

# Diseño de una planta eólica de hidrógeno en el laboratorio de alumnos a partir de una central experimental aislada de 70 kW



Luis R. Rodríguez Cano<sup>1</sup>, Rolando Valdés Castro<sup>1</sup>, Verónica Tricio Gómez<sup>2</sup>,  
Jesús H. Lucio García<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, Calle Villadiego s/n, CP 09001, Burgos, España.

<sup>2</sup>Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Burgos, Plaza Misale Bañuelos s/n, CP 09001, Burgos, España.

**E-mail:** lrcano@ubu.es

(Recibido el 20 de enero de 2018; aceptado el 29 de junio de 2018)

## Resumen

En muchos casos la naturaleza de una investigación permite el trasiego de aspectos destacado de la misma desde el laboratorio experimental al de alumnos, sin más que acomodar -según el estadio de la enseñanza- el equipamiento y los contenidos a estudiar, a las capacidades físicas del laboratorio y a las intelectuales del alumno. Aquí presentamos un ejemplo de ello. Se trata en esencia de la generación de hidrógeno -un combustible limpio y renovable- a partir de energía eólica. Con este vector energético se consigue que el impacto ambiental derivado de su generación y consumo sea prácticamente nulo. El trabajo supone un intento de acercamiento del alumno a la denominada "Economía del Hidrógeno", un modelo que se presume que sea el sustituto de la ya decadente "Economía del Petróleo". Para iniciar en este modelo al alumno -en este caso universitario-, es conveniente tratar todos los aspectos relacionados con la generación, almacenamiento y consumo del hidrógeno limpio. Para ello se propone una práctica de laboratorio docente que comprende tres experiencias para los estudios de ingeniería y ciencias. Esta práctica ha sido diseñada a partir de la experiencia adquirida en el desarrollo de un proyecto de investigación sobre la generación de hidrógeno electrolítico como combustible utilizando una central automatizada y aislada.

**Palabras clave:** hidrógeno como combustible, energías renovables, la economía del hidrógeno, enseñanza de las ciencias.

## Abstract

In many cases the nature of an investigation allows the transfer of important aspects of it from the experimental laboratory to laboratory teaching without more than accommodate, according to the stage of education, working equipment and contents to study, to the physical capabilities of the laboratory and intellectual of the students. Here is an example. This is essentially the hydrogen generation -a clean fuel and renewable- from wind energy. The use of this energetic vector ensures that the environmental impact of its generation and its consumption be almost zero. The work is an attempt for to approach the learning the "Hydrogen Economy", a model that is presumed to be the replacement for the already decadent "Economy of Oil". To start this study a university student should tackle all aspects related to the generation, storage and consumption of clean hydrogen. This paper proposes a teaching lab, which includes three experiences for engineering studies and science. This practice has been designed from the experience gained in the development of a research project o the generation of electrolytic hydrogen as fuel using an automated central and isolated.

**Keywords:** hydrogen as fuel, renewable energies, hydrogen economy, science education.

**PACS:** 01.40.d, 01.55.+b, 01.40.Ha., 88.05.Lg.

**ISSN 1870-9095**

## I. INTRODUCCIÓN

Entre otras, una de las razones por las que no termina de prosperar la idea de la economía del hidrógeno [1, 2, 3, 4], que contribuiría a establecer una estrategia global contra el cambio climático y asegurar el suministro energético en todo el planeta, es el escaso conocimiento que tiene la sociedad sobre este vector energético. En consecuencia, la formación de los estudiantes universitarios en este campo

favorecería el avance hacia el modelo de abastecimiento energético sostenible. La inclusión en los laboratorios docentes de prácticas relativas a la generación, almacenamiento y consumo del hidrógeno permitirá el conocimiento de las tecnologías empleadas en los procesos citados, las opciones de consumo del hidrógeno, la evaluación de las eficiencias de los generadores y convertidores empleados, y las posibilidades del almacenamiento de los excedentes; en suma, la difusión

del hidrógeno como combustible sustitutivo del petróleo pero renovable, limpio y al alcance de todos los países.

A partir del desarrollo de una central automatizada y aislada de la red de 70 kW para la generación de hidrógeno electrolítico como combustible, hemos diseñado una práctica para el laboratorio de alumnos de la disciplina de Energías Renovables en la Ingeniería. La planta preindustrial, que fue concebida por nuestro grupo de trabajo en 2005 con fines demostrativos y terminados en el año 2009, se está modificando en la actualidad para emplearla como banco de pruebas en la optimización de centrales de hidrógeno eólicas, fotovoltaicas y eólico-fotovoltaicas [5]. La experiencia de laboratorio propuesta está pensada para ser incluida como parte de las actividades prácticas presenciales a realizar por los estudiantes de la asignatura de energías renovables. En esta práctica se exponen los fundamentos de la generación de hidrógeno electrolítico, se realiza el balance energético del proceso de generación y consumo y se calcula el rendimiento del aerogenerador y las eficiencias del electrolizador y de la pila de combustible, ambos del tipo PEM [6, 7, 8].

## II. LA PRÁCTICA DE LABORATORIO

En esta práctica, que consta de tres experiencias, se exponen los fundamentos de la generación de hidrógeno electrolítico, se realiza el balance energético del proceso de generación y consumo de este combustible y se calcula el rendimiento del aerogenerador y las eficiencias del electrolizador y de la pila de combustible, ambos del tipo PEM.

**El hidrógeno.** Es el elemento más ligero, su masa atómica es de 1,00794 u. Es también, el elemento más abundante, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia visible del universo. En su secuencia principal, las estrellas están compuestas por hidrógeno en estado de plasma. Se trata pues de la principal fuente de energía del Universo. En la Tierra el hidrógeno elemental es muy escaso.

Las propiedades fundamentales del hidrógeno considerado como combustible son:

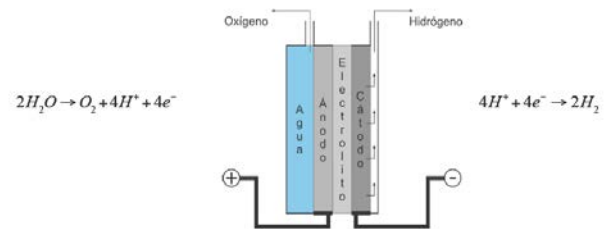
- Densidad: 0,0899 kg N m<sup>-3</sup> (gas); 70,8 kg m<sup>-3</sup> (líquido).
- Punto de ebullición a presión normal: 20,28 K (-252,8 °C).
- Poder calorífico inferior: 120 MJ kg<sup>-1</sup> (gasolina 43; metano 50 MJ kg<sup>-1</sup>).
- Emisiones mg CO<sub>2</sub> kJ<sup>-1</sup>: 0 (gasolina 80; metano 55 mg CO<sub>2</sub> kJ<sup>-1</sup>).
- Equivalencias: 1kg de H<sub>2</sub> son 11,12 Nm<sup>3</sup> de gas y 14,12 l de líquido.

**Electrolizadores y pilas de combustible.** La electrolisis del agua es su descomposición en oxígeno e hidrógeno mediante una corriente eléctrica. Este proceso puede invertirse. Oxígeno e hidrógeno pueden recombinarse dando como resultado una corriente

eléctrica y agua. El primer proceso se realiza en cubas electrolíticas o electrolizadores, y el segundo en células de combustible.

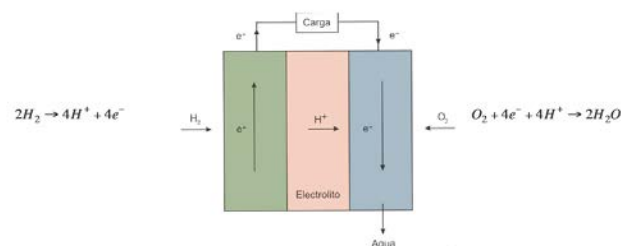
El hidrógeno puede quemarse para obtener energía térmica, o bien oxidarse en pilas de hidrógeno para obtener directamente energía eléctrica. El resultado de su combustión es únicamente energía y vapor de agua, estando exento de NO<sub>x</sub> si se emplean catalizadores basados en platino u otros metales, de manera que la combustión catalítica ocurra a temperaturas inferiores a los 1300 °C. La oxidación en las pilas de hidrógeno es un proceso completamente limpio en el que se genera sólo energía eléctrica y como subproductos agua y oxígeno.

**Producción de hidrógeno electrolítico.** Existen dos tecnologías de electrolisis según el electrolito: de electrolito líquido o de electrolito sólido. A bajas temperaturas se emplean en general los electrolitos líquidos alcalinos (KOH) y el electrolito ácido sólido de membrana de intercambio de protones (PEM). En esta práctica emplearemos un electrolizador de polímero sólido PEM. En la figura 1 se ilustra el esquema de un electrolizador de electrolito sólido tipo PEM.



**Figura 1.** Esquema de un electrolizador tipo PEM y reacciones en los electrodos.

En un proceso inverso se consume el hidrógeno en una célula de combustible, generando energía eléctrica y como subproducto agua (en la misma cantidad que se ha necesitado para generar el hidrógeno que se ha consumido). En la figura 2 se muestra esquemáticamente el funcionamiento de una célula de hidrógeno de tipo PEM.

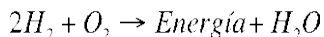


**Figura 2.** Esquema de una célula de hidrógeno y reacciones en los electrodos.

Las dos reacciones de la figura producen un flujo continuo de electrones entre los dos electrodos cuando se cierra el circuito a través de una resistencia eléctrica. Como se

indica en la figura, los protones  $H^+$  pueden migrar a través del electrolito, mientras que los electrones, que tienen impedido este camino, cierran el circuito a través de la resistencia.

En el proceso global se consumen hidrógeno y oxígeno, para dar energía eléctrica y agua:



de manera que si el hidrógeno se hubiera obtenido mediante electrolisis, el consumo neto de agua sería nulo. El proceso será completamente limpio siempre que la energía empleada en la electrolisis también lo sea.

En las cuatro figuras siguientes se muestran los elementos esenciales de la práctica

El aerogenerador, representado en la figura 3, tiene una potencia nominal de 600 W y proporciona una tensión de salida de 12 V; es asíncrono de imanes permanentes. Las velocidades de arranque, nominal y de frenado son de 3,5, 11 y 13  $m\ s^{-1}$ , respectivamente. En la figura 4 se visualiza tanto el acondicionador de potencia como el sistema de baterías. Este sistema de baterías está constituido por seis vasos de 2 V. Su capacidad nominal  $C_B$  es de 627 Ah.



Figura 3. Aerogenerador.



Figura 4. Acondicionador de potencia y baterías.

En la figura 5 se representa el electrolizador. Es de tipo PEM y proporciona un flujo máximo de  $1,66 \cdot 10^{-6} m^3s^{-1}$  en condiciones normales de presión y temperatura. En la figura 6 se muestra la pila de combustible, conectada al electrolizador a través de un regulador de presión. Se trata de una pila PEM de 20 W. Así mismo se muestra en esta figura, una botella de almacenamiento de hidrógeno mediante hidruros metálicos y un detector de fugas de hidrógeno.



Figura 5. Electrolizador PEM.

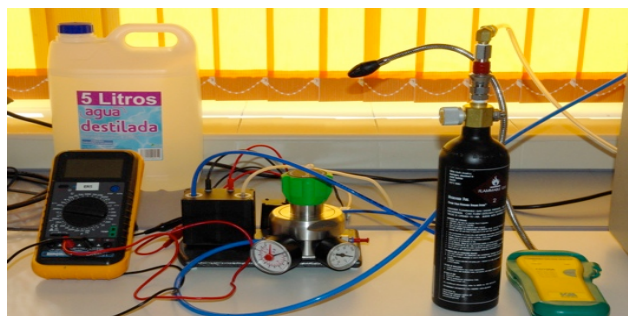


Figura 6. Montaje de la pila de hidrógeno.

### Experimento 1. Generador eólico.

En este experimento se determina el coeficiente de potencia de un sistema eólico en función de la velocidad del viento y se calcula, de forma simplificada, la dimensión de una instalación eólica.

Objetivos:

- Comprensión del fenómeno de la conversión de energía eólica en eléctrica.
- Estudio de las características relevantes de un aerogenerador, determinación de su velocidad de arranque y de su coeficiente de eficiencia.
- Comprensión del fenómeno de almacenamiento de la energía eléctrica obtenida.
- Determinación del coeficiente de potencia instantánea del generador eólico.
- Representación de un tramo de la curva de potencia del aerogenerador.

Material de la práctica:

Sistema eólico consistente en,

- Aerogenerador diámetro del rotor  $D = 2$  m, de 600 W de potencia nominal.
- Regulador de carga con amperímetro y voltímetro.
- Batería de seis vasos de f.e.m. unitaria de 2 V y capacidad nominal  $C_B$  de 627 Ah.
- Anemómetro digital.

Tareas:

- Realizar mediciones de los valores de la velocidad del viento.
- Realizar mediciones de tensión e intensidad de la energía eléctrica generada.
- Calcular la potencia generada y representarla en función de la velocidad del viento.
- Hallar el coeficiente de potencia y su dependencia con la velocidad del viento.
- Dimensionar una instalación problema.

Método y resultados:

En la figura 7 se representa el sistema eólico empleado. El regulador de carga incorpora un amperímetro y un voltímetro por lo que en cada instante se conoce la corriente de carga y la tensión en bornes de la batería, es decir, la potencia de carga.

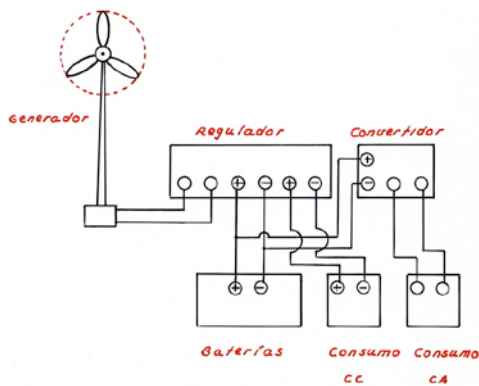


Figura 7. Sistema eólico.

Para estimar la energía que se puede obtener de una máquina eólica, consideraremos el aire como un fluido ideal, incompresible en régimen estacionario. En estas condiciones se verifican tanto la ecuación de continuidad como la de Bernoulli. Para un flujo horizontal, la potencia transferida por el viento al rotor de la eólica es la variación temporal de la energía cinética de la vena de fluido que contiene dicho rotor. Se obtiene así la expresión conocida como *fórmula de Betz*, que representa el límite de la potencia teórica máxima extraíble de un flujo de aire con las propiedades consideradas, y que puede escribirse como:

$$P_{max} = \frac{8}{9} \left( \frac{1}{2} \rho S_1 v_1^3 \right) \quad (1)$$

considerando las características de la vena lejos del rotor. También se utiliza la relación:

$$P_{max} = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \right) \quad (2)$$

considerando el área barrida por el rotor.

En estas expresiones  $\rho$  es la densidad del aire (que tomamos como  $1,25 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $S_1$  y  $S_2$  son las áreas de las secciones de la vena de aire que contiene al rotor de la máquina y la barrida por el rotor respectivamente y  $v_1$  es la velocidad del viento antes de interactuar con el rotor. Considerando máquinas reales, cuyos rendimientos mecánico y eléctrico son menores que la unidad, la potencia real obtenida será siempre menor que la establecida por el límite de Betz (1). En la figura 8 se ilustra la curva de potencia genérica de una máquina eólica.

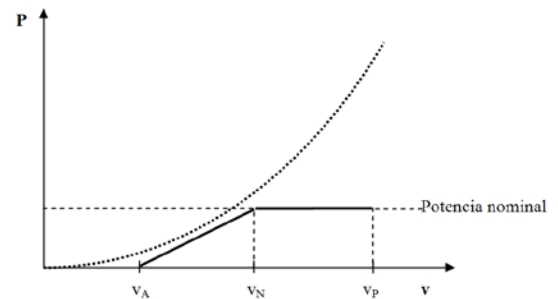


Figura 8. Curva de potencia de una máquina eólica.

La curva punteada de esa figura es el límite ideal de Betz, mientras que la función a trozos corresponde al comportamiento general de una máquina eólica. En esta gráfica se especifican los siguientes parámetros característicos de las turbinas eólicas:

- *Velocidad de arranque*  $v_A$ : velocidad mínima del viento necesaria para que el rotor comience a girar.
- *Velocidad nominal*  $v_N$ : velocidad mínima del viento con la que la máquina genera la máxima potencia (*potencia nominal*).
- *Velocidad de paro o frenado*  $v_P$ : velocidad máxima del viento que puede soportar la máquina generando potencia sin sufrir daños.

En la figura 9 se muestra la curva de potencia del aerogenerador del experimento.



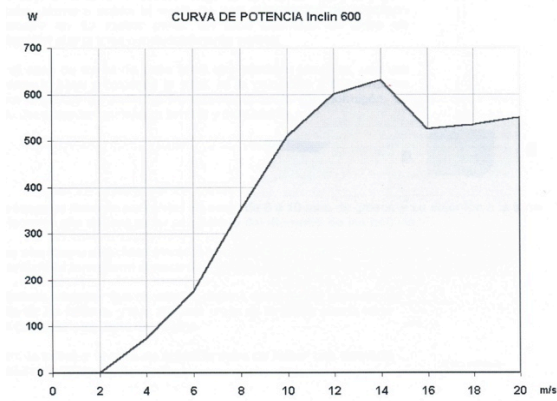


Figura 9. Curva de potencia del aerogenerador.

La potencia desarrollada por un aerogenerador de eje horizontal se puede determinar de forma aproximada a partir de (2). Considerando el área barrida por el rotor en relación con el área de la vena de viento incidente, resulta

$$P = C_P P_{max} = 0,29 C_P D^2 v^3 \quad (3)$$

donde  $D$  es el diámetro del rotor y  $v$  la velocidad del viento.  $C_P$  es el denominado *coeficiente de potencia o eficiencia* del aerogenerador, que suele estar comprendido entre 0,2 y 0,5.

El cálculo simplificado de una instalación eólica para la generación de energía eléctrica requiere de la evaluación del consumo diario de energía  $C_d$ , y de la mínima velocidad media mensual en un año, ya que la energía suministrada por el sistema en ese mes debe igualar a la consumida por la carga en el mismo periodo de tiempo. Así mismo, debe estimarse el sistema: diámetro del aerogenerador y número de baterías en función del grado de autonomía en días que se requiera, de la capacidad de las baterías, y de la profundidad de descarga  $P_D$  de las mismas.

El diámetro del rotor se estima a partir de (1) igualando este diámetro  $D$  al de la vena de aire, resultando

$$D = \sqrt{\frac{C_d}{10,47 C_P v^3}} \quad (4)$$

Operaciones solicitadas:

1. Determinar la velocidad del viento  $v$  en el anemómetro, la tensión en bornes de la batería la corriente de carga en intervalos de 30 minutos a lo largo de todo el experimento.
2. A partir de los datos de tensión e intensidad, hallar la potencia suministrada a la batería.
3. Completar, con los valores calculados, el cuadro 1 adjunto.

4. Representar gráficamente  $P$  en función de  $v$ . ¿A qué zona de la gráfica de funcionamiento del aerogenerador corresponden los puntos tomados?
5. Representar el coeficiente de potencia  $C_P$  del sistema en función de  $v$ . Analizar el resultado.
6. Comentar la discrepancia entre los resultados obtenidos, con los que proporciona el fabricante del aerogenerador.

Cuadro 1. Datos.

Tiempo	0	30 minutos	60 minutos	90 minutos	120 minutos
$v$ (ms <sup>-1</sup> )					
$V$ (V)					
$I$ (A)					
$P$ (W)					

### Problema.

Sea una zona en la que la velocidad media del viento en el peor mes es de 5 ms<sup>-1</sup>. Dimensionar un sistema eólico con una máquina cuyo coeficiente de potencia sea  $C_P = 0,3$ , para una vivienda aislada, suponiendo que la potencia total instalada sea de 404,15 W, que el consumo de la red sea del 3% del total y que se dispone de baterías de capacidad unitaria 720 Wh, cuya profundidad de descarga es  $P_D = 0,6$ , si se prevé una autonomía de 2 días.

### Experimento 2. Generación electrolítica de hidrógeno mediante un electrolizador PEM.

En este experimento se sigue una pauta didáctica similar al anterior.

Objetivos:

- Comprensión del fenómeno del uso de la energía eléctrica en la generación de hidrógeno.
- Estudio de las características relevantes de un electrolizador PEM y de las equivalencias hidrógeno-energía y caudal de hidrógeno-potencia.
- Comprensión del concepto de poder calorífico superior e inferior.
- Comprensión del fenómeno de almacenamiento del hidrógeno como vector energético.
- Determinación de la eficiencia instantánea del electrolizador.

Material de la práctica:

- Electrolizador PEM
- Fuente de energía: batería constituida por seis vasos de f.e.m. unitaria de 2V y acondicionador de potencia para el suministro en corriente alterna.
- Caudalímetro de hidrógeno.
- Amperímetro y voltímetro.
- Botella de almacenamiento de hidrógeno por hidruros metálicos.

Tareas:

- Realizar mediciones de los valores de tensión-intensidad de alimentación del electrolizador.
- Realizar mediciones del flujo de hidrógeno generado.
- Determinar la eficiencia instantánea del electrolizador.

Método y resultados:

En la figura 5 se muestra el electrolizador empleado y en la 4 el sistema de baterías con el acondicionador de potencia.

Puesto el electrolizador a funcionar, se mide el caudal del hidrógeno generado y la tensión e intensidad de la alimentación eléctrica.

Teniendo en cuenta el poder calorífico inferior, así como la densidad del hidrógeno en condiciones normales de presión y temperatura, se determina la equivalencia hidrógeno-energía y caudal y la potencia eléctrica que se indica en los cuadros 2 y 3, respectivamente.

**Cuadro 2.** Equivalencia hidrógeno-energía.

Equivalencia Hidrógeno-Energía			
Masa de H <sub>2</sub> (kg)	H <sub>2</sub> gas (Nm <sup>3</sup> )	Energía MJ	Energía (kWh)
1	11,12	120	33,33

**Cuadro 3.** Equivalencia caudal de hidrógeno-energía.

Equivalencia caudal de hidrógeno-potencia eléctrica		
Kg de H <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> h de H <sub>2</sub> (gas)	Potencia (KW)
1	11,12	33,33

La medida de la potencia de alimentación y del caudal generado permite determinar la eficiencia instantánea de funcionamiento del electrolizador

$$\eta = \frac{\text{potencia asociada al caudal}}{\text{potencia aplicada}}$$

El hidrógeno generado se almacena en una botella de hidruros metálicos o se consume en una pila de hidrógeno, como se detalla en el experimento siguiente.

**Experimento 3. Pila de hidrógeno.**

En este experimento se determina la curva característica tensión-corriente de la pila de combustible. Esta curva proporciona el conocimiento básico sobre el comportamiento de estos generadores. Los resultados obtenidos, extrapolados, pueden ser utilizados para el diseño de pilas de mayor tamaño.

Objetivos:

- Comprensión del fenómeno del uso del hidrógeno en la generación de energía eléctrica.
- Estudio de las características relevantes de una pila de combustible PEM.
- Determinación de la curva característica tensión-intensidad de una pila de combustible.

- Representar el diagrama de potencia en función de la intensidad de la pila.
- Interrelacionar los diferentes valores físicos de una pila de combustible.
- Diseño de las características de una pila de combustible, en función de los resultados obtenidos.

Material de la práctica:

- Pila PEM.
- Electrolizador PEM.
- Caudalímetro de hidrógeno.
- Amperímetro y voltímetro.
- Reostato.

Tareas:

- Realizar mediciones de los valores de tensión-intensidad de la pila.
- Determinar los valores correspondientes de la potencia de la pila.
- Representar las curvas tensión-intensidad y potencia-intensidad de la pila.
- Calcular, a partir de los resultados obtenidos, las características de una pila de diferente potencia.

Método y resultados:

Alimentada la pila con un flujo de hidrógeno conocido, se miden los valores de la tensión e intensidad a la salida. Variando el valor de la carga se obtienen distintos valores de la potencia de salida de la misma. Estos valores se anotan en el cuadro 4.

Interpretación de los resultados:

- Representar la curva  $V_{pila} = f(I_{pila})$  de la pila de combustible y describir el comportamiento de la pila con la corriente.
- Representar la curva de la potencia de la pila en función de la intensidad:  $P_{pila} = f(I_{pila})$  de la pila de combustible.

**Cuadro 4.** Valores experimentales de tensión-intensidad y valor calculado de la potencia.

Valores de las mediciones		Calculado
I <sub>pila</sub> (A)	V <sub>pila</sub> (V)	P <sub>pila</sub> (W)


Cuestiones:

- Hay dos parámetros esenciales que determinan la potencia de una pila de combustible: el número de células y la densidad de corriente (en A/cm<sup>2</sup>). La pila de esta práctica consta de 10 células, siendo la superficie activa de los electrodos de 16 cm<sup>2</sup>. De los resultados de las medidas de esta pila para una intensidad de 6A, determinar la tensión y la densidad de corriente de una celda individual.
- Suponiendo que estos valores son transferibles a pilas de combustible de mayor potencia, usar los resultados obtenidos para calcular dos pilas de combustible:
  - Pila de 1 kW<sub>el</sub> con un voltaje de trabajo V<sub>pila</sub> = 24 V.
  - Pila de 5 kW<sub>el</sub> con un voltaje de trabajo V<sub>pila</sub> = 42 V.
 Para ambas pilas encontrar los siguientes valores: la corriente de la célula, el número de células y la superficie activa de la célula.

### III. LA PLANTA DE HIDRÓGENO ELECTROLÍTICO

En la figura 10 se representa esquemáticamente la planta de hidrógeno [9], referida en el apartado de Introducción. Ésta consta de dos sistemas de generación aislados de la red: uno eólico y el otro fotovoltaico [10, 11, 12, 13].

El generador eólico está constituido por dos turbinas de 20kW de potencia nominal unitaria, mientras que el generador fotovoltaico consta de un subsistema fijo de 20 kW de potencia nominal y de otro subsistema con seguidor solar de 10 kW. Un acondicionador de potencia que admite entradas de tensión continua y alterna, acomoda las potencias de ambos generadores para que alimenten simultáneamente el electrolizador. Finalmente un sistema de baterías conectado al acondicionador de potencia, almacena o suministra electricidad en las fases de exceso o escasez de la energía proporcionada por las fuentes renovables. El hidrógeno generado se almacena en botellas de alta presión o bien se consume directamente en una pila de combustible.

Los elementos citados son los principales de la instalación; otros elementos secundarios reseñables son: el sistema de refrigeración del electrolizador con agua de un estanque, el depurador de agua para la electrolisis, el sistema de nitrógeno para el control neumático y la inertización del electrolizador, los sistemas de medición y control, los de protección eléctrica y contra fugas de hidrógeno y el sistema de protección antiincendios.

En las figuras (11), (12), (13), (14), (15) y (16) se muestran los elementos esenciales de la instalación: aerogeneradores, generador fotovoltaico, acondicionador

de potencia, electrolizador, sistema de almacenamiento y pila de combustible.

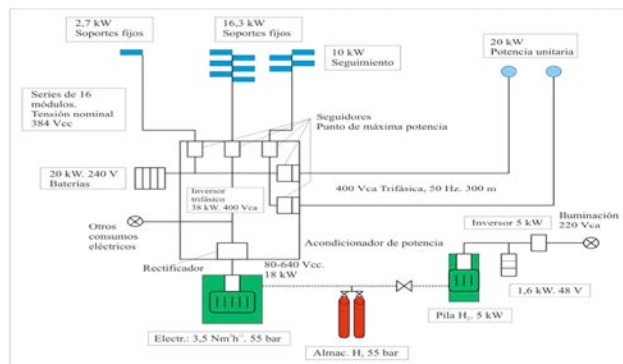


Figura 10. Esquema de la central de hidrógeno.



Figura 12. Generador F.V. con seguidor solar.

Los aerogeneradores tienen una potencia nominal 20 kW<sub>e</sub>. Están instalados sobre torres metálicas de 18 m de altura. Incorporan generadores síncronos de imanes permanentes y acoplamiento directo entre el rotor y el generador eléctrico. El generador fotovoltaico está constituido por módulos de silicio monocristalino. Una parte de los mismos, con una potencia de 10 kW, está soportada sobre un seguidor solar de doble eje. El resto del generador es una instalación fija de 20 kW.

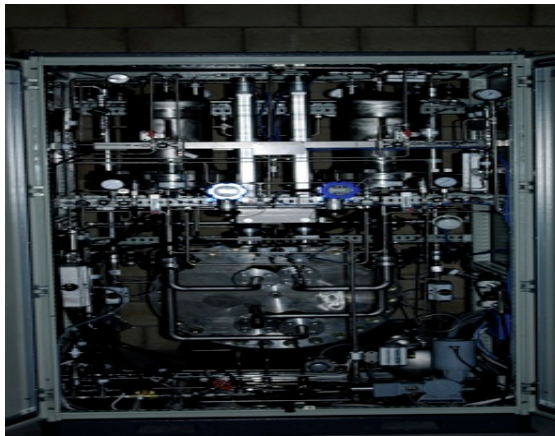




**Figura 13.** Inversor y controlador del electrolizador.



**Figura 16.** Pila de combustible.



**Figura 14.** Electrolizador alcalino.

Para el acondicionado de la potencia proveniente de los aerogeneradores y los generadores fotovoltaicos se emplea un equipo inversor para instalaciones aisladas, capaz de gestionar simultáneamente la energía de varios generadores, optimizando la potencia extraída de los mismos. El electrolizador es de tipo alcalino bipolar que trabaja con fuentes de potencia variable. Su producción de hidrógeno es de  $3,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$  entre 20 y 55 bar.



**Figura 15.** Almacenamiento e inertización.

El almacenamiento se realiza en botellones industriales a 50 bar. Para el consumo, se emplea una pila tipo PEM que puede proporcionar 5 kW de potencia eléctrica nominal, consumiendo  $4,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de hidrógeno. La planta se ha automatizado para su funcionamiento remoto.

#### IV. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una práctica de laboratorio, consistente en tres experiencias, para formar a los estudiantes de ingeniería y de ciencias en el mundo del hidrógeno limpio como combustible. Esta práctica nace como consecuencia de las investigaciones que el Grupo de Energía Solar y Medio Ambiente Atmosférico de la universidad de Burgos (España) realiza sobre la optimización de centrales solares eólicas, fotovoltaicas o combinadas (eólico – fotovoltaicas). El cálculo simplificado de una instalación eólica para la generación de energía eléctrica permite que los alumnos aprendan a estimar la dimensión de una instalación sencilla de generación y consumo de hidrógeno limpio, y con ello a comprender las posibilidades de este elemento en el abastecimiento energético del futuro.

#### AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Europea por la financiación del Proyecto LIFE Hydrosolar 21 que ha sido el germen de nuestro trabajo en el campo del hidrógeno limpio como combustible.

Al Ayuntamiento de la ciudad de Burgos por su apoyo al desarrollo de las energías renovables.

#### REFERENCIAS

- [1] Botas, J.A., Calles J.A., Dufour, J., San Miguel G., *La economía del hidrógeno\_ una visión global sobre la revolución energética de siglo XXI*, <http://www.aecientificos.es> (acceso 10/07/2012)
- [2] Midilli, M. Ay, Dincer, I., Rosen M.A., *On hydrogen and hydrogen energy strategies I: current status and*



*needs*, Renewable and Sustainable Energies Reviews **9**, 255-271 (2005).

[3] Midilli, M. Ay, I. Dincer, M.A. Rosen, *On hydrogen and hydrogen energy strategies II: future projection affecting global stability and unrest*, Renewable and Sustainable Energies Reviews **9**, 273-287, (2005).

[4] Nejat T., Veciroglu, *Quarter Century of hydrogen movement*, International Journal of Hydrogen Energy **25**, 1143-1150 (2000).

[5] Valdés, R., Rodríguez, L. R., J.H. L., *Procedure for optimal design of hydrogen production plants with reserve storage and stand-alone photovoltaic power system (en prensa)*, International Journal of Hydrogen Energy, (1992).

[6] J. Larminie, A Dicks. *Fuel Cell Systems Explained*, Ed. Wiley, Printed and bound in Great Britain by Antony Rowe Ltd, Chippenham, Wiltshire, pp. 1-433 (2003).

[7] *Estado de la tecnología del hidrógeno y pilas de combustible en España*, Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y las Pilas de Combustible. Grupo de

Análisis de Capacidades, Asociación Española del Hidrógeno, (2008).

[8] San Miguel G., Dufour J, J. A. Calles J. A., Botas A., *La economía del hidrógeno-2. Aplicaciones convencionales del hidrógeno y pilas de combustible*, <https://www.serina.es> (acceso 10/07/2012)

[9] Rodríguez L. R., et al., *Proyecto LIFE Hydrosolar'21. Desarrollo de minicentrales de frío solar y de hidrógeno con fuentes eólica y fotovoltaica*, Energías renovables, retos y futuro: Refrigeración e hidrógeno solar, pp. 103 – 112, Ed. Universidad de Burgos, (2008).

[10] Ortega M., *Energías renovables*, Ed. Paraninfo, (1999).

[11] Castro M., Cruz I., *Energía Eólica*, Monografías Técnicas de Energías Renovables 1. Ed. Progensa, 1977.

[12] Heier, S., *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Ed J.wiley, (1998).

[13] Lorenzo E., *Electricidad Solar*, Ed Progensa, (1994).