

# ENERGÍA EÓLICA E HIDRÓGENO, UNA SIMBIOSIS ANTICIPADA

WIND ENERGY AND HYDROGEN, A PREVIOUS SYMBIOSIS ANNOUNCED

Recibido: 26/02/08

Aceptado: 10/03/08

## Ismael Aso Aguarta

Ingeniero Industrial Superior  
Universidad de Zaragoza  
Master Europeo en Energías  
Renovables

Fundación para el Desarrollo  
de las Nuevas Tecnologías del  
Hidrógeno en Aragón.(España)

## Luis Correas Usón

Doctor Ingeniero Industrial  
Universidad de Zaragoza  
Fundación para el Desarrollo  
de las Nuevas Tecnologías  
del Hidrógeno en Aragón.  
(España)

## Ernest Burkhalter

Ingeniero Mecánico  
Universidad de Zurich  
IHT Industrie Heute  
Technology (Suiza)

## RESUMEN

A estas alturas, nadie puede discutir la necesidad de utilización de fuentes de energías renovables como alternativa a los combustibles fósiles, con el fin de mitigar entre otros efectos, el impacto que conlleva la utilización de estos últimos en la atmósfera terrestre.

Pero las energías renovables se caracterizan por una propiedad intrínseca que hay que tener en cuenta: se dispone de ellas únicamente en el momento en el que existe el recurso que actúa como fuente primaria, es

decir, los “molinos” producen electricidad cuando hay viento ó las huertas fotovoltaicas cuando hay sol, y que cuando este recurso no se encuentra disponible (viento/sol), ello conlleva a una producción energética nula, de ahí el adjetivo asociado a las energías renovables de “no gestionables”.

**España** es un país puntero a nivel internacional en energías renovables, destacando de forma notable en el campo de la energía eólica. Ello ha causado la existencia de muchos parques eólicos distribuidos a lo largo y

lo ancho de toda la península, pero el propio carácter de *no gestionable* está conllevando a la búsqueda de sistemas de almacenamiento energético intermedios, con el fin de poder llegar a prescindir al 100 % de las fuentes primarias basadas en combustible fósiles. Entre todos los sistemas de almacenamiento energético para las energías renovables, el hidrógeno es un candidato firme.

**Palabras Clave:** Energías Renovables, Hidrogeno, Energía Eólica, Electrólisis.

**ABSTRACT**

*Nowadays, renewable energies are taken an important role into electricity generation, in order to mitigate the CO<sub>2</sub> emissions, which are producing the Climate Change. Spain, is a special case where wind energy has been developed for several years, so the percentage wind energy producing is really high, but as a renewable energy, this energy is only available when primary resources exist, in this case the wind, and in cases in which it does not exit, production is reduced drastically, so, it is necessary to develop energy storage systems, in order to increase the amount wind energy introduce into the electrical system, in order to be able to control the production. One storage method proposed is produce hydrogen, in order to be use later when the resources are not available, to produce energy.*

**Key Words:** Renewable Energies, Hydrogen Wind Energy, Electrolysis.

**SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL, EL FIN DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES**

Hay multitud de artículos que se han escrito sobre previsiones de las reservas de petróleo, y a veces entre sí son muy dispares en cuanto a las fechas pronosticadas, pero todos tienen un punto en común al afirmar que, más pronto que tarde, estos se van a agotar, y en un plazo de tiempo que no va más lejos de dos generaciones.

Por dar algunas fechas orientativas [1] las reservas probadas de petróleo darían para mantener el ritmo actual de consumo para 41 años, en el caso del gas natural para 64 años. Y no hay que haber cursado una carrera universitaria para darse cuenta que se están dando unos plazos temporales muy cortos, en comparativa con la historia de lo que llamamos como planeta Tierra.

Como solución a esta situación energética tan delicada han resurgido con fuerza las energías renovables, es decir, fuentes de energía que directamente o indirectamente vienen

de la energía que nos llega del sol, y que la transforman libre de emisiones de CO<sub>2</sub> para su utilización. Ejemplo de éstas son, entre otras, la energía eólica, la fotovoltaica, la solar termoeléctrica, la biomasa, la hidráulica, etc.

Pero todas estas fuentes de energía que dependen indirectamente o directamente del sol, tienen una propiedad intrínseca que las caracteriza, como es el que su disponibilidad está condicionada a que se disponga en ese momento del recurso renovable del que deriva, por ejemplo, la energía eólica de que exista viento, la energía fotovoltaica de que exista irradiación solar, etc.

Por ello, si se está pensando en pasar de una sociedad que basa buena parte de su desarrollo en recursos fósiles, a otra sociedad basada 100 % en fuentes de energía renovables, ha de existir un sistema de almacenamiento intermedio de energía, para poder cubrir las demandas energéticas en los momentos en los que no existe recurso renovable.

**SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA**

Existen multitud de sistemas de almacenamiento de energía que se pueden utilizar con las energías reno-

vables como:

- En forma de campos magnéticos (superconductores).
- En forma de energía cinética (volantes de inercia).
- En forma de energía electroquímica (pilas, baterías electroquímicas y pilas regenerativas).
- En forma de energía potencial (centrales de bombeo hidráulicas, aire comprimido).
- En forma de energía electrostática (súper condensadores).
- En forma de energía química: Producción de hidrógeno

Con el fin de poder hacer una comparativa para distinguir la aplicabilidad de cada una de ellas a cada caso particular se muestra la figura siguiente, en función de la capacidad de almacenamiento en términos de potencia, y en términos de tiempo para cada uno de los sistemas de almacenamiento de energía comentados anteriormente.

Si realizamos una agrupación en función de la escala de tiempos, se obtiene la siguiente clasificación:

1. Almacenamiento en el rango de los milisegundos (aplicable a mejorar la calidad de la red eléctrica): Súper condensadores, volantes de inercia, baterías, centrales de bombeo, mini

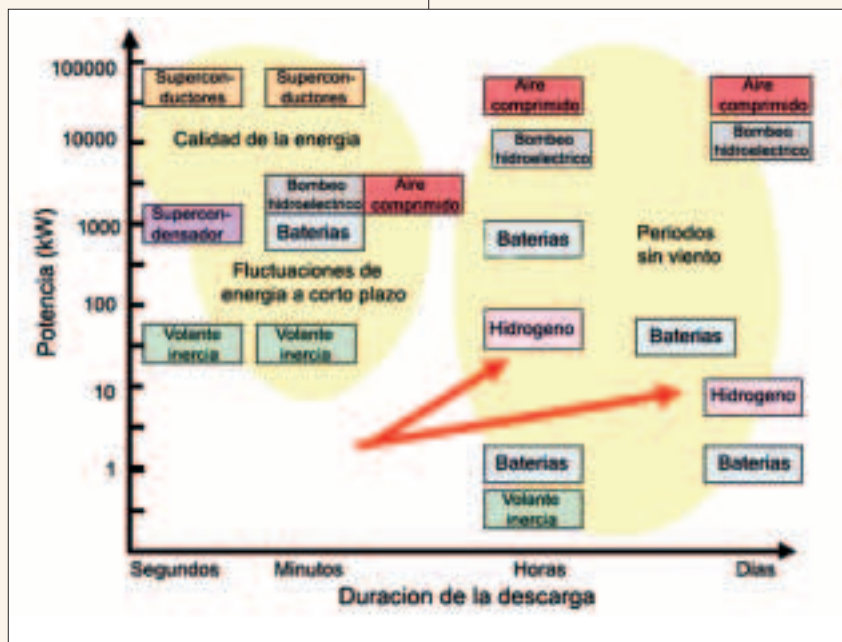


Ilustración 1 – Comparativa Sistemas Almacenamiento Energético

Sistema de almacenamiento	Tecnología	€/kW	€/kWh	Rango Tiempos	Eficiencia
<i>Orden de Milisegundos: Calidad de red</i>					
Superconductores	Baja temperatura	300	72.000	seg	0,95
	Alta temperatura	300	500-2000	seg	0,95
Volantes de inercia	Baja velocidad	280	300	seg	0,9
Baterías	Ácido	175	100-200	seg	0,85
Hidráulica	Presurización Nitrógeno	300	200	seg	0,7
Aire comprimido	25-50 MW	400	¿oct-20?	seg	0,5-0,7
Ultra condensadores	> 2 MW	300	82.000	seg	0,95
<i>Orden de los segundos : Mitigación de Turbulencia eólica</i>					
Volantes de inercia	Acople generador (500 kW)	100	125	pocos minutos	0,95
	Alta velocidad (500 kW)	25.000	350	Pocos minutos - 1 h	0,93
Baterías	Ácido (1-4 MW)	175	200	Pocos minutos - 1 h	0,85
	Níquel-Cadmio (1-10 MW)	245	300	Pocos minutos - 1 h	0,7
Hidráulica	Presurización Nitrógeno	300	200	Pocos minutos - 1 h	0,65
Aire comprimido	25 - 50 MW	400	oct-20	Pocos minutos - 1 h	0,5-0,7
<i>Fluctuaciones locales en el rango de minutos</i>					
Baterías	Ácido (1-4 MW)	175	200	Más de 10 h	0,85
	Nickel-Cadmio (1-10 MW)	245	300	Más de 10 h	0,7
Pilas Regenerativas	1-100 MW	175	200	Más de 10 h	0,7
Hidrógeno (EZ+FC)	PEM/AFC (100 kW)	500-20.000	50-300	Más de 10 h	0,4
Aire comprimido	Pequeño módulo	575	2	Más de 10 h	0,79
Minihidráulica	10 kW-50 MW	2.000-4000	may-15	Más de 10 h	0,87
<i>Fluctuaciones horaria incluso estacionales</i>					
Baterías	Ácido (1-4 MW)	175	200	superior a 1 día	0,85
Hidrógeno (EZ+FC)	AFC-SOFC -PEM	500-10.000	15-200	superior a 1 día	0,59
Aire comprimido	(110 -220 MW)	4150	1	superior a 1 día	0,79
Bombeo	Convencional	1100	10	superior a 1 día	0,87
	Enterrada roca	1200	50	superior a 1 día	0,87

Tabla 1- Comparativa Sistemas de Almacenamiento (Elaboración propia)

compresores de aire y superconductores.

2. *Almacenamiento en el rango de segundos* (aplicable a eliminar fluctuaciones de energía a corto plazo): Volantes de inercia, baterías, centrales de bombeo, mini compresores de aire.

3. *Almacenamiento en el rango de los minutos* (aplicable a eliminar fluctuaciones de energía a corto plazo):

Baterías, Pilas regenerativas, hidrógeno, aire comprimido, mini-hidráulica.

4. *Almacenamientos diarios y estacionales* (aplicable a mitigar la ausencia de recurso renovable): baterías, hidrógeno, aire comprimido, centrales de bombeo.

El otro aspecto a tener en cuenta, que hace referencia al costo asociado a cada uno de los sistemas de almacenamiento expuestos, se resume en

la tabla a continuación, ordenados ya según la escala de tiempos comentada anteriormente.

Como conclusión, se puede apreciar como el hidrógeno puede ser una alternativa atractiva como sistema de almacenamiento energético horario y estacional, y en un rango de potencias adecuado con en tamaño actual de los parques eólicos actuales del orden de los megavatios.

### CONTEXTO ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA A NIVEL NACIONAL, Y CARACTERÍSTICAS INTRÍNECAS DE LA MISMA

Para poder llegar a comprender la simbiosis existente entre la energía eólica y el hidrógeno, es necesario previamente entender el contexto en el que se enmarca la energía eólica, y sobre todo entender el sistema energético eléctrico nacional, y las propias características intrínsecas de la energía eólica, que se va a exponer a continuación.

A fecha de enero del 2008 [2], la potencia eólica instalada en **España** era de 15.145 MW, Y según datos de **REE**, la generación eólica alcanzó en 2007 los 26.407 GWh, lo que supone un 10 % del consumo eléctrico, cubriéndose la demanda eléctrica de la siguiente forma: energía nuclear 22%, carbón 25 %, hidráulica 9 %, gas natural 24 % , fuel oil 2 %, régimen especial 18 %

La mayor parte de la energía eléctrica se produce actualmente en grandes centrales nucleares, térmicas e hidráulicas, que están conectadas directamente a la red de transporte de 220 kV ó 400 kV, con un tamaño que por lo general va desde los 300 MW a los 1.000 MW de las centrales nucleares o las grandes centrales de carbón.

La producción de energía eléctrica está supervisada por una entidad independiente denominada Operador del Sistema (**Red Eléctrica de España**) [3]

En los últimos años, está tomando importancia la generación distribuida: instalaciones de producción de energía eléctrica de un tamaño menor que las convencionales, y que se suelen conectar a la red de distribución (< 220 kV). Éste es el caso de las centrales basadas en fuentes de energía renovables, al tratarse de fuentes de energía cuya fuente

primaria de energía se encuentra dispersa en la geografía, y que según normativa actual no participan en el control de la red eléctrica.

Para atender la demanda en todo momento es necesario prever una reserva de generación que esté disponible. Estas reservas se clasifican en tres tipos:

- **Reserva de regulación primaria:** está disponible con carácter inmediato (15 s), y se realiza modificando la frecuencia del sistema, a costa de la energía cinética almacenada en los rotores de las máquinas en funcionamiento. Este servicio debe ser proporcionado de forma obligatoria por los generadores en régimen ordinario.

- **Reserva de regulación secundaria:** está formada por centrales que varían su producción, devolviendo al sistema a sus condiciones de funcionamiento prevista, y el tiempo de actuación de este tipo de reserva debe ser de hasta 15 min.

- **La reserva terciaria** entra a partir de los 15 min. A mayor reserva disponible, significa un mayor coste de la energía eléctrica. La generación eólica tiene una

propiedad característica que ya se ha comentado anteriormente de *no gestionabilidad* porque hasta la fecha ningún parque eólico dispone de un sistema de almacenamiento de energía intermedio, y se dispone de la energía cuando existe el recurso, en este caso el viento.

Para poder comprender mejor la *no gestionabilidad* de la energía eólica se van a mostrar a continuación algunas de las características intrínsecas de la misma que la caracterizan [4].

- **Desacoplamiento** entre la producción y la generación.

En la figura siguiente se puede apreciar en trazo verde, la producción eólica en un rango horario, y en amarillo los consumos del sistema eléctrico

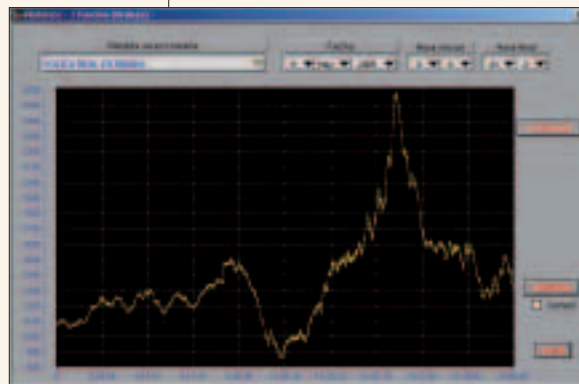


Ilustración 3-Gradientes de la generación eólica [4]

tráfico en ese mismo instante de notar-se que la escala de los consumos esta corregida por un factor de 10, con el único fin de poder llegar a ver en la misma escala esta característica, en la que se puede apreciar que no existe ninguna correlación entre la generación eólica y los consumos.

Como conclusión se puede decir que no existe ninguna correlación entre la producción eólica y los consumos eléctricos en dicho instante.

- **Elevados gradientes** en la producción eólica

Otra propiedad intrínseca de la energía eólica, son los gradientes en la producción que se pueden llegar a producir en un margen de tiempo de horas, por la propia naturaleza variable del viento.

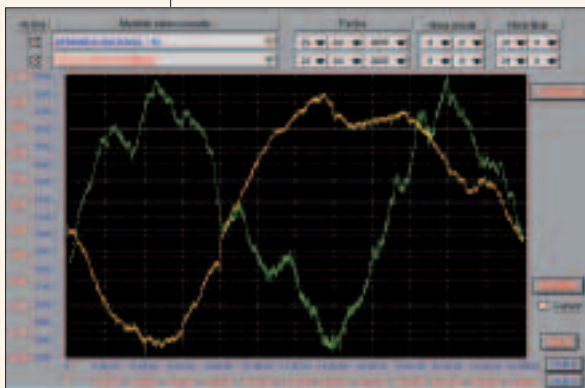


Ilustración 2- Patrones de consumo y generación eólica [4]

En la siguiente figura se muestra una curva de producción para un intervalo determinado, en el que se puede apreciar el gradiente de producción existente en un momento determinado que ronda el rango de los 1.000 MW/h

• **Incertidumbre** en la predicción  
Actualmente existe multitud de software desarrollado [6] y que se está desarrollando, para predecir la producción eólica, con el fin de poder coordinar toda la producción de energía, en la que se incluyen el resto de

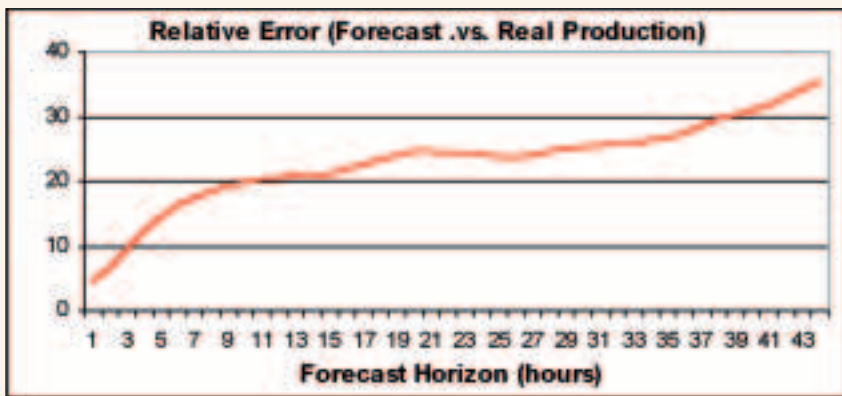


Ilustración 4-Error relativo en la predicción de la producción eólica [4].

La mayor parte de la energía eléctrica se produce actualmente en grandes centrales nucleares, térmicas e hidráulicas...

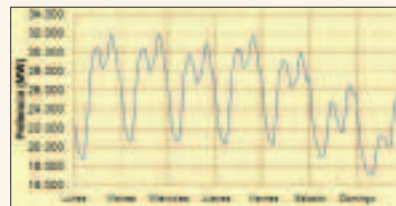


Ilustración 7-Patrones de consumo nacionales a lo largo de la semana [4]

fuentes de energía, para poder llegar a cubrir en todo momento las necesidades de consumo.

La energía eólica presenta una característica propia, que hace referencia a que no es posible con los medios actuales llegar a predecir con total exactitud su producción para un instante dado, por lo que se cometen errores de predicción que varían en función del margen temporal para el que se predice. Por ejemplo en la siguiente figura se puede apreciar dicho margen de error que se comenta.

En la figura se puede apreciar como en un horizonte temporal superior a las 9 horas aproximadamente, existe una desviación en la previsión de producción de un 20 %.

• **Variabilidad** en la producción

La energía eólica es una fuente de energía de la cual se dispone cuando existe recurso eólico, y evidentemente cuando no se dispone de él, no existe ningún tipo de aporte de esta energía, de ahí que se dan situacio-

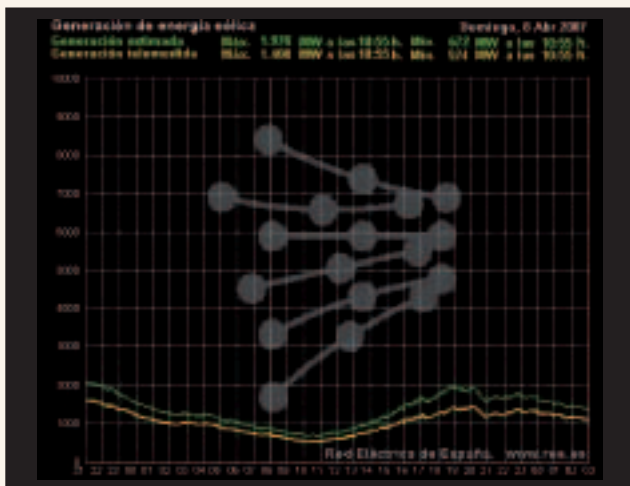


Ilustración 5-Situaciones en la que la producción eólica es muy baja [3]

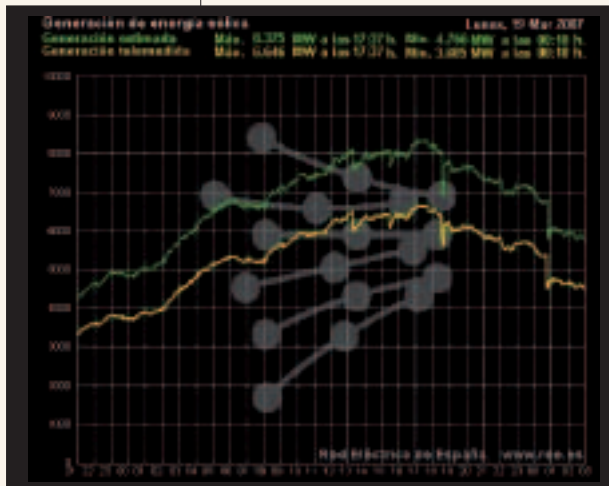


Ilustración 6-Situaciones en la que la producción eólica es muy alta [3]



**Fecha:** Madrugada de un domingo del 2010

**Consumos eléctricos:** 18.000 MW.

**El parque eólico nacional,** está a un 70 % de su capacidad

La generación eléctrica sería la suma de dos términos:

**Energía nuclear,** al ser una fuente de energía que funciona a carga base (7.716 MW)

**Energía Eólica** (70 % \* 20.155 MW)

La producción de electricidad instantánea sería de **21.824 MW.**

nes como se muestran en las dos figuras sucesivas.

Como se ha podido apreciar en las figuras anteriores, se puede dar un escenario en la que la producción de energía eólica es mínima, al pasar a situaciones en las que la producción eólica está al 70 % de su capacidad total.

Con todas estas características intrínsecas de la energía eólica que se resumen de nuevo a continuación:

La energía eólica presenta una característica propia, que hace referencia a que no es posible con los medios actuales llegar a predecir con total exactitud su producción para un instante dado, por lo que se cometen errores de predicción que varían en función del margen temporal para el que se predice

Una vez expuestos por un lado los distintos sistemas de almacenamiento de energía actuales, y por otro la naturaleza intrínseca de la generación eólica, ha quedado de manifiesto que para poder aumentar el peso específico de una fuente de energía renovable como es en este caso la energía eólica, es necesario un sistema de almacenamiento de energía, y uno de los más prometedores actualmente es el hidrógeno.

- Desacople entre la producción eólica y la demanda eléctrica.
- Gradientes en la producción.
- Error en la predicción de producción.
- Variabilidad.

Hacen que un sistema eléctrico con elevados porcentajes de penetración eólica tenga que disponer de elevadas reservas terciarias de energía en forma de otras energías, lo cual encarece el precio de la electricidad, ya que este tipo de instalaciones que actúan de reserva, para mantener su rentabilidad, el precio al que venden la energía generada es elevada.

Y hay otro escenario que se puede llegar a dar en un horizonte temporal de 2 años, en sistemas en los que el nivel de penetración de eólica es muy elevado y las interconexiones con otros países no son las adecuadas, como se va a comentar a continuación.

En patrón de consumos típicos a lo largo de una semana es el que se muestra a continuación:

En el que se puede apreciar que el mínimo de consumos se alcanza en la madrugada del domingo al lunes.

Según el plan nacional de las energías renovables, el objetivo de potencia de energía eólica para el 2010 es de 20.155 MW, con lo que se podría llegar al siguiente escenario:

Por lo tanto se puede ver como la generación superaría a los consumos (21.824 MW > 18.000 MW), y se producirían restricciones de evacuación de energía eólica a la red.

### GESTIÓN DE PARQUES EÓLICOS UTILIZANDO HIDRÓGENO

Una vez expuestos por un lado los

distintos sistemas de almacenamiento de energía actuales, y por otro la naturaleza intrínseca de la generación eólica, ha quedado de manifiesto que para poder aumentar el peso específico de una fuente de energía renovable como es en este caso la energía eólica, es necesario un sistema de almacenamiento de energía, y uno de los más prometedores actualmente es el hidrógeno.

A nivel Internacional son numerosos los proyectos existentes en esta temática como son: *HyWindBalande (Alemania)*, *RES2H2 (Grecia)*, *HARI (Inglaterra)*, Proyecto en *Utsira (Noruega)*, *Wind-to-Hydrogen (Estados Unidos)*, Planta Experimental de *Pico Truncado (Argentina)* etc. Y a nivel nacional, son otros tantos los que se están desarrollando como: *RES2H2 (Gran Canarias)*, *HIDROLICA (Cádiz)*, Planta experimental de hidrógeno en *Sotavento (Galicia)*, parque eólico del *Perdón (Navarra)*, *Aeropila (Valladolid)*, *HIDROTEC (País Vasco)*, etc, quedando de manifiesto el liderazgo nacional en esta temática hidrógeno/eólica.

En esa línea, la *Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón*, junto con la empresa suiza de electrolizadores *IHT*, están trabajando conjuntamente dentro del proyecto *ITHER "Infraestructura Tecnológica del Hidrógeno y Energías Renovables"*, con el fin de demostrar la viabilidad técnica a escala real de gestión de un parque eólico de medio tamaño 635 kW, con un sistema de producción de hidrógeno, con el fin de poderlo extrapolar a tamaños de parques superiores del

orden de los 20 MW, que son los que se instalan actualmente.

La línea de investigación se centrará en la electrólisis alcalina de alta presión "*High Pressure Electrolyze HPE*" acoplada a la gran eólica, ya que presenta ventajas muy destacadas respecto al resto de tecnologías de electrólisis como: gran inercia térmica, elevada presión de producción de hidrógeno (32 bar), y robustez (5.000 A en DC alimentación *Stack*)

Existen ya grupos de trabajo formados a nivel internacional [5] dentro de la *Agencia Internacional de la Energía*, que están trabajando en la temática del hidrógeno como sistema de almacenamiento de energía para hacer de la energía eólica una fuente de energía gestionable.

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Revista Ingeniería Química N 454 pag (56-61)
- [2] Revista Energías Renovables Feb 64 Pag (24-26)
- [3] <http://www.ree.es>
- [4] Foro Empresarial Eólico. Febrero 2007 Zaragoza
- [5] <http://task24.hidrogenoaraagon.org/> (04/03/2008)
- [6] <http://www.garradhassan.com/> (04/03/2008)
- [7] ALCANTARA ROMAN, Ricardo. TIRADO COELLO, Jose Luis. "Materiales para el almacenamiento y Conversión de Energía". DYNA Febrero 2008. Vol. 83-1. pag. 29-36.
- [8] ALIAGA LOPEZ, Arturo. Entrevista. DYNA Diciembre 2007. Vol. 82-9. pag. 460-461. ■