



Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Magíster en Ingeniería de la Energía
IEN 3320 Mercados Energéticos

Almacenamiento de Energía: Desarrollos Tecnológicos y Costos

Trabajo de Investigación

Alumnos: Fredy Valdovinos
Roberto Otárola

Profesor: Hugh Rudnick

Santiago, 29 de septiembre de 2008



Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Magíster en Ingeniería de la Energía
IEN 3320 Mercados Energéticos

Índice

	Página
Resumen	1
Introducción	2
Sección 1: Desarrollos Tecnológicos	3
Sección 2: Costos	12
Conclusiones y Reflexiones	13
Referencias	15



Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Magíster en Ingeniería de la Energía
IEN 3320 Mercados Energéticos

Resumen

Revisaremos los principales desarrollos tecnológicos disponibles para almacenar energía (e.g. Hidroelectricidad Bombeada, Almacenamiento de Energía con Aire Comprimido, Volantes de Inercia, Baterías, Almacenamiento de Energía en Superconductores Magnéticos, Supercondensadores, Almacenamiento Térmico, Hidrógeno), sus características y costos.

El almacenamiento de energía es una pieza clave para aumentar la eficiencia y sustentabilidad de los sistemas energéticos, y, por ende, del desarrollo de nuestra sociedad.



Introducción

El presente trabajo está enfocado a revisar las tecnologías apropiadas para el almacenamiento de electricidad, por tratarse de un tema aún no resuelto en aplicaciones a escala industrial.

A diferencia de los mercados de commodities almacenables, en los mercados eléctricos el equilibrio entre demanda y oferta ocurre en tiempo real. Aunque muchos de los sistemas eléctricos actuales operan eficazmente sin almacenamiento, la utilización de formas sencillas, económicas y efectivas de almacenar electricidad contribuirían a incrementar su confiabilidad y eficiencia.

El almacenamiento de energía nos permite satisfacer la demanda incluso cuando existe un desfase con respecto a la generación.

Por consiguiente, en el contexto del mercado eléctrico, los principales objetivos del almacenamiento de energía son:

1. Aumentar la eficiencia de los sistemas eléctricos, al reducir la necesidad de centrales de generación de respaldo.
2. Aumentar la confiabilidad de los sistemas eléctricos, al evitar los costos de interrupción del suministro.
3. Aumentar la disponibilidad de fuentes renovables (e.g. solar, eólica).



Sección 1: Desarrollos Tecnológicos

Existen diversas formas de almacenar energía, las cuales pueden agruparse en dos tipos:

- (i) almacenamiento químico, como energía contenida en los enlaces moleculares;
- (ii) almacenamiento físico, como energía potencial, cinética, térmica o eléctrica.

En esta sección, enfocaremos la discusión al almacenamiento de energía por medios físicos, describiendo las principales alternativas tecnológicas y presentando sus características más relevantes.

Cuadro 1: Tecnologías de Almacenamiento de Energía

Mode	Primary Energy Type	Characteristic Energy Density kJ/kg	Primary Application Sector
Pumped Hydropower	Potential	1 (100 m head)	Electric
Compressed Air Energy Storage (CAES)	Potential/Enthalpy	15.000 in kJ/m ³	Electric
Flywheels	Kinetic	30-360	Transport
Batteries	Electrochemical	Lead acid – 60-180 Nickel Metal hydride – 370 Li-ion – 400-600 Li-polymer ~ 1.400	Transport, Buildings
Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)	Electromagnetic	100-10.000	Electric
Supercapacitors	Electrostatic	18-36	Transport
Thermal	Enthalpy (sensible + latent)	Water (100-40°C) – 250 Rock (250-50°C) – 180 Salt (latent) – 300	Buildings
Fossil Fuels	Reaction Enthalpy	Gas – 47.000 Oil – 42.000 Coal – 32.000	Transport, Electric, Industrial, Buildings
Biomass	Reaction Enthalpy	Drywood – 15.000	Transport, Electric, Industrial, Buildings

Fuente: Adaptado de Tester et al. (2005)



Cuadro 2: Características de Tecnologías de Almacenamiento de Energía

Characteristic	Pumped Hydropower	CAES	Flywheels	Batteries	SMES	Supercapacitors	Thermal
Energy Range MJ	1,8x10 ⁶ -36x10 ⁶	18 x10 ⁴ -18x10 ⁶	1-18.000	1.800-180.000	1.800-5,4x10 ⁶	1-10	1-100
Power Range MWe	100-1.000	50-1.000	1-10	Lead acid – 60-180 Nickel Metal hydride – 370 Li-ion – 400-600	10 – 1.000	0,1-10	0,1-10
Overall Cycle Efficiency	64-80%	60-70%	~90%	~75%	~95%	~90%	~80-90%
Charge/Discharge Time	Hours	Hours	Minutes	Hours	Minutes to Hours	Seconds	Hours
Cycle Life	≥10.000	≥10.000	≤10.000	≤2.000	≥10.000	>100.000	>10.000
Footprint/Unit Size	Large if above ground	Moderate if under ground	Small	Small	Large	Small	Moderate
Siting Ease	Difficult	Difficult to moderate	N/A	N/A	Unknown	N/A	Easy
Maturity	Mature	Early development	Early development	Lead acid mature, others under development	Early R&D stage, under development	Available	Mature

Fuente: Adaptado de Tester et al. (2005)

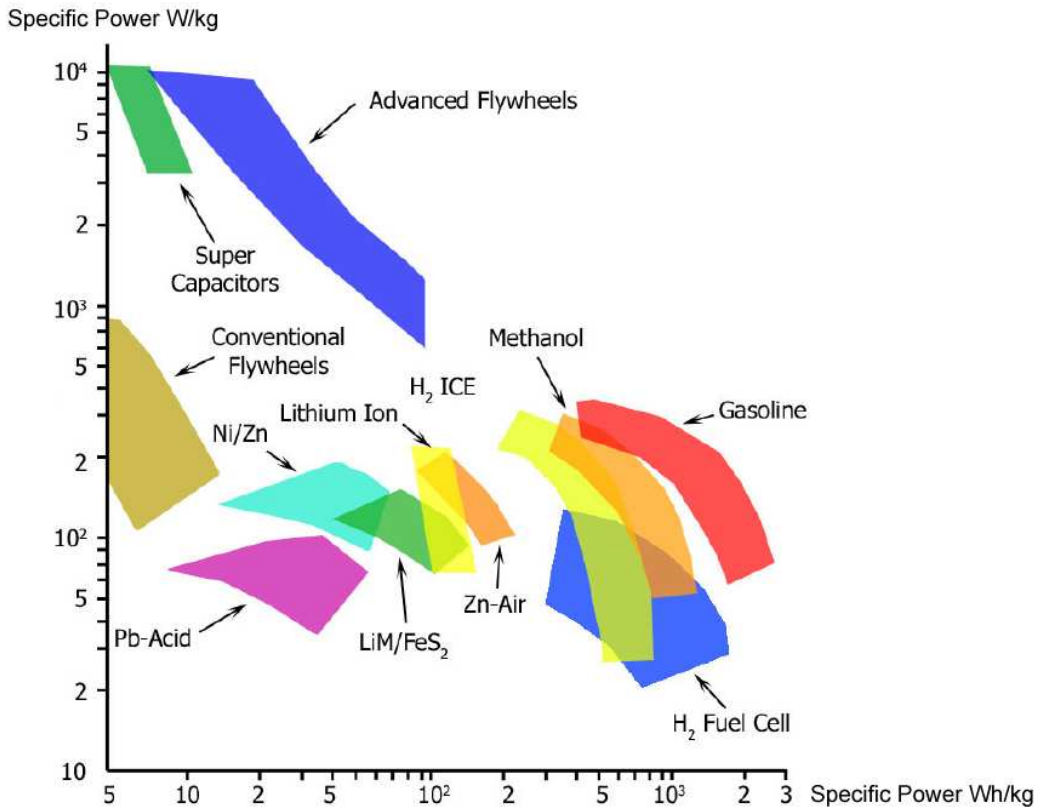


Figura 1: Gráfico de Potencia Específica versus Energía Específica de Tecnologías de Almacenamiento de Energía. Adaptado de Tester et al. (2005).

Pumped Hydropower (Hidroelectricidad Bombeada):

El sistema de hidroelectricidad bombeada consiste en bombear agua hasta un depósito ubicado a una cierta altura para almacenarla como energía potencial, que puede ser aprovechada a medida que el agua baja en el campo gravitacional de la Tierra accionando una turbina, que acoplada a un generador, permite obtener electricidad.

Se utiliza para suavizar la carga de generación diaria, bombeando agua al depósito durante horas valle (i.e. de baja demanda), usando los excedentes disponibles en el sistema eléctrico. Durante las horas punta (i.e. de alta demanda), el agua almacenada se puede utilizar para generación de hidroelectricidad, constituyéndose así en una reserva de alto valor por su capacidad de respuesta rápida para cubrir peaks transitorios de demanda.

La eficiencia global de los sistemas de hidroelectricidad bombeada bien diseñados está en el rango de 72 a 81%. Actualmente es la forma más rentable de almacenamiento de energía. El principal problema es que requiere generalmente dos depósitos ubicados en cotas diferentes (aprox. 100 m) y a menudo tiene asociados considerables costos de capital.

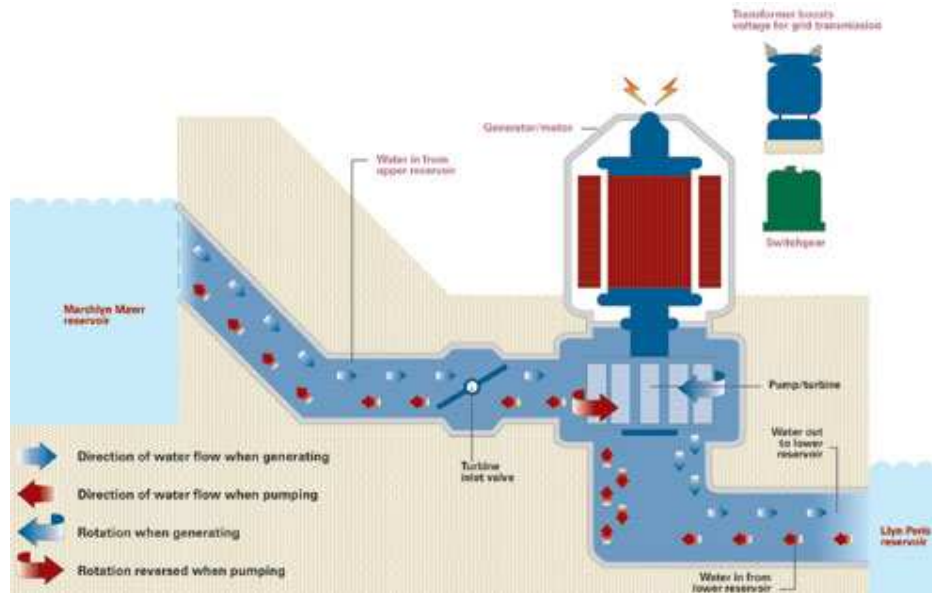


Figura 2: Esquema de funcionamiento sistema pumped hydropower.

CAES (Almacenamiento de Energía con Aire Comprimido):

Los sistemas CAES utilizan la energía compresiva asociada al aire presurizado contenido en depósitos subterráneos consistente en cavidades naturales o antiguas minas o en acuíferos porosos que están geológicamente contenidos. El almacenamiento se realiza comprimiendo el aire durante horas valle. Durante horas punta el aire comprimido se utiliza para producir potencia al expandirlo en una turbina de gas con relativamente alta eficiencia.

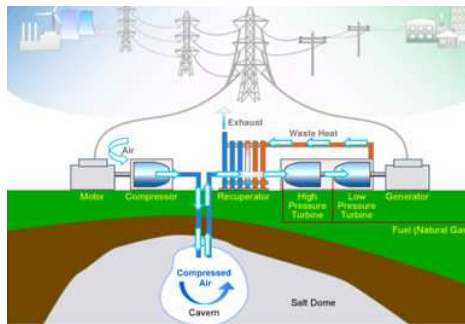


Figura 3: Esquema de funcionamiento sistema CAES.

Flywheel (Volante de Inercia):

La inercia mecánica es la base de este método del almacenaje. Un disco pesado que rota es acelerado por un motor eléctrico, que actúa como generador en reversa, retrasando el disco y produciendo electricidad. La electricidad se almacena como energía cinética. La fricción se debe mantener al mínimo para prolongar el tiempo de almacenaje. Esto se logra colocando la rueda volante en el vacío y usando cojinetes magnéticos, lo cual hace que el método sea costoso.



Velocidades más grandes de la rueda permiten mayor almacenamiento pero requieren materiales fuertes (tales como acero) o materiales compuestos para resistir la fuerza centrífuga. Se está investigando el uso de nanotubos de carbón como material de la rueda.

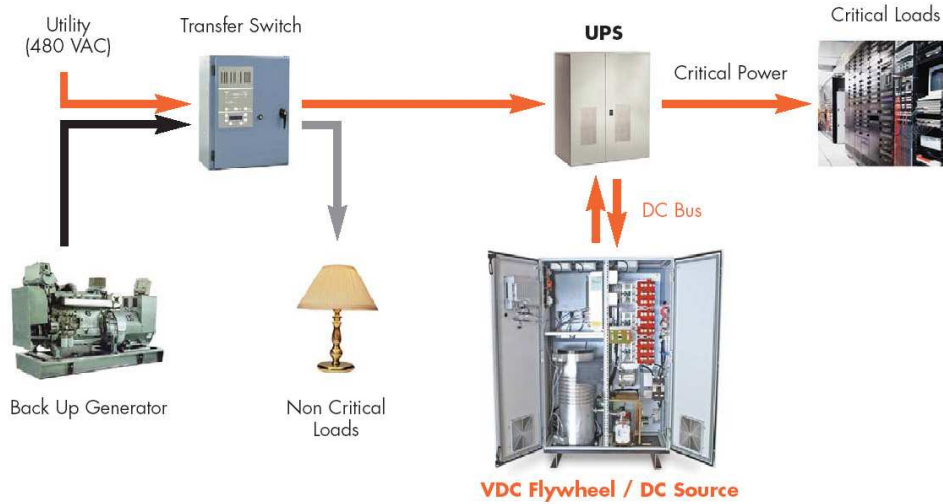


Figura 4: Esquema de sistema eléctrico con flywheel.



Figura 5: Foto sistema flywheel.



Batteries (Baterías):

En las baterías la energía eléctrica es almacenada (cargada) o liberada (descargada) mediante reacciones electroquímicas que transportan electrones a los electrodos (cátodo y ánodo), conectados por un electrolito (e.g. soluciones líquidas, polímeros conductores sólidos, gel), para llevar cabo reacciones específicas de reducción/oxidación (redox). Frecuentemente se utilizan catalizadores para acelerar las tasas de reacción a niveles aceptables. Durante la carga, la energía se almacena químicamente al incrementarse la composición de iones cargados contenidos en el electrolito a través de reacciones redox selectivas en los electrodos que consumen o producen electrones. Durante la descarga, la energía se libera por transporte de iones, causando reacciones redox que ocurren de forma inversa en los electrodos. Luego el ánodo (electrodo oxidante) y el cátodo (electrodo reductor) cambian de posición entre carga y descarga.

La electricidad se produce en corriente continua y para aplicación en centrales de potencia normalmente se convierte a corriente alterna mediante un inversor.

Las baterías son generalmente costosas, requieren mucho mantenimiento y tienen vida útil limitada.

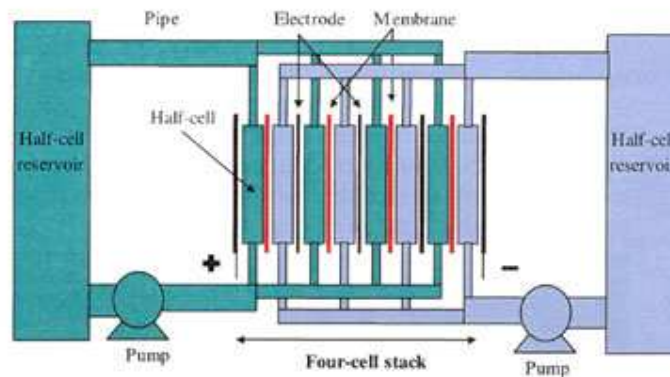


Figura 6: Esquema de funcionamiento batería.



Figura 7: Foto sistema de baterías redox.



SMES (Almacenamiento de Energía en Superconductores Magnéticos):

Los sistemas SMES almacenan energía electromagnética con pérdidas insignificantes mediante la circulación de corriente continua a través de bobinas superconductoras, enfriadas criogénicamente. La energía almacenada se puede lanzar de nuevo a la red descargando la bobina. El sistema utiliza un inversor/rectificador para transformar energía de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC) o vice versa. El inversor/rectificador presenta pérdidas de energía cercanas al 2-3% en cada dirección. Los SMES presentan menores pérdidas de electricidad en comparación a otros métodos de almacenamiento de energía. El alto costo de los superconductores es la limitación principal para el uso comercial de este método de almacenamiento de energía.

Debido a las necesidades energéticas de refrigeración y a los límites en la energía total capaz de ser almacenada, los SMES se utilizan actualmente para el almacenamiento de energía por breves periodos de tiempo.

The world's largest*4 superconducting magnetic energy storage system supplies electricity in case of sudden drops in voltage from lightning strikes and other natural phenomena



Figura 8: Foto sistema SMES

Supercapacitors (Supercondensadores):

Los supercondensadores almacenan energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas confinadas en pequeños dispositivos, formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico. Los supercondensadores tienen la capacidad de ser cargados y descargados en brevísimos periodos de tiempo, del orden de segundos o menos, lo cual los hace especialmente apropiados para responder ante interrupciones de suministro de poca duración.

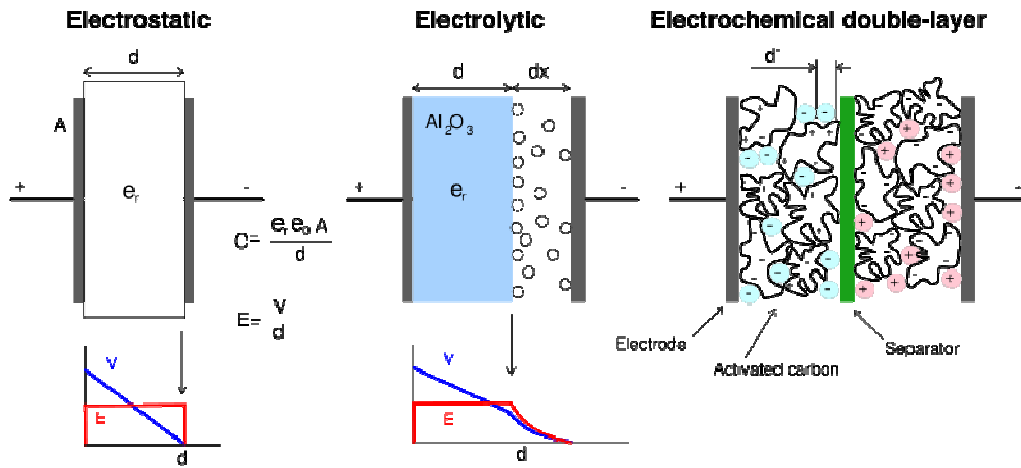


Figura 9: Tipos de supercondensadores.



Figura 10: Supercondensadores y banco de supercondensadores (copyright de Maxwell Technologies).

Thermal (Almacenamiento Térmico):

Las propuestas de diseño se han orientado al uso de sal fundida como un almacén de calor, recolectado por una torre solar, y utilizado para generar electricidad en mal tiempo o en la noche. Se esperan eficiencias térmicas sobre el 99% en un año.

Otro uso consiste en utilizar electricidad remanente para producir hielo y almacenar hasta el día siguiente, cuando se utiliza para refrescar el aire en un edificio grande, o el aire producido por un turbogenerador de gas, aumentando la capacidad de generación en momentos peak.

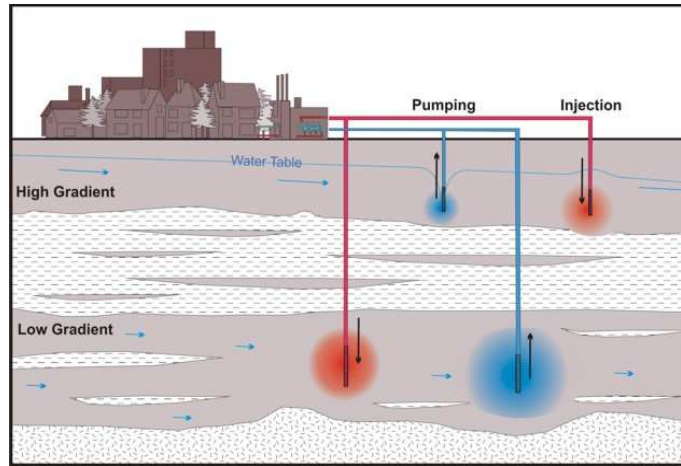


Figura 11: Esquema de funcionamiento sistema térmico.

Hydrogen (Hidrógeno):

El hidrógeno también se está desarrollando como medio de almacenamiento de energía. La energía se almacena produciendo hidrógeno, a partir del reformado de gas natural o por electrólisis del agua, en horas valle y se libera en horas punta generando electricidad en alguna tipo de Fuel Cell (celda de combustible).

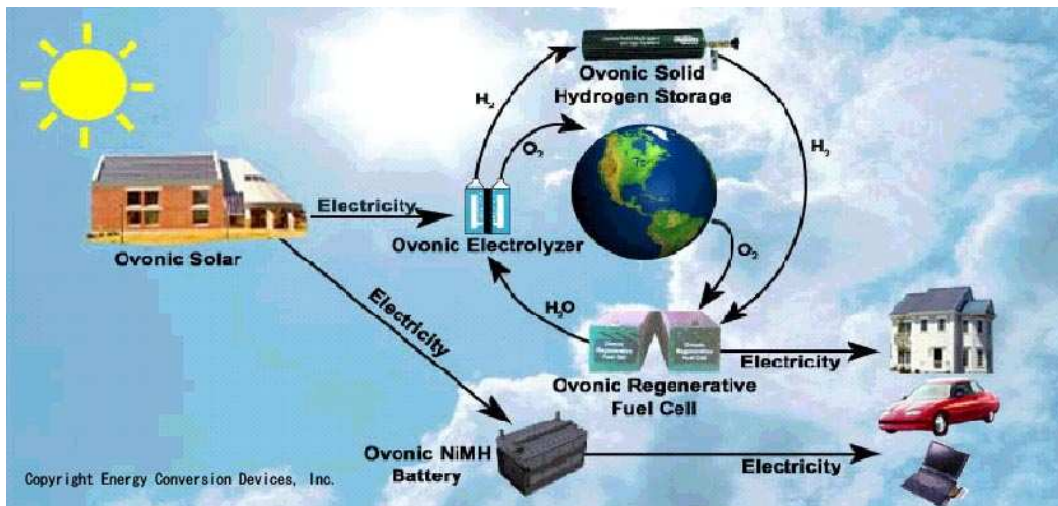


Figura 12: Sistema de almacenamiento por hidrógeno.



Sección 2: Costos

En términos generales, el almacenamiento de energía es económico cuando el costo marginal de la electricidad varía más que los costos de almacenar y recuperar la energía, más el precio de la energía perdida en el proceso.

El coste marginal de producir electricidad varía debido a los diferentes costos operacionales y de combustible que presentan distintas clases de generadores. En un extremo, las centrales hidroeléctricas, las renovables y las centrales nucleares son generadores de bajo costo marginal, pues tienen altos costos de capital pero bajos costos de operación y mantenimiento (O&M). En el otro extremo, las centrales eléctricas que funcionan en base a combustibles fósiles, tienen costos de capital más bajos, pero altos costos de O&M. Para reducir al mínimo el costo operacional total de generar energía, los generadores de carga base despachan energía la mayor parte del tiempo, mientras que los generadores para instantes peak, sólo despachan energía cuando son necesarios. Esto se llama “despacho económico de carga”.

La demanda por electricidad en el mundo varía en el curso del día y de temporada en temporada. Para la mayor parte, la variación en la demanda eléctrica es satisfecha variando la cantidad de energía eléctrica generada de fuentes primarias. Sin embargo, cada vez más los operadores están almacenando energía de bajo costo producida en la noche, y después la están lanzando al sistema durante las temporadas altas del día en que es más valiosa. En las áreas donde existen represas hidroeléctricas, el despacho puede ser retrasado hasta que la demanda es mayor; esta forma de almacenaje es común y puede hacer uso de depósitos existentes. Las fuentes renovables con producción variable, como el viento y la energía solar, tienden a aumentar su variación neta en la carga eléctrica, aumentando la oportunidad para el almacenamiento de energía en el sistema.

Cuadro 3: Costos de Capital Estimados de Tecnologías de Almacenamiento de Energía

System	Power Range MWe	US\$/kWe	US\$/kWh
Pumped Hydropower	100-1.000	600-1.000	10-15
Compressed Air Energy Storage (CAES)	50-1.000	500-1.000	10-15
Flywheels	1-10	200-500	100-800
Batteries	Lead acid – 0,5-100	100-200	150-300
	Nickel Metal hydride – 0,5-50	200-400	
	Li-ion – 0,5-50	200-400	
Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)	10 – 1.000	300-1.000	300-3.000
Supercapacitors	0,1-10	300	3.600
Thermal	0,1-10		



Conclusiones y Reflexiones

Almacenamiento de energía y reducción de carga constituyen los pilares de la gestión energética en generación distribuida.

Al respecto, uno de los potenciales más importantes de los desarrollos tecnológicos en almacenamiento es poder utilizar eficientemente los recursos energéticos y la infraestructura disponible, reduciendo el crecimiento sistemático del sistema eléctrico. Mantener potencia instalada para cubrir los períodos de consumo peak sin lugar a dudas es menos eficiente que almacenar energía en períodos con sobregeneración para ser usada en períodos de mayor demanda. Sin embargo, como se indicó en la sección anterior, el almacenamiento de energía es económico cuando el costo marginal de la electricidad varía más que los costos de almacenar y recuperar la energía, más el precio de la energía perdida en el proceso.

El desafío actual al respecto, entonces, es avanzar en el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía cada vez más sencillas, económicas y efectivas.

Por otra parte, la plena satisfacción de nuestras necesidades energéticas actuales y futuras es condición necesaria para el desarrollo sustentable de nuestra sociedad. En tal sentido, la crisis energética y medioambiental que vivimos nos obliga a diversificar nuestra matriz energética, incorporando fuentes autóctonas y renovables, superando el problema de la intermitencia en su generación.

En nuestra opinión, los dos desafíos planteados (eficiencia y sustentabilidad) no pueden ser satisfechos por cualquier tecnología de almacenamiento. Creemos que uno de los avances técnicos clave que hace esta perspectiva factible es el almacenamiento en forma de hidrógeno de la energía producida por fuentes alternativas.

A la fecha, este proceso es muy caro porque requiere de mucha energía y presenta ciertas complicaciones técnicas. Cerca de 50 kWh (180 MJ) son requeridas para producir un kilogramo de hidrógeno por electrólisis, así que el coste de la electricidad es claramente crucial. Otros costos incluirían la planta del electrolisis, los compresores o la licuefacción del hidrógeno, el almacenamiento y el transporte, que serán significativos.

Sin embargo, la producción de hidrógeno con los excedentes de energía renovable es una solución sustentable, por ejemplo, a través del almacenamiento de energía eólica. En efecto, los aerogeneradores producen energía las 24 horas, de forma variable y en general desfasados con la demanda, por lo que se puede aprovechar la generación en horas valle para producir hidrógeno y así almacenar energía. Con el desarrollo de esta nueva tecnología, se aprovecharía plenamente el potencial y la inversión en los parques eólicos y se fortalecería su aporte en términos de la generación total de energía. De esta forma, se estaría disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles y los niveles de contaminación por las emisiones de dióxido de carbono, contribuyendo a sentar las bases para el desarrollo sustentable.

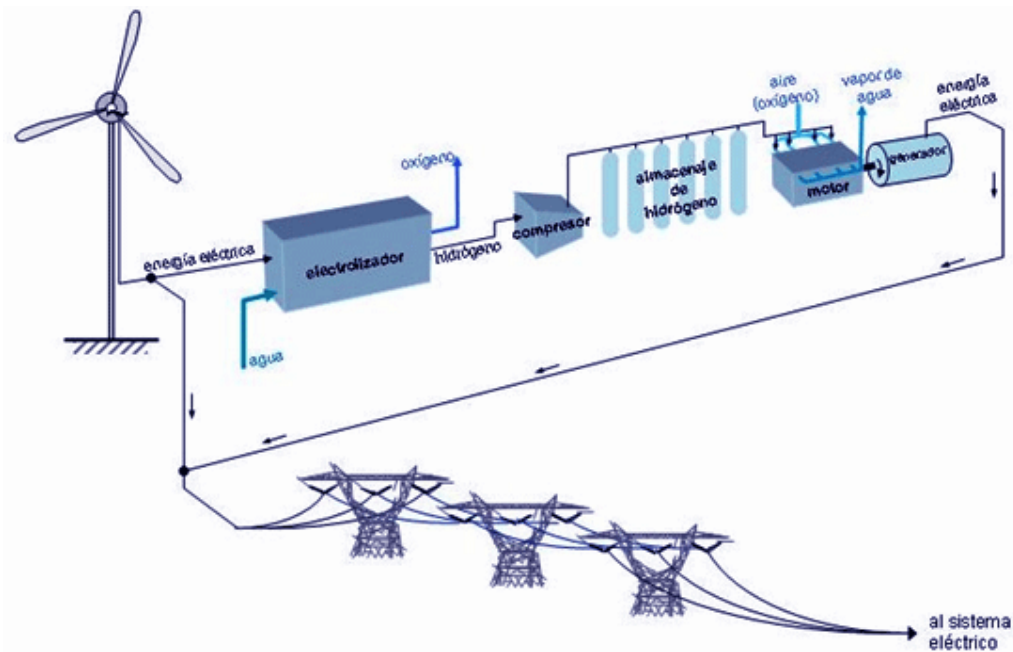


Figura 13: Funcionamiento del almacenamiento de energía eólica

Como reflexión final, destacar que la relevancia de un sistema de almacenamiento económicamente eficiente puede ser radical para nuestra sociedad. La existencia de una tecnología factible y económica de almacenamiento de energía en hidrógeno, fomentaría la producción local y doméstica de energía a través de medios alternativos. Esta masificación forzaría al sistema de distribución a desarrollar tecnologías de doble flujo, hacia y desde los consumidores, que se transformarían en “prosumers”¹ conectados en una red comercial de intercambio de energía local conforme a un sistema autorregulado de reasignación según los peaks de demanda.

Como señaló Refkin, con un sistema de almacenaje en hidrógeno, la producción masiva de energía renovable y una red de transmisión de doble flujo, enfrentamos lo que algunos han denominado “La Tercera Revolución Industrial”.

¹ Prosumer: producir + consumer.



Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Magíster en Ingeniería de la Energía
IEN 3320 Mercados Energéticos

Referencias

- Kirschen, D. *et al.*, Fundamentals of Power System Economics. Wiley, 2004.
- Rifkin, J., Leading the Way to the Third Industrial Revolution: A New Energy Agenda for the European Union in the 21st Century. Rome, 2008.
- Robinson, A., Energy Storage (I) Using Electricity More Efficiently. Science Magazine (AAAS), 1974.
- Robinson, A., Energy Storage (II) Developing Advanced Technologies. Science Magazine (AAAS), 1974.
- Schaber, C. *et al.*, Utility-Scale Storage of Renewable Energy. The Electricity Journal (Elsevier), 2004.
- Sørensen, B., Dependability of Wind Energy Generators with Short-Term Energy Storage. Science Magazine (AAAS), 1976.
- Sørensen, B., Renewable Energy: Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspect. Elsevier Science, 2004.
- Tester, J. *et al.*, Sustainable Energy: Choosing Among Options. MIT Press, 2005.

Sitios web:

- www.eere.energy.gov/de/energy_storage.html
- www.maxwell.com/ultracapacitors/
- www.nrel.gov/hydrogen/
- www.sandia.gov/Renewable_Energy/solarthermal/NSTTF/salt.htm