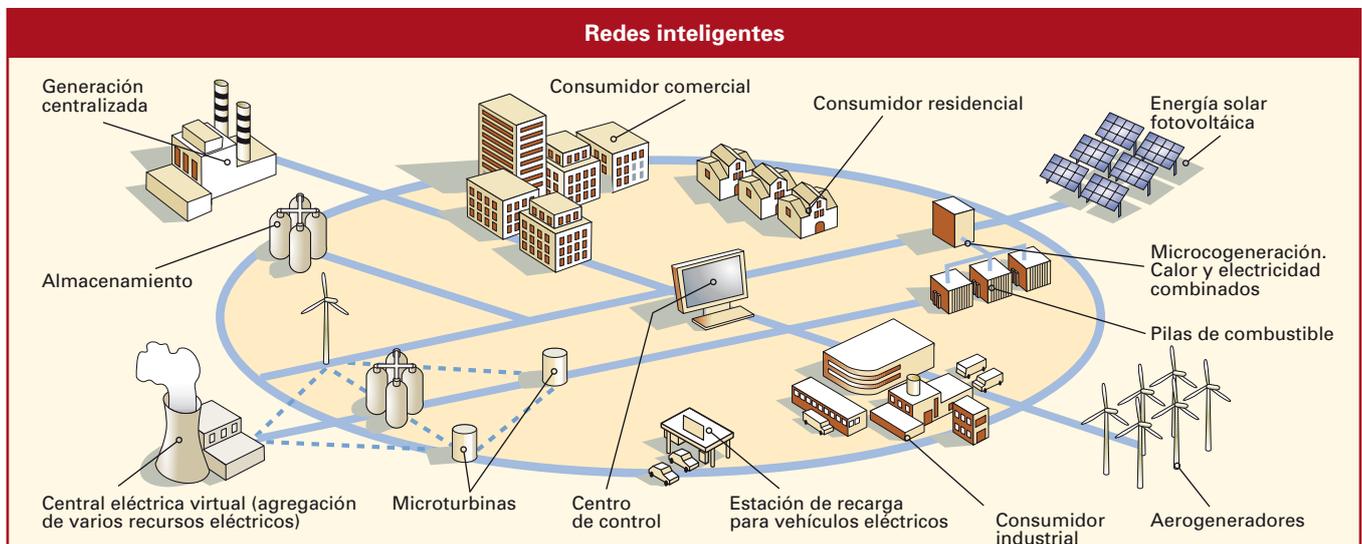




1. Permite un mayor equilibrio (balance) entre demanda y consumo. El aumento de la variabilidad en el lado de generación eléctrica requiere tecnologías y procedimientos para equilibrar la demanda de energía y el suministro. Los sistemas de almacenamiento nos permiten **nivelar la carga**, mediante la descarga de energía en horas punta y carga de energía en horas valle, y minimizar la potencia pico y la compensación de potencia de valle. Mejora, además, la interacción entre los sitios de consumo y los sitios de generación, y promueve la **integración de la generación a partir de fuentes intermitentes**, al reducir el impacto de la variabilidad de las fuentes renovables sobre la red eléctrica.

2. Mejora la gestión de las redes de transmisión y distribución. Permite obtener una **mayor capacidad de estabilización, seguridad y calidad de red: reduce las perturbaciones en la red** (fluctuaciones, cortes, caídas de tensión), asegura la estabilidad de la tensión y amortigua cualquier oscilación de potencia. En un panorama de producción y consumo de electricidad descentralizado y fluctuante, permite aprovechar al máximo los activos de generación, transporte y distribución. Consigue un rendimiento óptimo de las redes respecto a sus valores de flujos de energía promedio sin necesidad de sobredimensionar la red con el consiguiente ahorro. Además, el almacenamiento es esencial para permitir un amplio y extendido uso de energía renovables para equilibrar y compensar sus intermitencias y fluctuaciones tanto a nivel de plantas de potencia como a nivel de uso distribuido de fuentes de generación renovables.

3. Promueve la gestión de la demanda. Es decir, **un uso final de la energía más eficiente y sostenible.** El almacenamiento permitirá el despliegue creciente de movilidad con vehículos eléctricos, y la utilización de redes y edificios inteligentes. Contribuirá también a la gestión y al consumo local de electricidad y a la integración con otras formas de uso de la energía como la calefacción / refrigeración.



Redes inteligentes. Su utilización varía según la demanda y la disponibilidad de las fuentes intermitentes, los períodos de pico o valle de consumo, o los costos por kilovatio-hora. Los elementos de almacenamiento desempeñan un papel de arbitraje al poder acumular energía en valles y ofrecer ésta en períodos de pico.

4. Aumenta la competitividad energética y la seguridad de la red eléctrica. Juega un papel importante en los nuevos diseños de **mercados flexibles e incrementa los servicios ofrecidos.** Además constituyen una alternativa económicamente atractiva para la expansión de la red y la desconexión de carga.

5. Mejora los mercados energéticos establecidos. Algunos sistemas de almacenamiento de energía, debido a su naturaleza intersectorial que permite la interconexión entre diferentes tipos de redes de energía, pueden afectar positivamente a los mercados bien establecidos, como el **mercado de gas** (por ejemplo, los sistemas "electricidad hacia gas", *power to gas*), **los mercados locales de energía térmica** (por ejemplo, el almacenamiento de calor), y **los mercados de energía para el transporte** (por ejemplo, la movilidad eléctrica, las pilas de combustible, el gas natural presurizado).

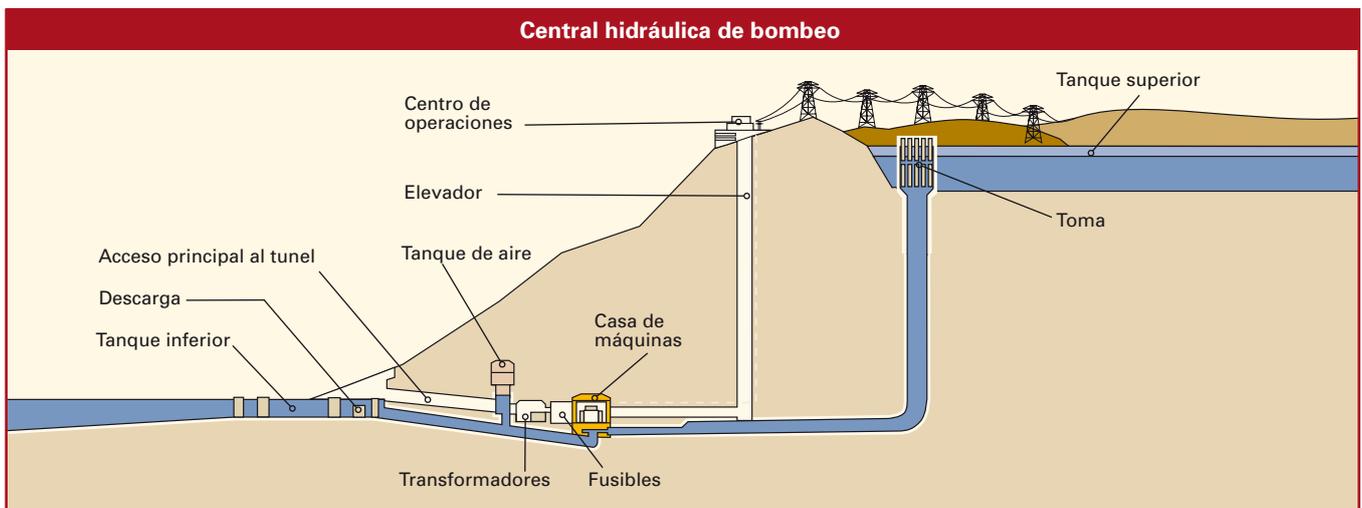


3 ¿Cómo funcionan las tecnologías de almacenamiento?

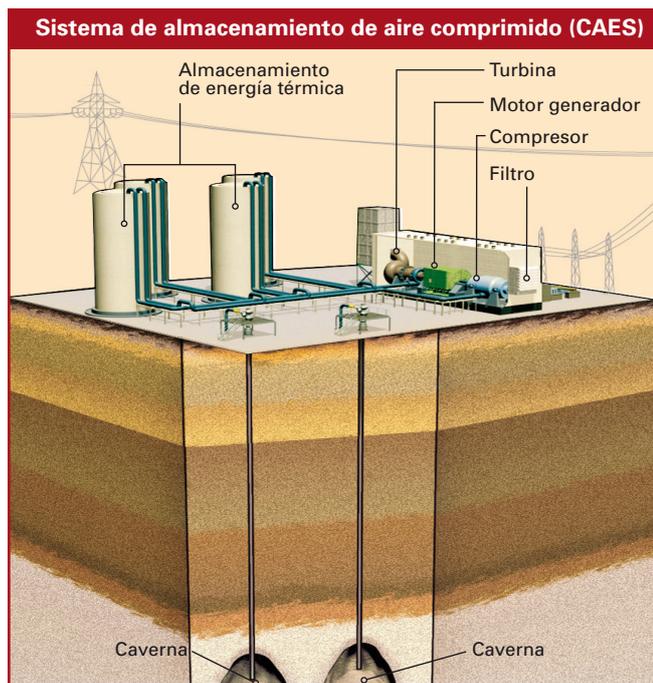
Para almacenar electricidad se pueden utilizar tipos de energía muy distintos.

3.1 Energía mecánica.

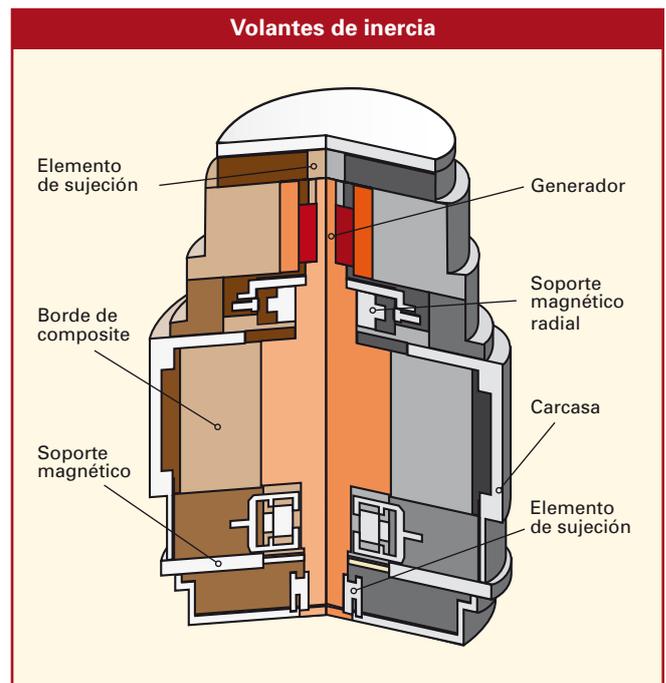
Se fundamenta en tecnologías que permiten la transformación de la energía asociada al movimiento y/o posición en energía eléctrica. Es decir utilizan la energía cinética de rotación (volantes de inercia), potencial (hidráulicas de bombeo) o de compresión de gases presurizados (CAES, *compressed air energy storage*).



Central hidráulica de bombeo. Se basa en el almacenamiento de la energía potencial del agua embalsada en una presa situada a una cierta altura por encima de otra inferior. En momentos de baja demanda y/o bajo precio de la electricidad, se bombea agua hacia el embalse superior. En momentos de elevada demanda de electricidad, el proceso se revierte, y el agua almacenada se libera pasando a través de turbinas para producir electricidad en el generador eléctrico.



Sistema de almacenamiento de aire comprimido (CAES). El aire, previamente, comprimido y retenido por ejemplo en cavernas, en momentos de alta demanda eléctrica, se extrae y se expande a través de turbinas de gas, que convierten la energía acumulada en electricidad a través de generadores eléctricos.

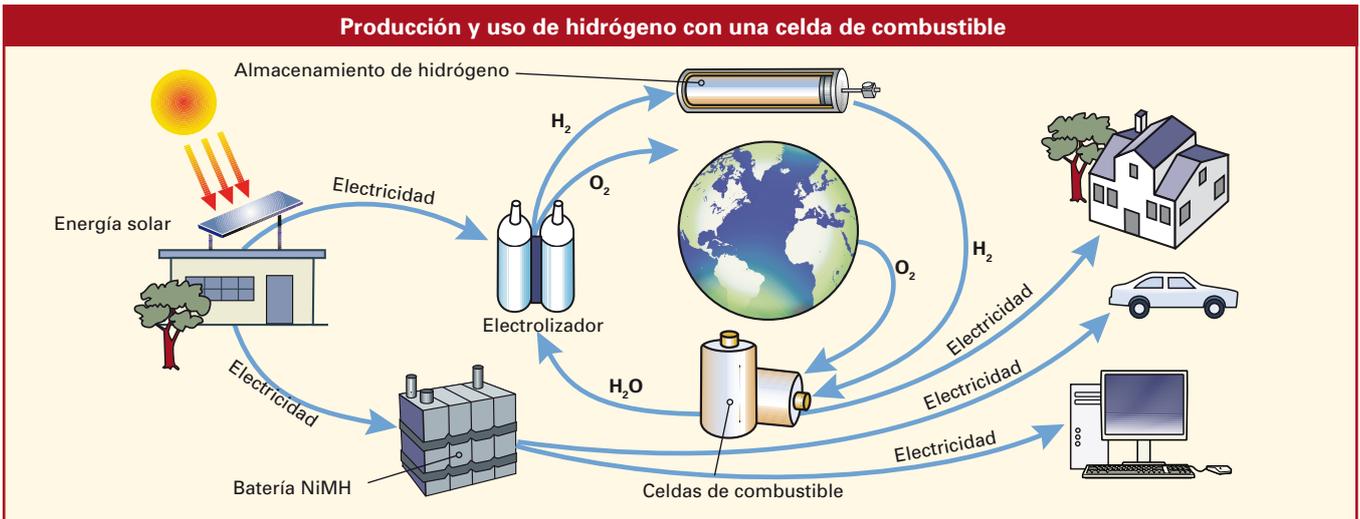


Volantes de inercia. La energía cinética almacenada en una masa giratoria es transferida a un generador eléctrico desacelerando el volante de inercia mediante la acción de un motor de carga. La cantidad de energía almacenada depende de su velocidad de rotación y del momento inercial de rotación del volante o masa giratoria.



3.2 Energía química.

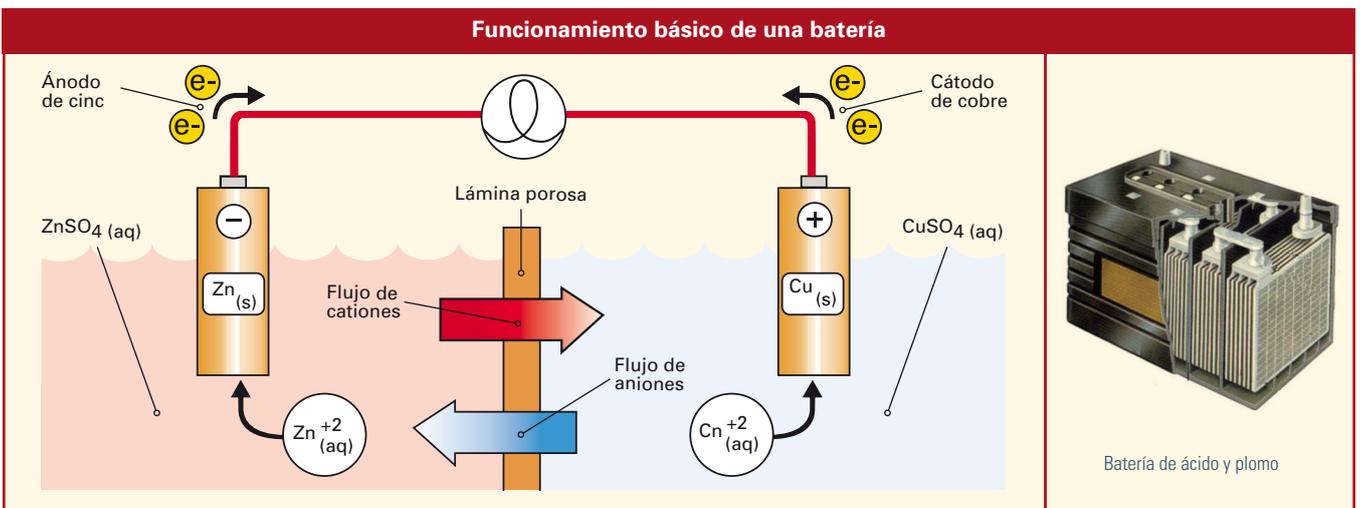
Mediante procesos químicos, la energía eléctrica es transformada en energía química fácilmente transportable. La base de estos procesos la constituyen el agua (H_2O) y el dióxido de carbono (CO_2). Éstos se disocian mediante el aporte de energía eléctrica transformándose en hidrógeno y otras moléculas con un solo átomo de carbono (CO , CH_4 , CH_3OH O $COOH$). En el caso del hidrógeno (H_2) y el metano (CH_4), el almacenamiento en la red de gaseoductos constituye una alternativa eficiente.



Producción y uso de hidrógeno con una celda de combustible. La energía se almacena produciendo hidrógeno, a partir de un proceso electrólisis del agua, en horas valle. Esta energía se libera en horas punta mediante una celda de combustible que combina el hidrógeno y el oxígeno para producir agua y energía eléctrica.

3.3 Energía electroquímica.

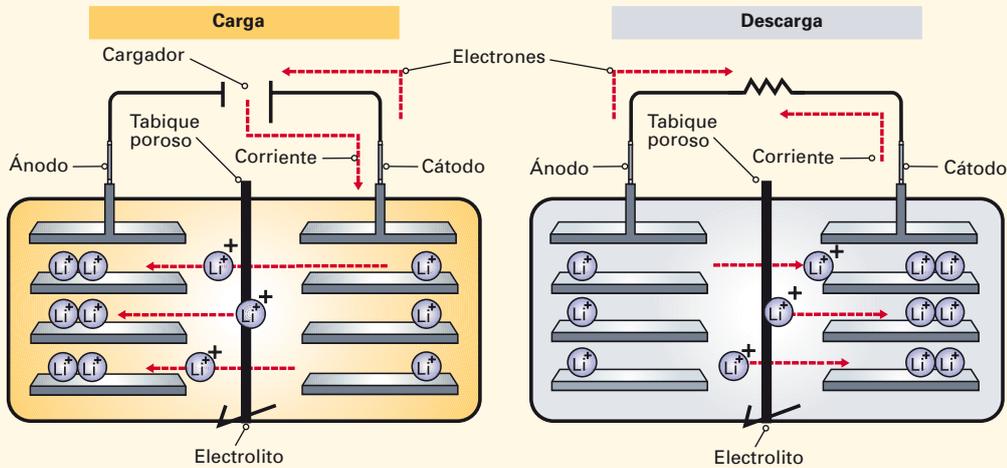
Se asocia a procesos de oxidación/reducción de especies químicas y que mediante celdas electroquímicas se transforma en energía eléctrica en un circuito exterior. A partir del apilamiento de estas celdas se tienen baterías que pueden ser de diferentes tipos según los procesos de oxidación/reducción que se utilicen: plomo-ácido, níquel-cadmio (NiCd), níquel-hidruro de metal (NiMH), ión sodio, ion litio, sodio-azufre (NaS), sodio-cloruro de níquel (NaNiCl), flujo redox, o metal aire.



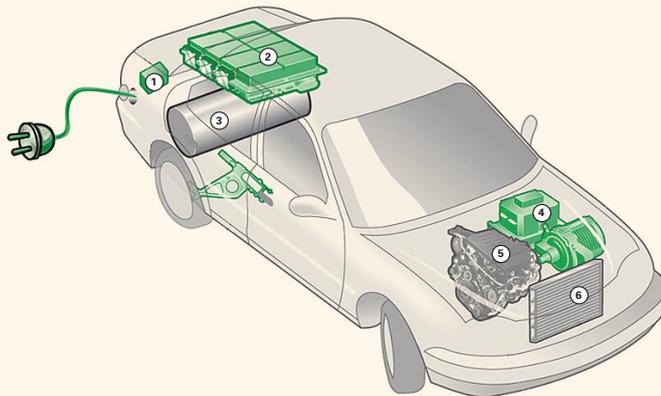
Funcionamiento básico de una batería. La batería es un dispositivo que convierte energía electroquímica en energía eléctrica por un proceso químico reversible llamado reducción-oxidación. Consta, en general, de dos terminales llamados polos, electrodos o bornes, del mismo o de distinto material, sumergidos en una disolución conductora de electricidad o electrolito. Cuando los electrones reaccionan con las especies químicas contenidas en el electrolito, en el polo o electrodo negativo (ánodo) se ganan electrones porque las especies allí presentes se oxidan es decir pierden o ceden los electrones. Estos electrones van por el circuito externo al otro polo o electrodo positivo (cátodo) en donde son cedidos a las especies químicas allí presentes que se reducen ganando o adquiriendo estos electrones cedidos por el circuito exterior. Durante la **descarga** se genera una corriente del electrodo positivo al negativo a través del circuito externo o carga eléctrica (bombilla, resistencias, ...). Hay que tener presente que el movimiento de los electrones es en dirección contraria al de la corriente continua. Sin embargo, para la **recarga** debe aplicarse una fuente de energía externa para invertir las reacciones permitiendo extraer electrones del cátodo para inyectarlos nuevamente en el polo negativo o ánodo. De esta manera los compuestos son transformados a su estado inicial y la celda electroquímica acumula energía eléctrica en forma de energía electroquímica que podría suministrar posteriormente en forma progresiva.



Funcionamiento básico de una batería de ion litio



Batería de ion litio



Vehículo híbrido

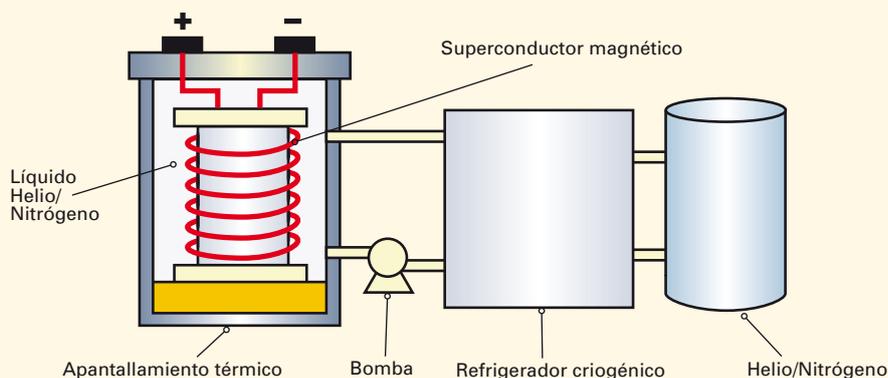
- ① Cargador
- ② Batería
- ③ Almacenamiento de combustible
- ④ Motor eléctrico
- ⑤ Motor
- ⑥ Radiador

Batería de ion litio para vehículo eléctrico. El vehículo funciona con un motor eléctrico que se alimenta de baterías recargadas a través de la red eléctrica. Durante la carga, la fuente de tensión aplicada provoca que el litio regrese a su situación original, almacenándose en el ánodo (polo negativo). Durante la descarga, el litio migra hacia el cátodo al mismo tiempo que se genera una corriente eléctrica que es capaz de mover el motor eléctrico que impulsa el vehículo.

3.4 Energía electromagnética (SMES).

Gracias a las propiedades de resistencia eléctrica nula que presentan los materiales superconductores, la energía eléctrica puede ser almacenada con pérdidas insignificantes en bobinas superconductoras enfriadas a su temperatura funcional de trabajo mediante un sistema de refrigeración criogénica.

Bobina superconductora (SMES)



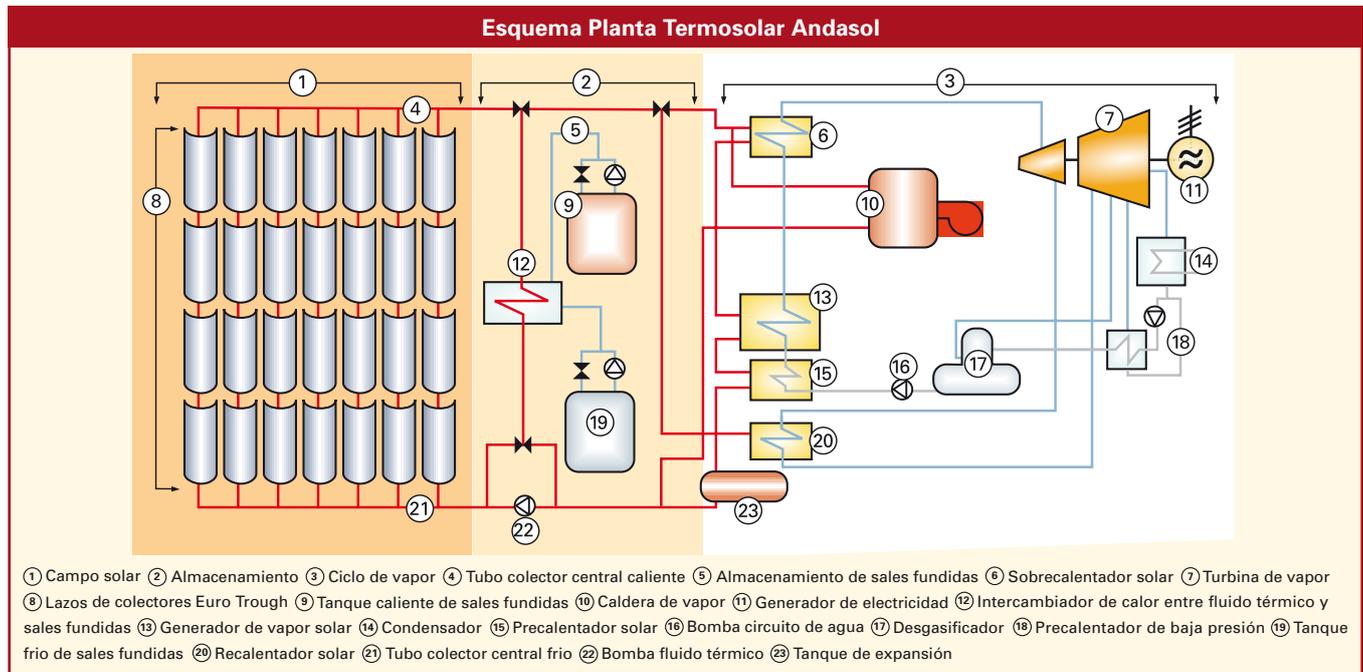
Bobinas Superconductoras (SMES)

Bobinas Superconductoras (SMES). La energía almacenada se puede transferir a la red descargando la bobina. El sistema utiliza un inversor/rectificador para transformar la energía de corriente alterna a corriente continua o viceversa.



3.5 Energía térmica.

Se basa en la capacidad de determinados materiales (sales fundidas, agua, aceite, materiales refractarios, compuestos químicos, etc...) para acumular energía en forma de calor o energía térmica debido a sus calores específicos y/o calores de cambios de fase o mediante reacciones químicas.



Planta Termosolar Andasol (Granada) 2008. Su sistema de almacenamiento térmico mediante sales fundidas permite la operación estable de esta Central Termosolar en períodos de ausencia o alta variabilidad de radiación solar.

4 Criterios para evaluar las tecnologías de almacenamiento.

Para evaluar y diferenciar entre las tecnologías de almacenamiento disponibles y para poder seleccionar los dispositivos más adecuado para una aplicación deseada deberán ser examinados los aspectos que a continuación se presentan.

Criterios de evaluación

- 1. Eficiencia.** Los dispositivos de almacenamiento presentan pérdidas. Para evaluar la eficiencia se tiene que tener en cuenta el ciclo completo: carga, mantenimiento de carga y descarga.
- 2. Durabilidad.** El tiempo de vida dependerá en algunos casos del número de ciclos de carga y descarga, profundidad del ciclo, nivel de no retorno en la descarga y envejecimiento.
- 3. Densidad de energía y potencia de almacenamiento.** Son relevantes para la evaluación de la relación energía/potencia de una tecnología y para determinar el volumen y peso de una solución dada. Estas son características importantes para las aplicaciones con espacio y peso limitado, como el transporte o aparatos móviles y para su instalación en zonas urbanas o edificios donde el espacio es limitado.
- 4. Fiabilidad.** Probabilidad que un dispositivo funcione durante un periodo de tiempo especificado.
- 5. Tiempo de respuesta.** Desde unos milisegundos a algunos minutos.
- 6. Capacidad de almacenamiento: potencia y energía.** En algunas aplicaciones es preciso disponer de una alta capacidad de almacenamiento de energía mientras que otros casos se requieren sistemas con gran capacidad de potencia.
- 7. Coste de la energía almacenada.** El precio del kWh almacenado puesto de nuevo en la red eléctrica comparado con el coste del kWh generado y puesto también en la red (Costes LCD "Levelized Cost of the Energy")



1 Anexos

Tabla 1. Tecnologías de almacenamiento (I): características y prestaciones

Características	Hidráulica de Bombeo	Volantes de inercia	CAES (compressed air energy storage)	Almacenamiento químico (H2, metano sintético)	Baterías de Ion litio, NaS, NaNiCl	Baterías de flujo redox	Supercapacitores	Bobinas superconductoras	Acumulación térmica latente, sensible y termoquímica
Rango de potencia (MW)	100-5000 MW	0,002-20 MW	100-300 MW	0,001- GW	50 MW	Hasta 7 MW	0,01-1 MW	0,01-10 MW	0 ,001-10 MW
Intervalo de duración de energía (tiempo)	1-24 h	s-15 min	1-24 h	>días	min-h	>10 h	ms-min	ms- 5 min	-
Tiempo de respuesta (s-min)	s-min	s	5-15 min CAES submarino < 2 min	-	variable	ms	ms	ms	-
Densidad de energía Wh/kg ó Wh/l	0,04-1,5 Wh/l	5-130 Wh/kg	30-60 Wh/kg	-	250 Wh/kg	50 Wh/kg	0,1-15 Wh/kg	0,05-5 Wh/kg	-
Auto descarga (%/día)	0%/día	0-100%/día	0%/día	0%/día	20%/día (NaS) 0.2% día (Ion Litio)	0,1%/día	2-40%/día	2-40%/día	-
Rendimiento ciclo carga/descarga (%)	75%	85-95%	55% Diabático; 70% Adiabático; 75% Isotérmico	<50%	90%	85-90%	95%	95%	50-100%
Vida media (años)	50-100 años	>20 años	25-40 años	-	5 años (Ion litio) 10 años (NaS)	>20 años	>20 años	>20 años	-

Rango de potencia / energía. Energía liberada o absorbida por el sistema de almacenamiento en un tiempo determinado.

Autodescarga. Efecto que provoca la disminución del voltaje de las baterías y por tanto su energía.

Ciclo de carga y descarga. Periodo de tiempo que contabiliza el número de cargas y descargas de las baterías durante su vida útil.

Densidad energética. A día de hoy, el ratio de almacenamiento energético gasolina/baterías se mantiene por encima de 60:1. La densidad energética de la gasolina supera los 12.000 Wh/kg.

Tabla 2. Tecnologías de almacenamiento (II): aplicaciones, ventajas e inconvenientes

Tecnología	Ventajas	Inconvenientes	Aplicaciones
Hidráulica de Bombeo	<ul style="list-style-type: none"> • Madurez tecnológica. • Costos de operación y mantenimiento bajos. • Larga vida útil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Restricciones impuestas por limitaciones geográficas. • Limitaciones impuestas por los tiempos de arranque y de transición entre regímenes de funcionamiento. • Inversión inicial muy elevada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Proteger al sistema eléctrico de apagones, reducir distorsiones armónicas y eliminar caídas de potencia en la red. <p>Ejemplo de aplicación: planta de Lundington en Michigan (USA).</p>
Volantes de inercia	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada densidad de potencia y energía. • Rápida capacidad de respuesta. • Poco mantenimiento y esperanza de vida de 20 años. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coste inicial mayor que las baterías pero requieren menos mantenimiento y presentan mayor durabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilización de frecuencia de la red. • Sector transporte (trenes, autobuses eléctricos). • Suministro de energía durante un breve intervalo de tiempo (ascensores y grúas). <p>Ejemplo de aplicación: planta de regulación de Shephentown (EEUU).</p>
CAES (compressed air energy storage)	<ul style="list-style-type: none"> • El CAES Isotérmico destaca por su flexibilidad, la ausencia de emisiones y escalabilidad independiente en la potencia y capacidad de almacenamiento. • Los costes de inversión y explotación, aunque todavía son considerables, son menores que los requeridos por las centrales hidráulicas de bombeo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado tiempo de respuesta. • Las capacidades y rendimientos son menores en comparación al sistema hidráulico de bombeo. • Poca madurez tecnológica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soporte a la red de distribución eliminando la necesidad de sistemas auxiliares de estabilización. • Actúan como elemento para obtener el balanceo de generación de potencia entre oferta y demanda así como de elementos de restablecimientos del sistema. <p>Ejemplos de aplicación. Plantas de CAES de Huntorf (Alemania) y McIntosh (EEUU).</p>



Tabla 2. Tecnologías de almacenamiento (II): aplicaciones, ventajas e inconvenientes

Tecnología	Ventajas	Inconvenientes	Aplicaciones
Potencia eléctrica a gas	<ul style="list-style-type: none"> Sencillo de almacenar y recuperar energía química. Tecnologías relacionadas con el concepto de "electricidad a gas" que permiten la interconexión entre la red eléctrica y la red de gas natural. 	<ul style="list-style-type: none"> Baja densidad volúmica y peligro de explosión. La introducción de estas tecnologías en aplicaciones en la red eléctrica precisan de regulación. Las instalaciones con estos gases precisan normas de seguridad y obtener la aceptación social. 	<ul style="list-style-type: none"> Arbitraje de la energía. Servicios en la red eléctrica. <p>Ejemplo de aplicación. Unidad de metanización ETOGAS para AUDI en Werlte (Alemania) (2013).</p>
Batería Plomo ácido	<ul style="list-style-type: none"> Madurez tecnológica. Modularidad que permite diseños avanzados de sistemas a partir de combinación de celdas y módulos más simples o en sistemas híbridos. 	<ul style="list-style-type: none"> Largos tiempos de carga. Excesiva influencia de la temperatura ambiente. Mantenimiento excesivo. Bajo número de ciclos para sus aplicaciones en redes eléctricas. 	<ul style="list-style-type: none"> Automoción. Control de la red: frecuencia, tensión, potencia. Nivelación de la curva de demanda diaria. <p>Ejemplo de aplicación: Southern Californi Edison Chino Battery Storage Project, Ca, (USA).</p>
Batería Ni-Cd	<ul style="list-style-type: none"> Tecnología madura y robusta. Elevado rendimiento (mejor rendimiento que la batería de plomo ácido). 	<ul style="list-style-type: none"> Alta toxicidad del cadmio, elevado coste, efecto memoria. 	<ul style="list-style-type: none"> Dispositivos domésticos, aplicaciones en telecomunicaciones, satélites y astronáutica y compensación de energía reactiva. <p>Ejemplo de aplicación: Golden Valey Electric Association (GVEA), Fairbanks, Alaska, USA.</p>
Batería NiMH	<ul style="list-style-type: none"> Ecológicamente benigna y con mayor densidad de energía que la batería Ni-Cd. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta autodescarga. Rango de temperaturas aconsejables (0-45 °C). No trabajan bien a bajas temperaturas. Celdas costosas. 	<ul style="list-style-type: none"> Dispositivos electrónicos portables (teléfono móviles), vehículos híbridos, telecomunicaciones, satélites, astronáutica.
Batería Ión Litio	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia y densidad de energía, comparada a otras tecnologías electroquímicas Bajo mantenimiento requerido. Alto voltaje de la reacción redox por celda. 	<ul style="list-style-type: none"> Costes elevados para aplicaciones de escala media y alta. Debido a su compleja estructura interna, mantenimiento de voltajes de seguridad y rangos de temperatura de operación. Se requieren circuitos de protección. Uso de electrolitos orgánicos inflamables. 	<ul style="list-style-type: none"> Pequeños dispositivos, vehículo eléctrico, soporte a red y al transporte de electricidad. <p>Ejemplo de aplicación: Proyecto de Tehachapi, en California, EEUU.</p>
Baterías NaS	<ul style="list-style-type: none"> Alta energía y densidad de potencia, pulsos de elevada potencia. Materiales baratos y abundantes. 	<ul style="list-style-type: none"> Pérdidas por mantenimiento de la temperatura de la batería. Las baterías de sodio/azufre tienen muchos problemas de corrosión, sellado entre electrodos y en los compartimentos. Elementos de seguridad en la celda para prevenir reacciones químicas sodio-azufre. Gastos de mantenimiento excesivos. 	<ul style="list-style-type: none"> Integración de fuentes de energía renovables y múltiples funciones de gestión energética. <p>Ejemplo de aplicación: Tokio Electric Power Company (TEPCO en Tokio).</p>
Batería Na-Ni-Cl	<ul style="list-style-type: none"> Rápida capacidad de respuesta, robustez, buena densidad de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> Pérdidas por mantenimiento de la temperatura de la batería. 	<ul style="list-style-type: none"> Electromovilidad, funciones de soporte de la red.
Baterías de flujo	<ul style="list-style-type: none"> Durabilidad y elevada eficiencia de energía. Larga vida media. Bajo tiempo de respuesta. Alta modularidad. 	<ul style="list-style-type: none"> Baja densidad de energía, complejidad del sistema fluido. 	<ul style="list-style-type: none"> Múltiples funciones de gestión energética y ajuste del sistema eléctrico en distribución y para usuarios finales. Sistemas de almacenamiento para fuentes de generación distribuida y redes inteligentes. <p>Ejemplo de aplicación. Sumitomo Electric Industries, (Japan).</p>
Supercapacidad/ Pseudocapacidad	<ul style="list-style-type: none"> Alta densidad de potencia, tiempos de respuestas rápidos. Amplio rango de temperatura de trabajos desde -40 °C a +85 °C. Eficiencia alta por ciclo de carga/descarga 85-98%. Nulo mantenimiento, con un elevado número de ciclos. 	<ul style="list-style-type: none"> Densidad energética baja, alto nivel de autodescarga, fluctuaciones en los valores de voltaje de carga y descarga. Costes excesivos limitan su uso en redes eléctricas. 	<ul style="list-style-type: none"> Automóviles, autobuses híbridos, dispositivos electrónicos como móviles y portátiles, taladros y maquinarias portátiles, luces flash de cámaras, trenes, grúas, ascensores, sistemas de frenado en autobuses, trenes ó tranvías. Elementos para sistemas híbridos de almacenamiento. <p>Ejemplo de aplicación. Instalaciones de energía solar y eólica así como redes in Palmdale, California (USA).</p>
Bobinas superconductoras	<ul style="list-style-type: none"> Alta capacidad de almacenamiento de energía magnética, y larga vida útil. Carecen de partes móviles lo que hace incrementar su fiabilidad y robustez. Son fácilmente integrables como parte de sistemas híbridos de almacenamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> Necesidad de disponer un sistema criogénico y sistemas modulares para favorecer la escalabilidad. Costes elevados. Elementos críticos poco abundantes para las bobinas superconductoras. 	<ul style="list-style-type: none"> Calidad de onda en las redes de distribución de electricidad, típicamente la neutralización de las caídas súbitas de tensión y los microcortes. Componentes en sistemas híbridos. <p>Ejemplo de aplicación: Wisconsin Estados Unidos.</p>
Acumulación térmica latente, sensible y termoquímica	<ul style="list-style-type: none"> Posibilidad de combinar sistemas de almacenamiento basados en calor sensible con bombas de calor, potenciando los sistemas de calefacción y refrigeración de edificios. 	<ul style="list-style-type: none"> Costes de inversión altos difíciles de recuperar. Baja densidad energética. Gran pérdida de calor a lo largo del tiempo. No existe regulación para el mercado de la energía térmica almacenada. 	<ul style="list-style-type: none"> Producción y acumulación de agua caliente, sistemas de climatización, procesos industriales con demandas térmicas, uso en centrales y sistemas de producción de electricidad y aplicación en sistemas basados en fuentes renovables. <p>Ejemplo de aplicación. Planta renovable híbrida ubicada en la isla de Pellworm (Islas Frisias).</p>



Fundación Gas Natural Fenosa

Plaça del Gas, 8 · 08201 Sabadell · Barcelona (Espanya)

Tel.: +34 934 129 640

Fax: +34 937 450 320

fundaciongasnaturalfenosa@gasnatural.com

Editor: Fundación Gas Natural Fenosa

Realización: diciembre 2013

www.fundaciongasnaturalfenosa.org