

Almacenamiento de energía en infraestructuras eólicas para la optimización del sistema eléctrico

Manuel Ramírez Velasco

Energy storage in wind power infrastructure for electrical system optimisation

RESUMEN

El gran problema al que se enfrentan los sistemas de suministro energético es la dificultad de almacenar energía durante los periodos de baja demanda para, más tarde, poder utilizarla en los picos de demanda. Este problema es especialmente relevante en las energías renovables. Para que las energías renovables constituyan una alternativa realista a las energías consumibles se deben superar los problemas de suministro energético y de almacenamiento. Como opciones tecnológicas para el almacenamiento del recurso eólico, la utilización del aire comprimido es el sistema que mejor se adapta a su variabilidad. Una de las grandes ventajas de almacenar energía mediante compresión de aire es la posibilidad de almacenar el aire comprimido durante largos periodos de tiempo, a diferencia de las baterías de plomo o de litio, que necesitan, en general, realizar descargas diarias o semanales.

Recibido: 5 de octubre de 2010
Aceptado: 2 de noviembre de 2010

Palabras clave

Energía, energía eólica, sistema eléctrico, coche eléctrico, almacenamiento de energía

ABSTRACT

The big problem facing energy supply systems is the difficulty of storing energy during periods of low demand so that it can then be used during peak demand. This problem is especially relevant in renewable energy. For renewable energy to constitute a realistic alternative, the problems of energy supply and storage must be overcome. In terms of storage technology options for wind power resources, the use of compressed air is the system that best suits its variability. One of the great advantages of storing energy by compressing air is the possibility to store compressed air for long periods of time, unlike lead-acid batteries or lithium batteries which, in general, require daily or weekly discharge.

Received: October 5, 2010
Accepted: November 2, 2010

Keywords

Energy, wind energy, electrical system, electric car, energy storage



Foto: Pictelia

Hoy en día, la crisis energética mundial originada por la escasez y el elevado coste de los combustibles fósiles o no renovables, como los problemas de contaminación ambiental que estos combustibles generan, ha obligado a la utilización de fuentes de energía renovable que ayuden a superar esta crisis y disminuyan los efectos de contaminación.

Dentro de la gran variedad de generadores de energía eléctrica con recursos renovables, los generadores de energía eólica y solar fotovoltaica son los que, en la actualidad, presentan un mayor avance y desarrollo tecnológico.

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 casi sin almacenamiento, la utilización de formas sencillas, económicas y efectivas de guardar electricidad contribuiría 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.

Si se pretende que las energías renovables constituyan una alternativa realista a las energías consumibles, deben

superar sus problemas de suministro energético y poder almacenar energía durante los periodos de baja demanda (horas valle) para poder utilizar esta energía durante los picos de demanda.

Curva de demanda eléctrica. Optimización de la infraestructura eléctrica

La curva de carga o de demanda de energía eléctrica en España tiene las siguientes características:

- Horas de menor consumo: noche y primeras horas de la madrugada. Estas horas son las denominadas horas valle.

- Puntos de consumo de mayor demanda a las 12.00, 16.00 y 20.00 horas. Estas horas son los denominados picos de demanda.

- En la curva de demanda semanal se denota que hay diferencia de consumo de un día laboral o festivo y que, además, los factores climatológicos producen una modificación en los hábitos de consumo de los usuarios, esto es, hay diferencias entre la curva de demanda en verano e invierno.

Debido a las variaciones de consumo horario diario anteriormente comentadas, la curva de demanda diaria, como se verá a continuación, tiene grandes diferencias entre los consumos en los picos

de demanda y las horas valle. Por tanto, la eficiencia de la infraestructura eléctrica española no es la óptima, es decir, se puede mejorar tanto más se aplane la curva.

Para justificar esta afirmación, nos vamos a basar en la curva de carga del día en el que más potencia eléctrica se demandó en el año 2009 (13 de enero, figura 1).

A la vista de la gráfica de la figura 1, se puede estimar que el aprovechamiento o la eficiencia del sistema para ese día es del 77%; hay, pues, un 23% de la capacidad del sistema sin utilizar.

Una de las soluciones para aumentar la eficacia del sistema es la gestión de la demanda. Sin embargo, frente a la dificultad de conseguir todos los datos necesarios, en general, se suelen introducir nuevas demandas de manera que permitan suavizar la curva de demanda. En la España peninsular, se dan dos elementos muy importantes: la limitada capacidad de bombeo, que supone la alternativa óptima de almacenamiento nocturno, y las dificultades de colocar excedentes de generación en los sistemas eléctricos de los países vecinos. Ante esto, en España se apuesta por dos opciones:

1. La apuesta por los vehículos eléctricos es, por tanto, una alternativa con un claro potencial. Es importante tener

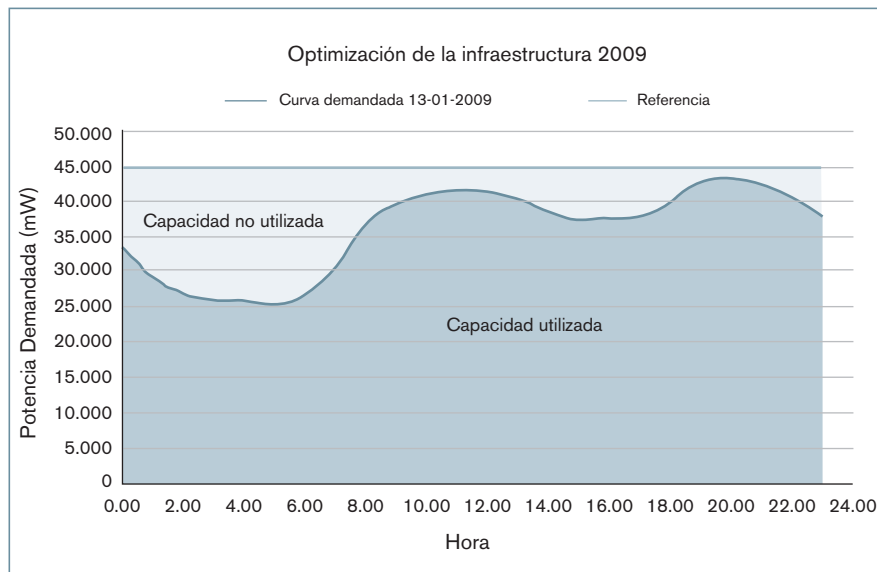


Figura 1. Eficacia del sistema el 13-1-2009.

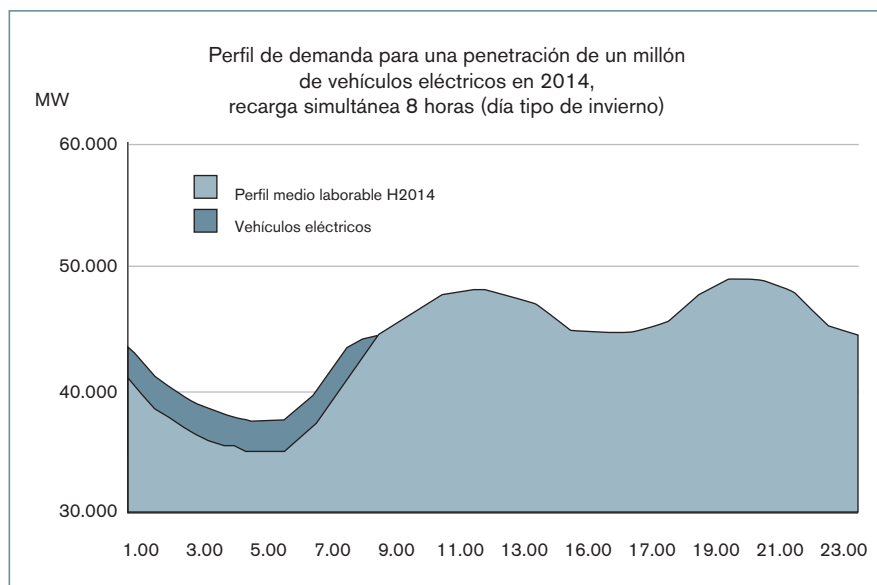


Figura 2. Curva de demanda eléctrica con vehículo eléctrico.

Figura 3. Conexión del coche eléctrico a la red.



en cuenta que el incremento de la demanda con vehículos eléctricos obligará a una mayor contribución e integración por parte de las renovables, lo que una vez más redundará en la necesidad de dotar de una mayor flexibilidad la operación del sistema con esta y otras soluciones. Los vehículos eléctricos permitirán, inicialmente, incorporar nuevas cargas en horas de baja demanda y, posteriormente, modular cargas en diferentes periodos.

Un vehículo eléctrico medio consume alrededor de 14 kWh por cada 100 km; un coche que recorra unos 15.000 km al año consumiría 2.100 kWh, equiparable al consumo doméstico medio. Evidentemente, el cuello de botella está en la capacidad de carga de las propias baterías, aunque, en principio, parece viable la carga de unos 5-7 kWh durante la noche en un enchufe casero, lo cual sería suficiente para el recorrido que va a realizar un vehículo durante el día.

Se estima que en el año 2014, el impacto en el sistema eléctrico de una hipotética implantación de un millón de coches eléctricos (aproximadamente, el 6,5% del actual parque automovilístico en España) sería aumentar la demanda de energía en 3.500 GWh al año.

En la figura 2 se observa cómo cambiaría la curva de demanda con el consumo adicional que supondría la recarga de dos millones de coches eléctricos. Si suponemos que la carga del vehículo se produce uniformemente durante siete horas y que durante la noche tienen menos consumo, el incremento en la demanda sería de unos 2.000 MW en cada una de esas 7 horas, suponiendo que cada batería se recargara con 7 kWh (energía suficiente para recorrer 70 km).

Sin embargo, la operación podría ser mucho más flexible con la utilización de sistemas inteligentes que siguieran la evolución demanda general del sistema.

La carga durante las horas de la tarde podría hacerse en los aparcamientos de los edificios de oficinas donde se ubican los vehículos, pero aquí aparece uno de los temas fundamentales de futuro: la capacidad de las propias redes, sobre todo de distribución, que en algunos casos podrían duplicar las cargas inicialmente previstas.

También existiría incluso la opción de suministrar energía a la red entre las 20.00 y las 23.00 horas, que es cuando se suele producir el mayor pico de demanda, en el punto de recarga eléctrica instalado en los garajes de las casas.

2. Otra opción para suavizar la curva de demanda y aumentar la eficacia del

sistema es la utilización de sistemas de almacenamiento de energía. Pueden trabajar de la misma manera que el coche eléctrico, es decir, pueden cargarse en horas nocturnas (horas valle) y generar parte de la energía almacenada entre las 14.00 y las 22.00 horas.

Necesidad de acumulación de energía en sistemas de suministro con fuentes renovables. Problemática de la energía eólica

El gran problema al que se enfrentan los sistemas de suministro energético es la dificultad (y el coste económico) de almacenar energía durante los periodos de baja demanda para poder utilizarla durante los picos de demanda. Esto es particularmente relevante desde el punto de vista de las energías renovables, si se pretende que constituyan una alternativa realista a las energías consumibles. En efecto, es muy difícil que la producción de energía se adecue perfectamente a la necesidad o demanda por parte de los consumidores (variabilidad del recurso eólico, no hay solar durante la noche). Por tanto, es primordial poder almacenar el excedente de energía eléctrico producido. En general, en la actualidad, se utilizan baterías de plomo para realizar esta tarea.

El caso eólico es fiel reflejo de las anteriores reflexiones. Cuando se utiliza el viento (recurso limpio, autóctono e inagotable) como fuente primaria de energía, si bien no existen costos de combustibles y se tiene un bajo impacto ambiental, se presenta el problema de la aleatoriedad de este recurso. La generación eólica no se considera segura (tiene un carácter no gestionable) en el momento de realizar los cálculos de planificación de la operación del sistema de potencia.

Antes de la instalación de grandes parques eólicos, se realizan estudios estadísticos para determinar valores medios de velocidad y dirección principal del viento. Estos valores medios son útiles para determinar la factibilidad técnico-económica del proyecto y, posteriormente, para realizar la planificación de la operación del sistema a largo plazo. Sin embargo, para la planificación de la operación a corto plazo, estos valores no pueden ser utilizados. Una determinación de valores medios en muy corto plazo, dado la elevada tasa de variación del viento no garantizaría tampoco la disponibilidad del recurso.

Anexamente a este problema, se presenta la problemática de la incapacidad

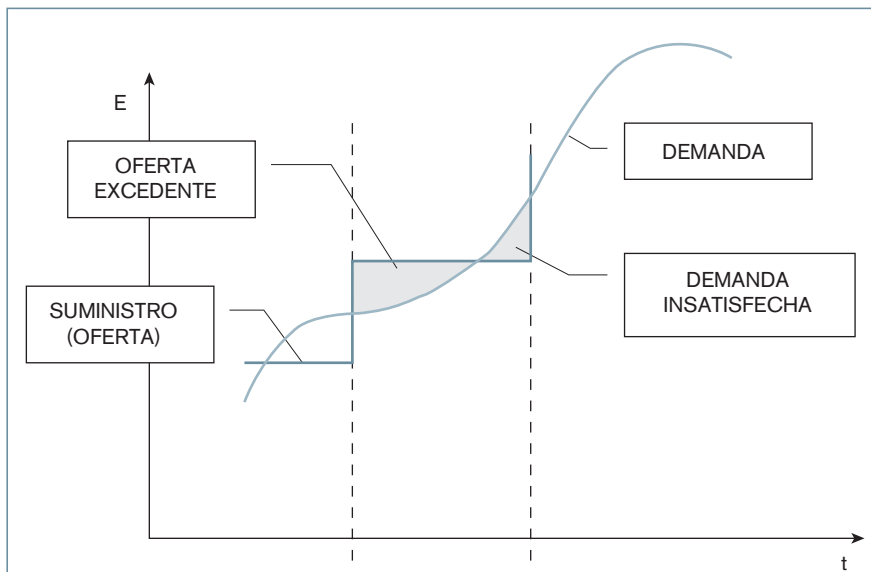


Figura 4. Curva de oferta-demanda.

de almacenar y transportar esta fuente de energía en las situaciones de desequilibrio entre oferta y demanda. Se produce energía eléctrica cuando el sistema o los operadores del sistema puedan no requerir de la misma, es decir, habrá situaciones en las que la producción eléctrica sea superior a la demanda, y otras en las que ocurra lo contrario (figura 4). Esta energía se suele desaprovechar y se presenta como una de las mayores preocupaciones de las asociaciones del sector y del gestor del sistema.

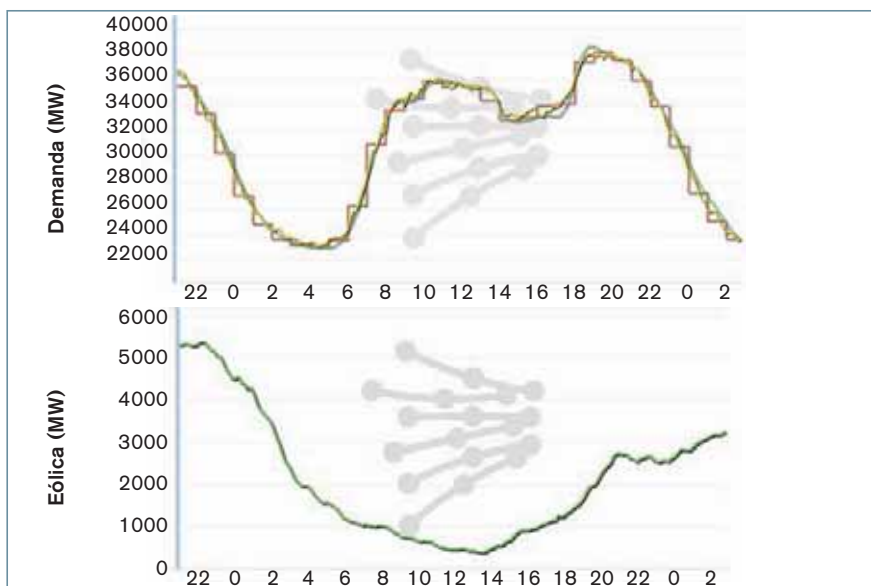
Como una de las soluciones a la imprevisibilidad de la energía generada por medios de unidades eólicas se presenta la utilización de medios de almacenamiento de energía o ESS (*energy storage systems*).

En el contexto del mercado eléctrico, los principales objetivos del almacenamiento de energía son:

- Aumentar la eficiencia de los sistemas eléctricos, al reducir la necesidad de centrales de generación de respaldo.
- Aumentar la confiabilidad de los sistemas eléctricos, al evitar los costos de interrupción del suministro.
- Aumentar la disponibilidad de fuentes renovables (solar, eólica).
- Aumentar el factor de utilización en las plantas de generación renovables.

Otra razón que justifica el almacenamiento de energía generada mediante energía eólica es la no coincidencia de la máxima demanda con la máxima generación de eólica, es decir, las horas pico

Figura 5. Curva de demanda eléctrica-generación eólica.



de demanda no son las mismas que las horas pico de generación, tal como se observa en la figura 5.

Esta gráfica corresponde al 11 de noviembre de 2008, cuando en las horas de máxima demanda, la generación eólica fue la más baja de todo el día. Asimismo, se puede ver como la generación eólica disminuye de 5.000 MW a 500 MW en 10 horas.

Si se disponen de sistemas de almacenamiento de energía, se puede incrementar la aportación por parte de la eólica en estas horas pico.

Principales sistemas de almacenamiento de energía

Las técnicas de almacenamiento de energía pueden ser clasificadas en función de diferentes criterios:

- Del tipo de aplicación: permanente o portable.
- Duración del almacenamiento: cortos o largos periodos.
- La potencia máxima demandada.

Por tanto, es necesario analizar las características fundamentales de los sistemas de almacenamiento con el objeto de establecer criterios para seleccionar la mejor tecnología. La elección del tipo de almacenamiento se basa en los siguientes criterios: tiempo de almacenamiento, potencia disponible, grado de descarga, tiempo de descarga, localización, ciclos de vida útil, rendimiento, autonomía, costes, densidad de energía volumétrica (kJ/m^3).

El almacenamiento de energía eléctrica se puede conseguir de forma eficaz. Para ello, la energía eléctrica debe ser almacenada como otra forma de energía y cuando se demande, se volverá a transformar en energía eléctrica.

Centrales de bombeo

Su principio de funcionamiento es bien conocido: durante los periodos en los que la demanda es baja, estas centrales utilizan la electricidad sobrante para bombear el agua desde el depósito inferior hacia el depósito superior (figura 6). Cuando la demanda es muy elevada, el agua sale del depósito superior y activa las turbinas para generar energía eléctrica en horas pico.

Las centrales de bombeo hidroeléctricas tienen grado de eficacia de entre el 65% y el 80%. En general, se puede afirmar que, considerando el rendimiento del ciclo, se necesitan 4 MWh para generar tres.

Almacenamiento de energía mediante pilas de combustible de hidrógeno

Las pilas de combustible (figura 7) son un medio de restablecer la energía gastada para producir hidrógeno mediante electrólisis del agua. La oxidación-reducción entre el hidrógeno y el oxígeno es una reacción simple que se produce dentro de una estructura formada por dos electrodos (ánodo-cátodo) separados por un electrolito.

Almacenamiento químico: baterías

Es un sistema bien conocido por todos; el almacenamiento químico se lleva a cabo a través de acumuladores (figura 8). Estos sistemas tienen la doble finalidad de almacenar y liberar electricidad alternando fases de carga y descarga. Estos acumuladores pueden transformar la energía química generada mediante reacciones electroquímicas en energía eléctrica y viceversa, sin emisiones contaminantes y ruidos y, además, requiere poco mantenimiento.

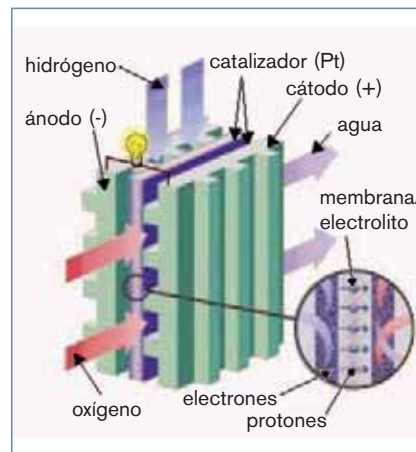


Figura 7. Pila de combustible.



Figura 8. Baterías.

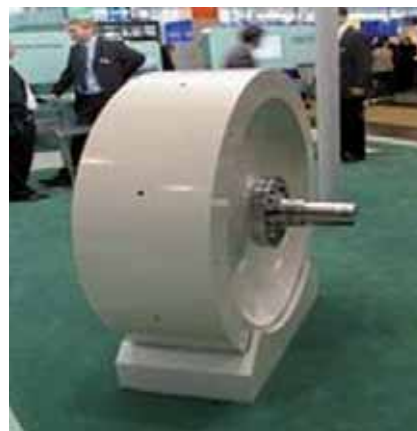
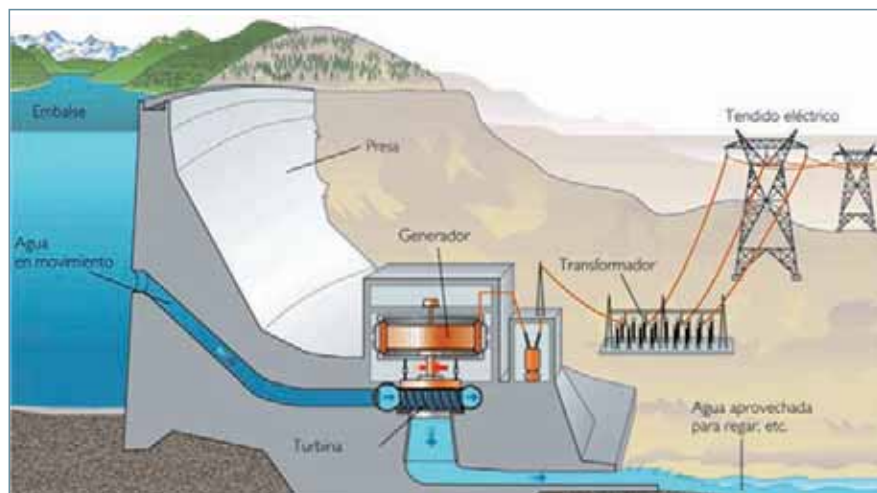


Figura 9. Volante de inercia.

Figura 6. Almacenamiento de energía en un parque eólico mediante centrales de bombeo.



Almacenamiento de energía mecánica (volante de inercia)

Los acumuladores de energía mediante volante de inercia (figura 9) están compuestos de un volante de inercia acoplado (normalmente con bridas magnéticas) al eje de un generador.

Almacenamiento de energía en supercondensadores

El almacenamiento de energía en supercondensadores (figura 10) se realiza en forma de campo eléctrico entre dos electrodos. Es el mismo principio que los condensadores excepto que el material



Figura 10. Supercondensadores.

aislante es reemplazado por un electrolito conductor.

La energía obtenida es superior a la obtenida en condensadores (aproximadamente, en 15 Wh/kg). Del mismo modo, su coste también es más elevado, pero tiene una mejor capacidad de descarga debido al lento desplazamiento de los iones en el electrolito.

Almacenamiento de energía por aire comprimido (CAES)

Este sistema de almacenamiento (figura 11) se lleva a cabo a alta presión (40-70 bares) y a temperaturas cercanas a la ambiente. Esto conlleva depósitos con menor volumen. Un gran número de estudios realizados han concluido que el aire debe ser comprimido y almacenado en el subsuelo y en tuberías altamente presurizadas (20-100 bares).

Una planta de generación de energía con una turbina de gas utiliza dos tercios de la potencia disponible para comprimir el aire de la combustión. Mediante este sistema, se consigue separar el proceso en varias fases para utilizar la energía para comprimir el aire (durante horas valle-horas de almacenamiento) y, posteriormente, se produce, durante las horas pico (de demanda), tres veces la potencia para el mismo consumo de combustible expandiendo el aire en una cámara de combustión antes de introducir el aire en las turbinas. El calor residual se recupera del humo y se usa para calentar el aire.

La densidad de energía para este tipo de sistemas está alrededor de 12 kW/m³ y el rendimiento estimado se sitúa en torno al 70%.

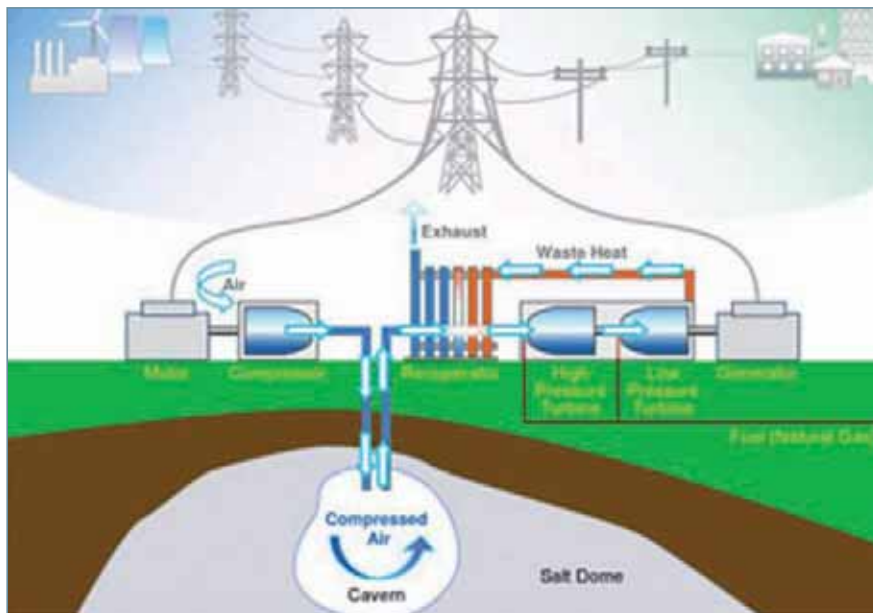
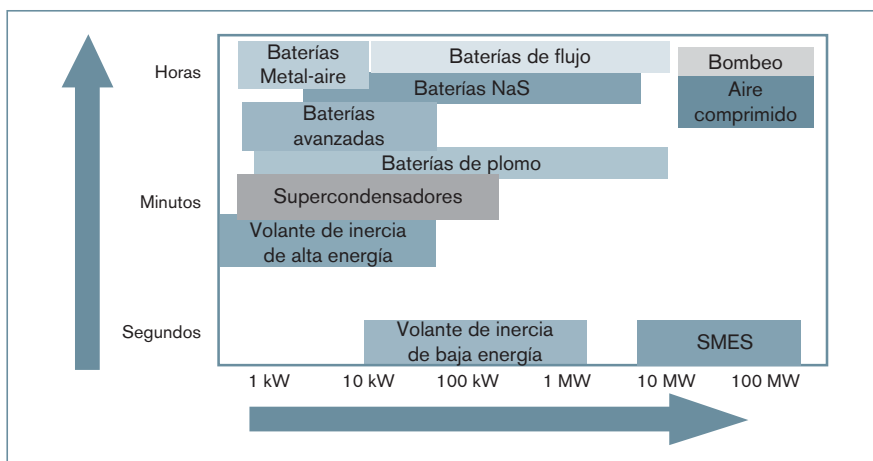


Figura 11. Almacenamiento de energía por aire comprimido.

Figura 12. Tabla comparativa.



Comparativa

A la vista de la comparativa de la figura 12, se pueden obtener varias conclusiones en función de varios parámetros:

1. Energía generada: tanto los sistemas de almacenamiento de energía basados en centrales de bombeo como en compresión de aire (CAES) son idóneos para gran escala (varias decenas de GWh). En rangos medios se sitúan los volantes de inercia, baterías y superconductores magnéticos. En el extremo inferior, supercondensadores y plantas de almacenamiento térmico (entre 10 y 100 GWh).
2. Potencia instalada: se puede hacer una clasificación similar a la del punto anterior.
3. Eficacia de los sistemas: Los sistemas que obtienen una eficacia mayor (alrededor del 90%) son los de volante de inercia, supercondensadores, supercon-

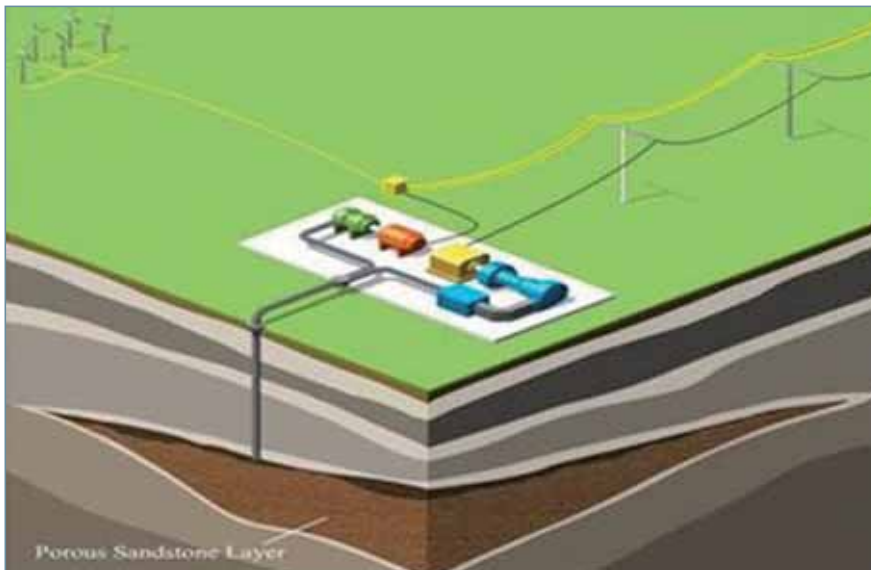


Figura 13. Instalación del Iowa Storage Energy Park (EE UU).

ductores magnéticos y almacenamiento térmico. En un rango medio se sitúan el resto de sistemas (alrededor del 70%)

4. Tiempo de carga-descarga: parámetro fundamental. Los sistemas más rápidos son los supercondensadores (su unidad de medida son los segundos). A continuación, se sitúan los volantes de inercia (minutos), seguidos de los superconductores magnéticos (desde minutos hasta horas). En el extremo inferior se colocan el resto de sistemas (horas).

5. Ciclo de vida: todos los sistemas soportan un elevado número de ciclos, más de 10.000 (100.000 ciclos para los supercondensadores). La excepción son las baterías que tienen una duración máxima de 2.000 ciclos.

6. Necesidades físicas de la ubicación y tamaño de la instalación: en general, este parámetro es decisivo para adoptar un sistema u otro. El sistema CAES es el que más inconvenientes de localización presenta, ya que es necesaria la presencia de cuevas o cavernas subterráneas donde se realiza la compresión del aire.

¿Cuál es el sistema de almacenamiento que mejor se adapta a las energías renovables?

Los sistemas de almacenamiento de energía mediante compresión de aire CAES son la principal solución para las energías renovables. Para estas energías, el tiempo de almacenamiento necesario puede ser de horas, días o incluso meses y estos sistemas permiten esta aplicabilidad. Además, es una tecnología madura y en la actualidad existen varios proyectos en marcha: Huntorf (Alemania), McIntosh (EE UU). Las esperanzas están

puestas en el Iowa Storage Energy Park (Iowa, EE UU), un proyecto estadounidense en marcha que cuenta con el respaldo tecnológico de Sandia National Laboratories (figura 13).

Con la energía proporcionada por los aerogeneradores, se comprimirá y guardará aire en un acuífero situado a 1.000 metros de profundidad en el centro del estado de Iowa, usado hasta ahora para atesorar gas natural. Se espera que en 2011 el futuro parque eólico, cuya construcción costará unos 130 millones de euros, suministre 270 MW 16 horas al día. En esta instalación, cuando no se necesita generar electricidad, el aire se almacena en una formación geológica subterránea profunda para su uso posterior en la generación de electricidad.

La electricidad que produce se puede utilizar cuando sea necesario, especialmente durante las horas pico de alta demanda. Este proceso utiliza menos combustible que una instalación convencional de combustión de la turbina.

A pesar de todo esto, el aire comprimido tiene algunos inconvenientes que hacen que su uso sea limitado. Por ejemplo:

- Tienen unos requisitos de ubicación muy restrictivos, ya que deben ser grandes extensiones de terreno y, además, hay que disponer de cuevas para almacenar el aire comprimido.
- Elevado tiempo de respuesta: se puede hablar de minutos, incluso horas, es decir, tienen poca flexibilidad ante una demanda.
- Problemas de fugas y fricción debido a la naturaleza gaseosa del aire.
- Moderado rendimiento (alrededor del 70%).

e. Las ratios de presión y de eficiencia en los sistemas de conversión neumáticos son bajas.

Por tanto, la mayoría de investigaciones están orientadas a superar estas limitaciones. Para reducir el tamaño de estas instalaciones se están realizando prototipos (pronto saldrán al mercado) que hibridan los sistemas de conversión neumático con los hidráulicos, dando lugar a los sistemas hidroneumáticos (se consiguen grandes ratios de presión con dispositivos de pequeño tamaño). Del mismo modo, para mejorar el rendimiento y disminuir el tiempo de respuesta, se ha conseguido unir los sistemas hidroneumáticos con los supercondensadores. Estos nuevos dispositivos van encaminados a integrarse en los sistemas de generación minieólica en entornos urbanos formando parte de la generación distribuida.

Mediante la aprobación de la Ley de Economía Sostenible (redactada por el Ministerio de Industria y Energía de España y aprobada por el Consejo de Ministros el 19 de marzo de 2010), parece asegurado que el futuro de los sistemas eléctricos está en la generación distribuida y la *smart grid*. El Gobierno español eliminará las barreras tecnológicas, económicas y administrativas para conseguir la integración de la generación distribuida en el sistema eléctrico.

Bibliografía

- Ramírez Velasco, M (2010). Proyecto Fin de Carrera. *Sistema de apoyo a infraestructuras eólicas mediante almacenamiento de energía por compresión de fluido*. UPCO.
- Operador del Mercado Ibérico de Energía OMEL. *Informe anual 2009*. 2010.
- Ceña, A (2009). *El coche eléctrico*.
- Lemofouet Gatsi, S (2006). *Investigation and optimization of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors*. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Tesis doctoral.
- Solé, C (2009). *Descripción del sistema y mercado eléctrico español*. Cursos de verano de la Universidad Complutense.
- Asociación Empresarial Eólica. *Anuario de la Energía Eólica*.
- Penacho, J (2009). *Introducción al mercado de la electricidad: presente y futuro*. Asociación de Empresas con GRan consumo de Energía, AEGE.
- Merino Azcárraga, J M (2005). *Energías renovables: integración en el sistema eléctrico*.

Manuel Ramírez Velasco

mramirezcai@hotmail.com

Ingeniero industrial por la Universidad Europea de Madrid e ingeniero técnico industrial, especialidad en mecánica, por la Universidad Pontificia Comillas ICAI.